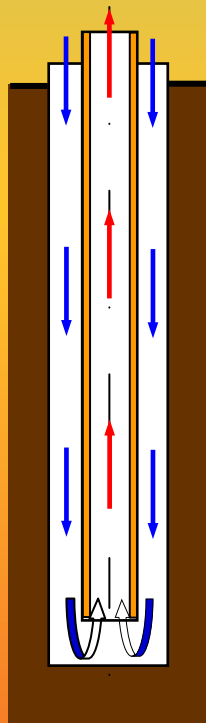


Tomasz Kujawa

Modelowanie geotermalnych wymyenników ciepła typu Field – pozyskiwanie ciepła geotermalnego



Szczecin 2019

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Tomasz Kujawa

**Modelowanie
geotermalnych wymienników ciepła
typu Field – pozyskiwanie ciepła
geotermalnego**

Szczecin 2019

Recenzenci

PROF. DR HAB. INŻ. TADEUSZ BOHDAL

PROF. DR HAB. INŻ. MIECZYSLAW E. PONIEWSKI

Opracowanie redakcyjne

IWONA HILICKA

Projekt okładki

TOMASZ KUJAWA

Wydano za zgodą

REKTORA ZACHODNIOPOMORSKIEGO UNIWERSYTETU TECHNOLOGICZNEGO W SZCZECINIE

ISBN 978-83-7663-289-6

Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
al. Piastów 48, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 47 60, e-mail: wydawnictwo@zut.edu.pl

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	7
Przedmowa	9
Wstęp	11
1. MODELOWANIE GEOTERMALNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA TYPU FIELD – PRZEGLĄD LITERATURY	15
2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE GEOTERMALNEGO WYMIENNIKA CIEPŁA TYPU FIELD	19
2.1. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody mniejszą od temperatury złoża na powierzchni ziemi	19
2.2. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody większą od temperatury złoża na powierzchni ziemi	34
2.3. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody większą od temperatury złoża na powierzchni ziemi przy dwóch zróżnicowanych parametrycznie warstwach górotworu (np. przy warstwie skalnej i złożu geotermalnym wodonośnym)	53
2.4. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody większą od temperatury złoża na powierzchni ziemi przy dwóch zróżnicowanych parametrycznie powierzchniach wewnętrznych wymiennika (np. zaizolowanego i nieizolowanego kanału wewnętrznego wymiennika)	59
3. WSPÓŁCZYNNIKI PRZEKAZYWANIA CIEPŁA	73
3.1. Współczynnik przenikania ciepła	73
3.2. Współczynnik wnikania ciepła	74
3.3. Zastępczy opór cieplny gruntu	76
4. WYKORZYSTANIE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO GEOTERMALNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA TYPU FIELD DO OCENY POZYSKANIA CIEPŁA Z OTWORU JACHÓWKA 2K	79
	3

4.1. Właściwości cieplno-fizyczne ośrodka otaczającego otwór wydobywczo- -zatlaczający	86
4.2. Obliczenia ilości ciepła geotermalnego możliwego do pozyskania z otworu Jachówka 2K do głębokości 2870 m	87
4.2.1. Wariant z izolacją doskonałą rury wewnętrznej na całej długości otwo- ru (2870 m)	87
4.2.2. Wariant z izolacją w postaci szczeliny powietrznej rury wewnętrznej na całej długości otworu (2870 m)	90
4.2.3. Wariant z izolacją w postaci pianki poliuretanowej w górnym odcinku rury wewnętrznej na długości 600 m (pozostała część rury wewnętrznej wymennika o długości 2270 m jest nieizolowana)	92
4.3. Obliczenia ilości ciepła geotermalnego możliwego do pozyskania z otworu Jachówka 2K do głębokości 3950 m	102
4.3.1. Wariant z izolacją doskonałą rury wewnętrznej na całej długości otwo- ru (3950 m)	104
4.3.2. Wariant z izolacją w postaci szczeliny powietrznej rury wewnętrznej na całej długości otworu (3950 m)	105
4.3.3. Wariant z izolacją w postaci pianki poliuretanowej w górnym odcinku rury wewnętrznej na długości 600 m (pozostała część rury wewnętrznej wymennika o długości 3350 m jest nieizolowana)	106
4.3.4. Wariant z izolacją w postaci szczeliny powietrznej rury wewnętrznej na długości 2870 m (pozostała część rury wewnętrznej wymennika o dłu- gości 1080 m jest nieizolowana)	108
4.4. Wnioski	120
5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE	123
Literatura	127
Załącznik Z1	137
Załącznik Z2	147

Załącznik Z3	158
Załącznik Z4	167
Spis rysunków	173
Spis tabel	181
Streszczenie	183
Summary	184

Wykaz ważniejszych oznaczeń

a	współczynnik wyrównania temperatury,	m^2/s
a, a^*, b	stałe,	–
C_1^*, C_2^*, C	stałe całkowania,	–
c_p	średnie ciepło właściwe,	$J/(kg \cdot K)$
D, d	średnica,	m
d	symbol różniczki,	–
dL	elementarna długość,	m
E	stała,	$^{\circ}C/m$
E^*, F	stałe,	$^{\circ}C$
k	współczynnik przenikania ciepła,	$W/(m^2 \cdot K)$
K	zredukowany współczynnik przenikania ciepła,	W/K
L	współrzędna długości, głębokości,	m
\dot{m}	masowy strumień czynnika,	kg/s
p, q	parametry, stałe,	–
Q_l	liniowa gęstość strumienia ciepła,	W/m
Q	ilość ciepła,	$GJ, t.p.u.$
\dot{Q}	strumień ciepła,	W
r_w	promień otworu w skale,	m
R	opór przekazywania ciepła,	$m \cdot K/W$
T	temperatura,	$^{\circ}C$
T_x	temperatura gruntu,	$^{\circ}C$
\dot{V}	objętościowy strumień czynnika,	m^3/h
X	zredukowana długość,	–
x, y	współrzędne w układzie kartezjańskim,	–
\dot{W}	pojemność cieplna strumienia,	W/K
λ	współczynnik przewodzenia ciepła,	$W/(m \cdot K)$
ν^2	pierwiastek równania algebraicznego,	–
ν	kinematyczny współczynnik lepkości czynnika,	m^2/s
ρ	gęstość masy,	kg/m^3
Θ	różnica temperatur,	K
ΔT	różnica temperatur ($T_2 - T_1$),	K
α	współczynnik wnikania ciepła,	$W/(m^2 \cdot K)$

Indeksy dolne:

1	dotyczy płynu przepływającego w kanale pierścieniowym wymiennika lub odniesienie do średnicy zewnętrznej kanału wymiennika,	—
2	dotyczy płynu przepływającego w kanale wewnętrznym wymiennika (rura wewnętrzna) lub odniesienie do średnicy wewnętrznej kanału,	—
d	doprowadzenie do układu,	—
f	dotyczy średniej temperatury czynnika,	—
G	dotyczy warstwy geotermalnej,	—
i	i -funkcja ($i = 1, 2$),	—
inj	otwór zatłaczający,	—
$ins, insul, iz$	izolacja,	—
pro	otwór wydobywczy,	—
S	dotyczy warstwy skalnej,	—
w	dotyczy rury <i>wewnętrznej</i> wymiennika lub wyprowadzenie z układu lub <i>temperatury czynnika przy ścianie</i> ,	—
z	dotyczy rury <i>zewnętrznej</i> wymiennika,	—

Indeksy górne:

iz	izolacja,	—
G	dotyczy warstwy geotermalnej,	—
' (prim)	dotyczy dopływu,	—
'' (bis)	dotyczy wypływu,	—

Liczby kryterialne:

$Bi = \frac{\alpha r_1}{\lambda}$	liczba Biota,	—
$Fo = \frac{a_s t}{r_1^2}$	liczba Fouriera,	—
$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$	liczba Nusselta,	—
$Pr = \frac{\nu}{a}$	liczba Prandtla,	—
$Re = \frac{w D}{\nu}$	liczba Reynoldsa.	—

Przedmowa

Niniejsza monografia powstała dzięki wiedzy i doświadczeniu zdobytemu w trakcie studiów i pracy w Katedrze Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie (wcześniej Politechniki Szczecińskiej). W tym miejscu pragnę złożyć podziękowanie wszystkim Profesorom, którzy brali udział w procesie mojego kształcenia oraz przyczynili się do mojego rozwoju naukowego, jak również osobistego. W szczególności pragnę podziękować prof. dr. hab. inż. Władysławowi Nowakowi, mojemu Mentorowi, za opiekę naukową, jak również ojcowską, oraz moim Kolegom Profesorom: Andrzejowi Stachelowi i Zbigniewowi Zapałowiczowi.

Dziękuję również moim Koleżankom i Kolegom z Katedry Techniki Ciepłej za dotychczasową miłą współpracę w zespole, który tworzymy.

Serdeczne podziękowania składam także Recenzentom wydawniczym (Profesorowi Tadeuszowi Bohdalowi oraz Profesorowi Mieczysławowi E. Poniewskiemu) za podjęcie się trudu przeczytania niniejszej monografii oraz za bardzo cenne i merytoryczne uwagi, które przyczyniły się do zwiększenia walorów naukowych tej pracy.

Najważniejsze jednak podziękowania kieruję na ręce mojej najbliższej rodziny – mojej kochanej Żonie i moim Synom: Piotrowi, Pawłowi, Szymonowi, Jakubowi, Maciejowi i Tomaszowi jr., i Im dedykuję tę pracę, dziękując jednocześnie za wyrozumiałość i cierpliwość, którymi zostałem obdarowany w trakcie pisania tej monografii.

Szczecin, dn. 23 kwietnia 2019 roku

Tomasz Kujawa

Wstęp

Nieustanny i szybki rozwój gospodarki światowej powoduje przyspieszone zużywanie się naturalnych, ograniczonych w czasie zasobów nośników energii (ropa naftowa, gaz ziemny, węgiel). Stąd od kilkudziesięciu lat trwają prace nad możliwością efektywnego wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Wśród nich jest energia geotermiczna, która definiowana jest jako energia Ziemi zgromadzona w magmie, skałach i płynach (para wodna, woda, ropa naftowa, gaz ziemny itp.) wypełniających pory i szczeliny skalne (energia geotermalna jest częścią energii geotermicznej zawartej w wodzie, parze wodnej oraz w otaczających skałach) [1, 2]. Taki podział (energia geotermiczna, energia geotermalna) stosowany jest jedynie w nomenklaturze polskiej, gdy na całym świecie mówi się o energii geotermalnej, stąd w dalszej części pracy zdecydowano się używać tego właśnie określenia.

Energia geotermalna ma wiele zalet: jest stabilnym źródłem energii – może być eksploatowana niezależnie od warunków zewnętrznych (głównie meteorologicznych), podczas gdy inne rodzaje energii odnawialnej (energia słoneczna, energia wiatru, energia pływów morskich itp.) [3, 4] mogą być wykorzystywane jedynie wówczas, gdy występują w danym czasie. Energia geotermalna wykazuje również niewielki wpływ na środowisko, bardzo niską emisję gazów cieplarnianych i możliwość wydobycia z całego globu ziemskiego.

Ocenia się, że energia ta stanie się ważnym elementem bilansu energetycznego przy wyczerpywaniu paliw kopalnych [5]; ok. 44 TW tej energii jest przenoszone z wnętrza na powierzchnię Ziemi [6].

Produkcja energii elektrycznej ze źródeł geotermalnych znacznie wzrosła w ciągu ostatnich 20–25 lat z zainstalowanej mocy 1300 MW w roku 1975, do 10715 MW w roku 2010 [7, 8]. Ocenia się, że w przyszłości energia geotermalna może zaspokoić ponad 3% globalnego zapotrzebowania na energię elektryczną do roku 2050 [9].

Znaczna część produkcji energii geotermalnej wykorzystuje dziś energię z zasobów wysokotemperaturowych, do których często docierają penetrujące warstwy wodonośne na głębokości 1000–2000 m poniżej powierzchni w celu pozyskiwania ciepła dla elektrowni geotermalnych [10].

Geotermalne ciepłownie i elektrociepłownie najczęściej pracują w układach dwuotworowych z otworami wydobywczym i zatłaczającym; powstają one w wielu krajach całego świata –

w roku 2010 całkowita zainstalowana moc przekroczyła 10 000 MW [11, 12]. W takich układach na podstawie znanych modeli obliczeniowych można w stosunkowo prosty sposób, z dostateczną dokładnością, określić temperaturę wody geotermalnej wydobywanej na powierzchnię ziemi lub temperaturę zatłaczanej wody geotermalnej na poziomie złożeń. Przy stosunkowo dużych strumieniach masy wydobywanej wody zmiany temperatury wody geotermalnej w przewodzie wydobywczym i zatłaczającym są stosunkowo małe. Jednak wadą tych rozwiązań jest stosunkowo wysoki udział kosztów wiercenia otworów w stosunku do całkowitych kosztów inwestycyjnych [13]; może on wynosić od 50% [8] do 75% kosztów całkowitego projektu geotermalnego [14, 15], gdzie koszt rośnie gwałtownie wraz z głębokością wiercenia otworu [14, 16].

Wielkość tych kosztów inwestycyjnych można odpowiednio zmniejszyć, stosując jednootworowe systemy wydobywczo-zatłaczające, ograniczając się do wiercenia jednego otworu. Najkorzystniej jest, jeżeli wykorzysta się istniejące już pojedyncze otwory, które wykonane zostały przy poszukiwaniu ropy naftowej lub gazu ziemnego; możliwe jest też wykorzystanie zamkniętych z eksploatacji szybów naftowych, których dalsza eksploatacja nie ma uzasadnienia ekonomicznego [17]. Ocenia się, że obecnie na świecie jest ok. 20–30 milionów porzuconych szybów naftowych [17], a Polska należy do krajów posiadających kilka tysięcy zlikwidowanych głębokich otworów wiertniczych [18, 19].

Opuszczone odwierty mają zwykle dość dużą głębokość i korzystny profil temperaturowy, który zachęca do ich wykorzystania. Średni koszt wiercenia otworu wiertniczego o głębokości około 3000 m w Polsce wynosi 5 mln USD, gdzie koszt modernizacji porzuconego odwiertu waha się w granicach 200 000 EUR (ok. 225 000 USD) [20], stąd wykorzystanie istniejącego otworu jest 22 razy tańsze niż wiercenie nowego.

W tym celu do takiego otworu możemy wprowadzić wymiennik ciepła typu rura w rurze z czynnikiem pośrednim odbierający ciepło z formacji skalnej. W literaturze wymiennik ten nazywany jest wymiennikiem typu Field, otworowym współosiowym wymiennikiem ciepła (OWWC), bądź geotermalnym otworowym współosiowym wymiennikiem ciepła (GOWWC).

Dlatego też w niniejszej pracy zaprezentowane zostaną modele matematyczne geotermalnego wymiennika typu Field, za pomocą których jesteśmy w stanie ocenić ilość pozyskiwanej energii geotermalnej przekazanej z wnętrza otworu poprzez płyn pośredniczący.

Wymienniki takie zostały opisane w pracach [3, 4] – metody analityczne oraz w pracy [6] – metody numeryczne.

K. Morita [6] przeprowadził wstępne badania odnośnie GOWWC o głębokości 3000 m. Wykonał symulacje numeryczne dla przypadku ciągłej pracy wymiennika – 180 dni. Celem tych badań było poznanie ogólnej charakterystyki głębokiego GOWWC, zwłaszcza zakresu uzyskiwanej mocy cieplnej i temperatury gorącej wody na wypływie.

Energia geotermalna to odnawialna, czysta i zrównoważona energia magazynowana w postaci ciepła pod powierzchnią ziemi [1]. Ocenia się, że około 44 TW energii cieplnej jest przenoszona z wnętrza na powierzchnię Ziemi [2]. Energia geotermalna stanie się istotną częścią nowej energii w przyszłości, na skutek stopniowego wyczerpywania tradycyjnej energii, takiej jak węgiel i ropa naftowa [3]. Sucha para lub wysokotemperaturowa ciekła woda wydobywana z odwiertów geotermalnych była wykorzystywana do generowania energii elektrycznej przez dziesięciolecia.

Elektrownie geotermalne powstają w 24 krajach, a całkowita zainstalowana moc geotermalna na całym świecie przekracza 10 000 MW w 2010 r. [4,5]. Jednak rozwój energii geotermalnej jest ograniczony wysokimi kosztami wiercenia [6]. Tymczasem na całym świecie opuszcza się 20–30 milionów odwiertów naftowych i istnieją poważne problemy związane z zanieczyszczeniem spowodowanym przez wyciek [7]. Wielu autorów sugeruje, że istniejące odwierty naftowe, gazowe, badawcze można zamienić na studnie geotermalne służące do wytwarzania energii [8–12]. W ten sposób koszt wiercenia będzie nie tylko zmniejszony, ale zostaną rozwiązane także problemy związane z zanieczyszczeniem środowiska. Takie działania mogą stać się nowym sposobem wykorzystania energii geotermalnej.

1. MODELOWANIE GEOTERMALNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA TYPU FIELD – PRZEGLĄD LITERATURY

Jak wspomniano we wstępie pracy, jedną z form pozyskania energii geotermalnej jest wykorzystanie istniejących pojedynczych otworów, które wykonane zostały przy poszukiwaniu ropy naftowej, gazu ziemnego lub zostały wyłączone z eksploatacji, gdyż dalsza ich praca nie ma uzasadnienia ekonomicznego [17]. Pokażna ich liczba na świecie (ok. 20–30) [17] powoduje, że rośnie zainteresowanie tematem – pojawiają się opracowania związane z możliwością ich zagospodarowania.

Najczęściej spotykanym w literaturze tematu rozwiązaniem jest uzbrojenie takiego otworu w dwie rury o różnych średnicach tak, aby utworzyły wymiennik typu rura w rurze z punktem zwrotnym (wymiennik typu Field) i dzięki czynnikowi pośredniczącemu, odbierającemu ciepło z formacji skalnej, możliwe było pozyskanie energii [3, 4, 6, 10, 19, 22–37]. Płyn (najczęściej woda lub płyn o niskiej temperaturze wrzenia) wtryskiwany do przestrzeni pierścieniowej utworzonej przez dwie rury, ogrzewa się na całej długości otworu, po czym na końcu wymiennika kierowany jest do wewnętrznej rury i przepływa do głowicy odwiertu. Tak pozyskany strumień cieplny może być wykorzystany na potrzeby c.o., c.w.u., celów technologicznych, jak również do produkcji energii elektrycznej przy pomocy układów Organic Rankine Cycle (ORC) [38–61]. Zainstalowanie takiego wymiennika ma tę zaletę, że minimalizuje koszty i konsekwencje związane z wydobyciem (np. wysoki stopień mineralizacji wody) i z reguły w większości przypadków ponownym wtłaczaniem wody geotermalnej do wnętrza Ziemi.

Wielu autorów zajmuje się modelowaniem wymiany ciepła w opuszczonych odwiertach, szacując potencjał produkcji ciepła, przeprowadzając badania wrażliwości wielu parametrów w celu określenia optymalnych warunków ich eksploatacji [3, 4, 6, 10, 19, 22–37]. W większości modelowanie wymiany ciepła opiera się na aparacie numerycznym, przy wykorzystaniu komercyjnych pakietów do rozwiązywania złożonych zagadnień wymiany ciepła.

Davis i Michaelides [10] na podstawie równań zachowania masy, energii i pędu opracowali matematyczny model, za pomocą którego oszacowali produkcję energii geotermalnej z opuszczonych szybów naftowych w regionie południowego Teksasu. Charakterystyczne w podejściu było wykorzystanie izobutenu (jako płynu przenoszącego ciepło), który ma lepsze właściwości termodynamiczne i dlatego jest lepiej dostosowany do ekstrakcji ciepła oraz przy-

jęcia stałości temperaturowej złoża, w którym umieszczony był geotermalny wymiennik ciepła (przyjęli wysoki gradient geotermiczny, typowy dla obszaru geologicznego).

Wyniki ich badań pokazują, że wykorzystując opuszczone odwierty, jesteśmy w stanie wykorzystać ponad 3 MW energii cieplnej, gdy temperatura na dnie otworu wynosi około 187°C, a ciśnienie wtrysku wynosi 30 barów. Stwierdzili również, że ilość pozyskanej energii zależy od temperatury wgłębnej, ciśnienia wtrysku, prędkości płynu, rozmiaru rury i grubości zastosowanej izolacji rury wewnętrznej.

Bu i inni [7] opracowali model matematyczny opisujący wymianę ciepła pomiędzy płynem przepływającym przez wymiennik i warstwami skał. Rozwiązanie modelu przeprowadzili na drodze numerycznej za pomocą algorytmu macierzy tridiagonalnej. W opracowanym modelu pominęli równania przenoszenia masy. Wykazali, że pozyskanie strumienia ciepła z opuszczonych szybów naftowych zależy w dużej mierze od prędkości przepływu płynu i gradientu geotermalnego.

Templeton i inni [4] zbadali możliwość wydobycia ciepła z opuszczonych studni naftowych wyposażonych w wymienniki ciepła, analizując podziemny przepływ ciepła. Do opisania przewodzenia ciepła przez skały i płyn zastosowali trójwymiarowe równanie ciepła Fouriera, a zagadnienie rozwiązali z wykorzystaniem elementów skończonych przy użyciu oprogramowania FlexPDE. Obliczenia wykazały, że otwór będzie w stanie wyprodukować 80 kW mocy. Analiza parametryczna pozwoliła na znalezienie optymalnej temperatury dopływu płynu do wymiennika i masowego natężenia przepływu.

Cheng i inni [22, 25] dokonali symulacji opuszczonego odwiertu naftowego jako źródło energii geotermalnej. Ich model oparty jest na przejściowym przepływie ciepła, równaniu zachowania pędu i energii. Jako płyn cyrkulacyjny używany był izobuten. Stwierdzili, że temperatura wylotowa płynu zmniejsza się wraz z upływem czasu i stabilizuje się, gdy układ zbliża się do równowagi termicznej. Czas ten można zmniejszyć, zwiększając przewodność cieplną formacji lub zmniejszając prędkość wlotową cieczy, podczas gdy pojemność cieplna formacji ma niewielki wpływ. Wykazali również, że głębokość opuszczonego odwiertu naftowego musi wynosić co najmniej 3000 m, aby zapewnić wystarczającą moc wyjściową. Przeprowadzili również badanie różnych płynów organicznych jako płynów roboczych i zalecili ich użycie celem zwiększenia wydobycia energii geotermalnej z opuszczonych szybów naftowych.

Alimonti i inni [29] wykorzystali numeryczny model temperatury do oszacowania teoretycznej ilości ciepła wydobytego z opuszczonych studni naftowych na polu naftowym Villafortuna

Trecate. Rozważania prowadzili dla dwóch płynów roboczych: wody i oleju diatermicznego. Przeanalizowali różne wewnętrzne średnice rur, aby zoptymalizować geometryczną konfigurację dla efektywnej ekstrakcji ciepła. Stwierdzili, że lepszym płynem do pozyskania ciepła geotermalnego w wymienniku typu Field jest woda. Ustalili również, że pseudostacjonarny stan zostanie osiągnięty po 5 latach eksploatacji (z redukcją mocy początkowej o ok. 45%).

Morita [6] przeprowadził wstępne badania odnośnie geotermalnych wymienników ciepła typu Field o głębokości 3000 m. Wykonał symulacje numeryczne dla przypadku ciągłej pracy wymiennika – 180 dni. Celem tych badań było poznanie ogólnej charakterystyki głębokiego wymiennika ciepła, zwłaszcza zakresu uzyskiwanej mocy cieplnej i temperatury gorącej wody na wypływie (badanym medium była woda).

Pozostałe prace [23, 24, 26–28, 30–37], tak jak wspomniano wcześniej, w większości rozwiązywały zagadnienia z użyciem metod numerycznych przy użyciu oprogramowania typu ANSYS, BoHEX, FlexPDE, Fluent, FRACTure, TETRAD/GEOTEMP, AUTOUGH2, Feflow, Cactus [62–77].

Zainteresowanie autora pracy tematyką geotermalnych wymienników ciepła do pozyskania energii trwa od kilkunastu lat [1, 78–135] i rozpoczęło się, gdy nie było dostępnych rozwiązań analitycznych, a publikacji w tej tematyce było niewiele. Niniejsza monografia ma na celu zebranie uzyskanych wyników obliczeń analitycznych i przedstawienie na tle wyników badań innych autorów, choć jest to trudne w realizacji, gdyż w literaturze tematu brakuje istotnych danych, które pozwoliłyby na bezpośrednie ich porównanie.

2. MODELOWANIE MATEMATYCZNE GEOTERMALNEGO WYMIENNIKA CIEPŁA TYPU FIELD

Powszechność stosowania wymienników ciepła typu Field spowodowała, że opracowane modele matematyczne dotyczą tych właśnie rodzajów wymienników. We wszystkich rozpatrywanych przypadkach założono, że temperatura gruntu rośnie wraz ze wzrostem głębokości otworu, a zmiana odbywa się liniowo.

2.1. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody mniejszą od temperatury złoża na powierzchni ziemi

W modelu matematycznym opisującym wymianę ciepła w pionowym geotermalnym wymienniku typu Field [82, 92–95] przyjęto, że temperatura wody na dopływie jest niższa od temperatury złoża na powierzchni ziemi (przypadek taki ma miejsce, gdy nośnik ciepła został intensywnie schłodzony w odbiornikach ciepła lub może dotyczyć sytuacji, gdy przez wymiennik przepływa nośnik ciepła w obiegu otwartym – na przykład ciepła woda użytkowa – lub gdy wykorzystujemy czynnik niskowrzący) oraz że temperatura gruntu zmienia się liniowo wraz z głębokością według równania:

$$T_x = EL + T_{g0} \quad (2.1)$$

Czynnik do wymiennika zatłaczany jest kanałem pierścieniowym utworzonym przez koncentrycznie ułożoną rurę zewnętrzną i wewnętrzną. W kanale tym następuje odbiór ciepła od złoża, a jednocześnie odbiór ciepła od czynnika o wyższej temperaturze płynącego kanałem kołowym (płynącego rurą wewnętrzną). Wypływ podgrzanego czynnika odbywa się rurą wewnętrzną.

Schemat wymiennika ciepła oraz pole temperatury nośnika ciepła z odpowiednimi oznaczeniami podano na rys. 2.1. Fragment tego wymiennika ciepła dla elementarnej powierzchni o długości (wysokości) dL z osłonami bilansowymi dla poszczególnych części wymiennika przedstawiono na rys. 2.2.

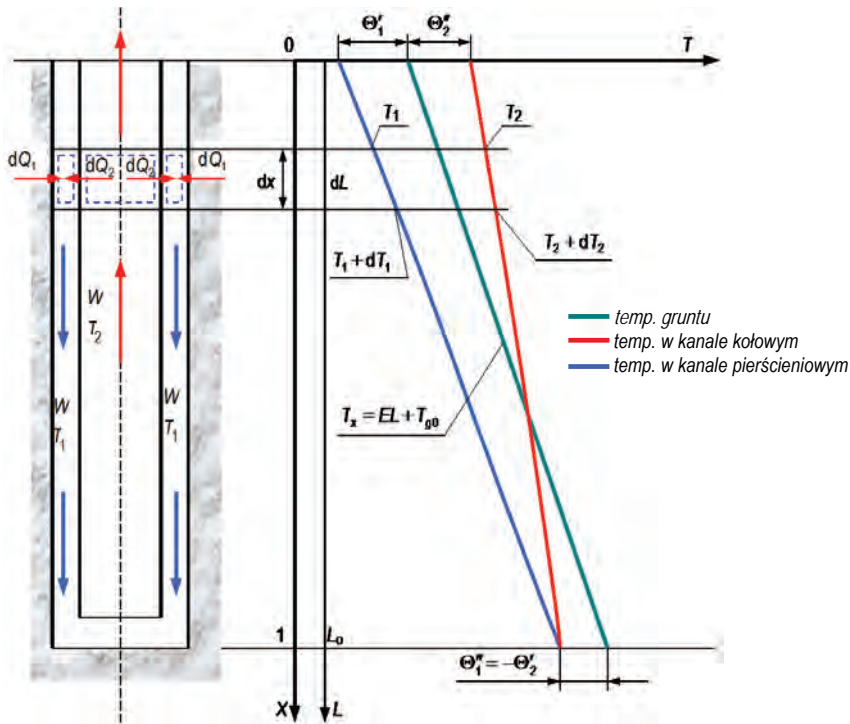
W celu wyprowadzenia wyrażenia na pole temperatur nośnika ciepła wykorzystano równanie bilansu energii dla nośnika ciepła płynącego w kanale kołowym i pierścieniowym. Wychoząc z ogólnego równania bilansu energii w postaci:

$$\dot{E}_d = \Delta \dot{E} + \dot{E}_w, \quad (2.2)$$

w przypadku ustalonej wymiany ciepła równanie to przyjmie postać:

$$\dot{E}_d = \dot{E}_w \quad (2.2a)$$

W związku z tym, że zastępczy współczynnik przekazywania ciepła gruntu k_z zmienia się w czasie, w rzeczywistości będzie miało miejsce quasi-ustalone przekazywanie ciepła z gruntu do nośnika ciepła przez powierzchnię zewnętrzną wymiennika geotermalnego. Sposoby określania tego zastępczego współczynnika przekazywania ciepła k_z zostały omówione w następnym rozdziale (rozdział 3).



Rys. 2.1. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy zmiennej temperaturze gruntu

Równanie bilansu energii dla czynnika płynącego w kanale pierścieniowym wymiennika geotermalnego można zapisać – dla osłony bilansowej obejmującej ten kanał i pokazanej na rys. 2.2a – równaniem:

$$\dot{I}_1 + d\dot{Q}_1 + d\dot{Q}_2 = \dot{I}_1 + d\dot{I}_1 \quad (2.3)$$

Rozpisując to równanie i odnosząc je do elementarnej powierzchni, otrzymano następującą zależność:

$$\dot{m}_1 c_p T_1 + k_z \pi D_z (T_0 - T_1) dL + k_w \pi D_w (T_2 - T_1) dL = \dot{m}_1 c_p T_1 + \dot{m}_1 c_p \frac{dT_1}{dL} dL \quad (2.4)$$

Wprowadzając oznaczenie strumienia pojemności cieplnej czynnika $\dot{W}_1 = \dot{m}_1 c_p$ oraz zredukowaną długość $\frac{L}{L_0} = X$, otrzymano zależność:

$$k_z \pi D_z (T_0 - T_1) d\left(\frac{L}{L_0}\right) L_0 + k_w \pi D_w (T_2 - T_x) d\left(\frac{L}{L_0}\right) L_0 = \dot{W} dT_1 \quad (2.5)$$

lub

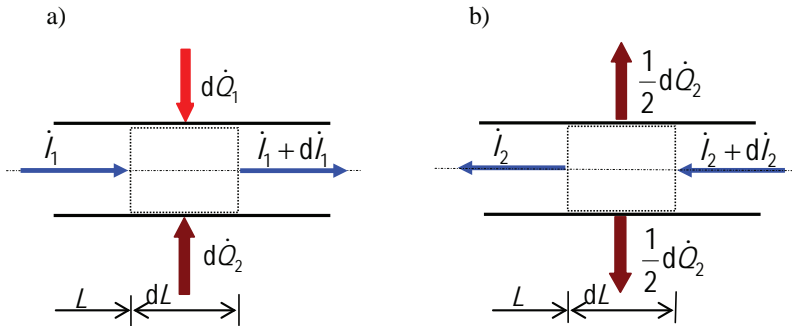
$$k_z \pi D_z (T_0 - T_1) L_0 dX + k_w \pi D_w (T_2 - T_x) L_0 dX = \dot{W} dT_1 \quad (2.5a)$$

Podstawiając do równania (2.5a) oznaczenie $K_z = k_z \pi D_z L_0$ i $K_w = k_w \pi D_w L_0$ (sposób obliczania współczynnika przenikania ciepła od strony wewnętrznej k_w i zewnętrznej k_z wymiennika geotermalnego przedstawiono odpowiednio w rozdziale 3), otrzymano:

$$K_z (T_0 - T_1) dX + K_w (T_2 - T_x) dX = \dot{W} dT_1 \quad (2.6)$$

lub

$$K_z (T_0 - T_1) dX + K_w [(T_2 - T_x) + (T_x - T_1)] dX = \dot{W} dT_1 \quad (2.6a)$$



Rys. 2.2. Schemat fragmentu kanału pierścieniowego (a) i wewnętrznego (b) wymiennika geotermalnego typu Field z przeprowadzoną osłoną bilansową

Równanie bilansu energii dla czynnika płynącego kanałem wewnętrznym wymiennika geotermalnego można zapisać dla osłony bilansowej obejmującej ten kanał i pokazany na rys. 2.2b:

$$\dot{I}_2 + d\dot{I}_2 = d\dot{Q}_2 + \dot{I}_2 \quad (2.7)$$

Rozpisując to równanie i odnosząc je do elementarnej powierzchni, otrzymano następującą zależność:

$$\dot{m}_2 c_p T_2 + \dot{m}_2 c_p \frac{dT_2}{dL} dL = k_w \pi D_w (T_2 - T_1) dL + \dot{m}_2 c_p T_2 \quad (2.7)$$

Wprowadzając oznaczenie pojemności cieplnej $\dot{W}_2 = \dot{m}_2 c_p$ oraz wykorzystując wprowadzoną zredukowaną długość $\frac{L}{L_0} = X$, otrzymano zależność:

$$\dot{W}_2 dT_2 = k_w \pi D_w (T_2 - T_1) d\left(\frac{L}{L_0}\right) L_0 \quad (2.9)$$

lub

$$\dot{W}_2 dT_2 = k_w \pi D_w (T_2 - T_1) L_0 dX \quad (2.9a)$$

Wprowadzając do równania (2.9a) oznaczenie $K_w = k_w \pi D_w L_0$, otrzymano:

$$\dot{W}_2 dT_2 = K_w (T_2 - T_1) dX \quad (2.10)$$

lub

$$\dot{W}_2 dT_2 = K_w [(T_2 - T_x) + (T_x - T_1)] dX \quad (2.10a)$$

Po wprowadzeniu oznaczenia na różnice temperatur $\Theta_1 = T_x - T_1$ i $\Theta_2 = T_2 - T_x$ oraz wiedząc, że $\dot{W} = \dot{W}_1 = \dot{W}_2$, zależność (2.6a) i (2.10a) sprowadzono do postaci:

$$\dot{W} dT_1 = K_z \Theta_1 dX + K_w \Theta_2 dX + K_w \Theta_1 dX, \quad (2.11)$$

$$\dot{W} dT_2 = K_w \Theta_2 dX + K_w \Theta_1 dX \quad (2.12)$$

Dzieląc te równania przez dX , otrzymano:

$$\dot{W} \frac{dT_1}{dX} = K_z \Theta_1 + K_w \Theta_1 + K_w \Theta_2 \quad (2.13)$$

lub

$$\dot{W} \frac{dT_1}{dX} = (K_z + K_w) \Theta_1 + K_w \Theta_2 \quad (2.13a)$$

oraz

$$\dot{W} \frac{dT_2}{dX} = K_w \Theta_1 + K_w \Theta_2 \quad (2.143)$$

Różniczkując Θ_1 i Θ_2 względem X , gdzie $T_x = EL_o \frac{L}{L_o} + T_{g0} = E^* X + T_{g0}$ (gdzie $X = \frac{L}{L_o}$,

$E^* = EL_o$), otrzymano:

$$\frac{d\Theta_1}{dX} = \frac{d(T_x - T_1)}{dX} = \frac{dT_x}{dX} - \frac{dT_1}{dX} = \frac{d(E^* x + T_{g0})}{dX} - \frac{dT_1}{dX} = E^* - \frac{dT_1}{dX}, \quad (2.15)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dX} = \frac{d(T_2 - T_x)}{dX} = \frac{dT_2}{dX} - \frac{dT_x}{dX} = \frac{dT_2}{dX} - \frac{d(E^* x + T_{g0})}{dX} = \frac{dT_2}{dX} - E^* \quad (2.16)$$

Przekształcając równania (2.15) i (2.16), uzyskano następującą postać:

$$\frac{dT_1}{dX} = E^* - \frac{d\Theta_1}{dX}, \quad (2.15a)$$

$$\frac{dT_2}{dX} = \frac{d\Theta_2}{dX} + E^* \quad (2.16a)$$

Porównując prawe strony równań (2.13) i (2.15a) oraz (2.14) i (2.16a), otrzymano:

$$E^* - \frac{d\Theta_1}{dX} = \frac{K_z + K_w}{\dot{W}} \Theta_1 + \frac{K_w}{\dot{W}} \Theta_2 \quad \text{lub} \quad \frac{d\Theta_1}{dX} = -b\Theta_1 - a\Theta_2 + E^* \quad (2.17)$$

oraz

$$\frac{d\Theta_2}{dX} + E^* = \frac{K_w}{\dot{W}} \Theta_1 + \frac{K_w}{\dot{W}} \Theta_2 \quad \text{lub} \quad \frac{d\Theta_2}{dX} = a\Theta_1 + a\Theta_2 - E^*, \quad (2.18)$$

gdzie: $a = \frac{K_w}{\dot{W}}$, $b = \frac{K_z + K_w}{\dot{W}}$.

Powyższy układ równań rozwiązano metodą d'Alamberta [136]. W tym celu zależność (2.17) pomnożono przez p , natomiast zależność (2.18) przez q , otrzymując:

$$\frac{d\Theta_1}{dX} p = -b\Theta_1 p - a\Theta_2 p + E^* p, \quad (2.19)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dX} q = a\Theta_1 q + a\Theta_2 q - E^* q \quad (2.20)$$

Po dodaniu stronami zależności te przyjmą postać:

$$\frac{d}{dX} (\Theta_1 p + \Theta_2 q) = -\Theta_1 (bp - aq) - \Theta_2 (ap - aq) + E^* (p - q) \quad (2.21)$$

$$\text{lub} \quad \frac{d}{dX} (\Theta_1 p + \Theta_2 q) = v^2 (p\Theta_1 + q\Theta_2) + E^* (p - q), \quad (2.21a)$$

jeżeli będzie spełniony warunek:

$$(-bp + aq) = p v^2 \text{ oraz } a(-p + q) = q v^2 \quad (2.22)$$

lub

$$\frac{(-bp + aq)}{p} = \frac{a(-p + q)}{q} = v^2 \quad (2.22a)$$

Po wprowadzeniu nowej funkcji pomocniczej:

$$Z_i = p_i \Theta_1 + q_i \Theta_2 + \frac{p_i - q_i}{v_i^2} E^* \quad \text{dla } i = 1, 2, \quad (2.23)$$

przekształcenia matematyczne pozwalają sprowadzić zależności (2.19) i (2.20) do układu równań różniczkowych rzędu pierwszego o postaci:

$$\frac{dZ_i}{dX} = v_i^2 Z_i \quad \text{dla } i = 1, 2 \quad (2.24)$$

Rozwiązanie układu równań różniczkowych I rzędu ze stałymi współczynnikami (2.24) ma następującą postać:

$$Z_i = C_i \exp(v_i^2 X) \quad i = 1, 2 \quad (2.25)$$

Z warunku (2.22a) na podstawie prostych przekształceń wynikają niżej podane zależności (2.26) i (2.27):

$$\frac{(-bp_i + aq_i)}{p_i} = \frac{a(-p_i + q_i)}{q_i} = v_i^2, \quad (2.26)$$

$$\frac{p_i}{q_i} = \frac{a - v_i^2}{a} \quad (2.27)$$

Z zależności (2.26) i (2.27) wynika poniższy warunek:

$$\frac{a - v_i^2}{a} = \frac{a}{b + v_i^2}, \quad (2.28)$$

z którego wynika równanie algebraiczne pozwalające na określenie pierwiastka v_i^2 :

$$v_i^4 + (b - a)v_i^2 - a(b - a) = 0 \quad (2.29)$$

Obliczając $\Delta = (b - a)^2 + 4a(b - a)$, pierwiastek v_i^2 można określić z niżej podanej zależności:

$$v_i^2 = \frac{-(b - a) \pm \sqrt{(b - a)^2 + 4a(b - a)}}{2} \quad (2.30)$$

Funkcja Z_i zapisana równaniem (2.22) dla $i = 1, 2$ wyrażona jest wzorem:

$$\text{dla } i = 1 \quad Z_1 = p_1 \Theta_1 + q_1 \Theta_2 + \frac{p_1 - q_1}{v_1^2} E^*, \quad (2.23a)$$

$$\text{dla } i = 2 \quad Z_2 = p_2\Theta_1 + q_2\Theta_2 + \frac{p_2 - q_2}{v_2^2} E^* \quad (2.23b)$$

Obliczając z zależności (2.23a) Θ_2 , otrzymano:

$$\Theta_2 = \frac{1}{q_1} \left[Z_1 - p_1\Theta_1 - \frac{p_1 - q_1}{v_1^2} E^* \right], \quad (2.31a)$$

natomiast ta sama wielkość Θ_2 obliczona z zależności (2.23b) wyraża się równaniem:

$$\Theta_2 = \frac{1}{q_2} \left[Z_2 - p_2\Theta_1 - \frac{p_2 - q_2}{v_2^2} E^* \right] \quad (2.31b)$$

Porównując prawe strony równań (2.31a) i (2.31b), otrzymano:

$$\frac{Z_1}{q_1} - \frac{p_1}{q_1} \Theta_1 - \frac{1}{q_1} \cdot \frac{p_1 - q_1}{v_1^2} E^* = \frac{Z_2}{q_2} - \frac{p_2}{q_2} \Theta_1 - \frac{1}{q_2} \cdot \frac{p_2 - q_2}{v_2^2} E^*$$

lub

$$\Theta_1 \left(\frac{p_2}{q_2} - \frac{p_1}{q_1} \right) = \left(\frac{Z_2}{q_2} - \frac{Z_1}{q_1} \right) + E^* \left[-\frac{1}{q_2} \cdot \frac{p_2 - q_2}{v_2^2} + \frac{1}{q_1} \cdot \frac{p_1 - q_1}{v_1^2} \right] \quad (2.32)$$

Z zależności (2.21a) dla $i = 1, 2$ wynikają równania:

$$\begin{array}{cc} v_1^2 q_1 = -a(p_1 - q_1) & v_2^2 q_2 = -a(p_2 - q_2) \\ \text{lub} & \text{lub} \\ \frac{p_1 - q_1}{v_1^2 q_1} = -\frac{1}{a} & \frac{p_2 - q_2}{v_2^2 q_2} = -\frac{1}{a} \end{array} \quad (2.33)$$

Podstawiając zależności (2.33) do równania (2.32), otrzymamy:

$$\Theta_1 \left(\frac{p_2}{q_2} - \frac{p_1}{q_1} \right) = \left(\frac{Z_2}{q_2} - \frac{Z_1}{q_1} \right) \quad (2.34)$$

lub

$$\Theta_1 = \frac{\left(\frac{Z_2}{q_2} - \frac{Z_1}{q_1} \right)}{\left(\frac{p_2}{q_2} - \frac{p_1}{q_1} \right)} \quad (2.35)$$

Obliczając z zależności (2.23a) Θ_1 , uzyskano równanie:

$$\Theta_1 = \frac{1}{p_1} \left[Z_1 - q_1\Theta_2 - \frac{p_1 - q_1}{v_1^2} E^* \right], \quad (2.36a)$$

$$\Theta_1 = \frac{1}{p_2} \left[Z_2 - q_2 \Theta_2 - \frac{p_2 - q_2}{v_2^2} E^* \right] \quad (2.36b)$$

Porównując prawe strony zależności (2.36a) i (2.36b), otrzymamy:

$$\frac{Z_1}{p_1} - \frac{q_1}{p_1} \Theta_2 - \frac{p_1 - q_1}{p_1 v_1^2} E^* = \frac{Z_2}{p_2} - \frac{q_2}{p_2} \Theta_2 - \frac{p_2 - q_2}{p_2 v_2^2} E^* \quad (2.37)$$

lub

$$\Theta_2 \left[\frac{q_2}{p_2} - \frac{q_1}{p_1} \right] = \frac{Z_2}{p_2} - \frac{Z_1}{p_1} + E^* \left[-\frac{p_2 - q_2}{p_2 v_2^2} + \frac{p_1 - q_1}{p_1 v_1^2} \right] \quad (2.37a)$$

Z zależności (2.21a) dla $i = 1, 2$, mnożąc licznik i mianownik tych równań odpowiednio przez p_1 i p_2 , otrzymano:

$$\begin{aligned} \frac{p_1}{q_1} \cdot \frac{p_1 - q_1}{v_1^2 q_1} &= -\frac{1}{a} & \frac{p_2}{q_2} \cdot \frac{p_2 - q_2}{v_2^2 q_2} &= -\frac{1}{a} \\ \text{lub} & & \text{lub} & \\ \frac{p_1 - q_1}{v_1^2 q_1} &= -\frac{1}{a} \cdot \frac{q_1}{p_1} & \frac{p_2 - q_2}{v_2^2 q_2} &= -\frac{1}{a} \cdot \frac{q_2}{p_2} \end{aligned} \quad (2.38)$$

Rozpisując człon zależności (2.37a) związany z E^* , uzyskano:

$$\left[-\frac{p_2 - q_2}{p_2 v_2^2} + \frac{p_1 - q_1}{p_1 v_1^2} \right] = \frac{1}{a} \left[\frac{q_2}{p_2} - \frac{q_1}{p_1} \right] = \frac{1}{a} \left[\frac{b + v_2^2}{a} - \frac{b + v_1^2}{a} \right] = \frac{1}{a^2} (v_2^2 - v_1^2), \quad (2.39)$$

a podstawiając zależność (2.39) do zależności (2.38) i przekształcając względem Θ_2 , otrzymano:

$$\Theta_2 = \frac{\frac{Z_2}{p_2} - \frac{Z_1}{p_1} + \frac{E^*}{a^2} (v_2^2 - v_1^2)}{\frac{q_2}{p_2} - \frac{q_1}{p_1}} \quad (2.40)$$

Z zależności (2.39) wynika także, że:

$$\left[\frac{q_2}{p_2} - \frac{q_1}{p_1} \right] = \frac{1}{a} (v_2^2 - v_1^2) = R \quad (2.41)$$

Wprowadzając zależność (2.41) do zależności (2.40), otrzymano:

$$\Theta_2 = \frac{\frac{Z_2}{p_2} - \frac{Z_1}{p_1} + \frac{E^*}{a^2} (v_2^2 - v_1^2)}{\frac{1}{a} (v_2^2 - v_1^2)} \quad (2.42)$$

Postawiono pytanie: czemu się równa różnica ilorazów $\frac{p_2}{q_2} - \frac{p_1}{q_1}$? W tym celu wykorzystując

zależność (2.26) dla $i = 1, 2$, zapisano:

$$\left(\frac{p_2}{q_2}\right) = \frac{a - v_2^2}{a}, \quad \left(\frac{p_1}{q_1}\right) = \frac{a - v_1^2}{a}; \quad (2.43)$$

stąd różnica ilorazów

$$\frac{p_2}{q_2} - \frac{p_1}{q_1} = \frac{a - v_2^2}{a} - \frac{a - v_1^2}{a} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{a} = -\frac{v_2^2 - v_1^2}{a} \quad (2.44)$$

Podstawiając do zależności (2.42) i (2.35) zależność (2.43), otrzymano:

$$\Theta_2 = \frac{1}{R} \left(\frac{Z_2}{p_2} - \frac{Z_1}{p_1} + \frac{E^* R}{a} \right), \quad (2.45)$$

$$\Theta_1 = -\frac{1}{R} \left(\frac{Z_2}{q_2} - \frac{Z_1}{q_1} \right) \quad (2.46)$$

Uwzględniając, że $Z_i = C_i \exp(v_i^2 X)$ dla $i = 1, 2$, otrzymano:

$$\Theta_1 = \frac{C_1}{q_1} \frac{1}{R} \exp(v_1^2 X) - \frac{C_2}{q_2} \frac{1}{R} \exp(v_2^2 X), \quad (2.45a)$$

$$\Theta_2 = \frac{C_2}{q_2} \frac{1}{R} \frac{q_2}{p_2} \exp(v_2^2 X) - \frac{C_1}{q_1} \frac{1}{R} \frac{q_1}{p_1} \exp(v_1^2 X) + \frac{E^*}{a} \quad (2.46a)$$

Wprowadzając kolejne oznaczenia:

$$C_1^* = \frac{C_1}{R q_1}, \quad C_2^* = \frac{C_2}{R q_2}$$

i podstawiając do zależności (2.45a) i (2.46a), otrzymano:

$$\Theta_1 = C_1^* \exp(v_1^2 X) - C_2^* \exp(v_2^2 X), \quad (2.47)$$

$$\Theta_2 = C_2^* \frac{q_2}{p_2} \exp(v_2^2 X) - C_1^* \frac{q_1}{p_1} \exp(v_1^2 X) + \frac{E^*}{a} \quad (2.48)$$

Stałe C_1^* i C_2^* wyznaczono, wykorzystując niżej podane warunki brzegowe:

$$\text{jeżeli } X = 0 \text{ to } \Theta_1 = \Theta_1', \quad (2.49)$$

$$\text{jeżeli } X = 1 \text{ to } -\Theta_2' = \Theta_1'' \quad (2.50)$$

Z pierwszego warunku brzegowego (2.49) uzyskano:

$$\Theta_1' = C_1^* - C_2^*, \quad (2.51)$$

natomiast z drugiego warunku (2.50):

$$C_1^* \frac{q_1}{p_1} \exp(v_1^2) - C_2^* \frac{q_2}{p_2} \exp(v_2^2) - \frac{E^*}{a} = C_1^* \exp(v_1^2) - C_2^* \exp(v_2^2) \quad (2.52)$$

Przekształcając zależność (2.51), otrzymano stałą:

$$C_2^* = C_1^* - \Theta_1', \quad (2.53)$$

która podstawiona do równania (2.52) pozwala na uzyskanie zależności:

$$C_1^* \exp(v_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} - 1 \right] - \frac{E^*}{a} = [C_1^* - \Theta_1'] \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right] \quad (2.54)$$

lub

$$C_1^* \left\{ \exp(v_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} - 1 \right] - \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right] \right\} = \frac{E^*}{a} - \Theta_1' \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right] \quad (2.55)$$

lub

$$C_1^* = \frac{\frac{E^*}{a} - \Theta_1' \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right]}{\exp(v_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} - 1 \right] - \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right]} \quad (2.56)$$

Stała C_1^* podstawiona do zależności (2.53) pozwala na wyznaczenie stałej C_2^* :

$$C_2^* = \frac{\frac{E^*}{a} - \Theta_1' \exp(v_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} - 1 \right]}{\exp(v_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} - 1 \right] - \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right]} \quad (2.57)$$

Pole temperatur $\Theta_2'' = (T_2'' - T_{x=0})$ wyraża się wzorem:

$$\Theta_2'' = \frac{\frac{q_2}{p_2} \left\{ \frac{E^*}{a} - \Theta_1' \exp(v_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} - 1 \right] \right\} - \frac{q_1}{p_1} \left\{ \frac{E^*}{a} - \Theta_1' \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right] \right\}}{\exp(v_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} - 1 \right] - \exp(v_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} - 1 \right]} + \frac{E^*}{a}, \quad (2.58)$$

a przyrost temperatury czynnika można określić z zależności:

$$\Delta T = T_2'' - T_1' = T_{2 \text{ } x=0} - T_{1 \text{ } x=0} = (\Theta_1' + \Theta_2''), \quad (2.59)$$

zaś strumień odbieranego ciepła obliczono ze wzoru:

$$\dot{Q} = \dot{W} \Delta T = \dot{W} (\Theta_1' + \Theta_2'') = \dot{W} \Theta_1' \left(1 + \frac{\Theta_2''}{\Theta_1'} \right) \quad (2.60)$$

Na podstawie tej zależności opracowano wykresy uniwersalne (nomogramy), za pomocą któ-

rych mamy możliwość określić ilość pozyskiwanego strumienia ciepła \dot{Q} z wymiennika ciepła. Nomogramy (rys. 2.3, 2.3a oraz rys. Z1.1 – Z1.10, które zestawiono w załączniku Z1) opracowano dla przykładowych założonych wartości:

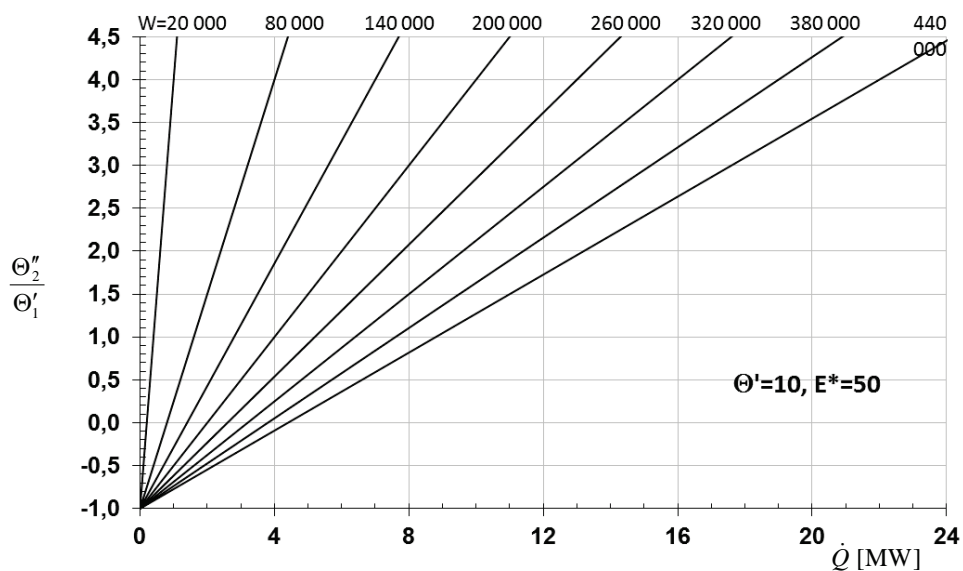
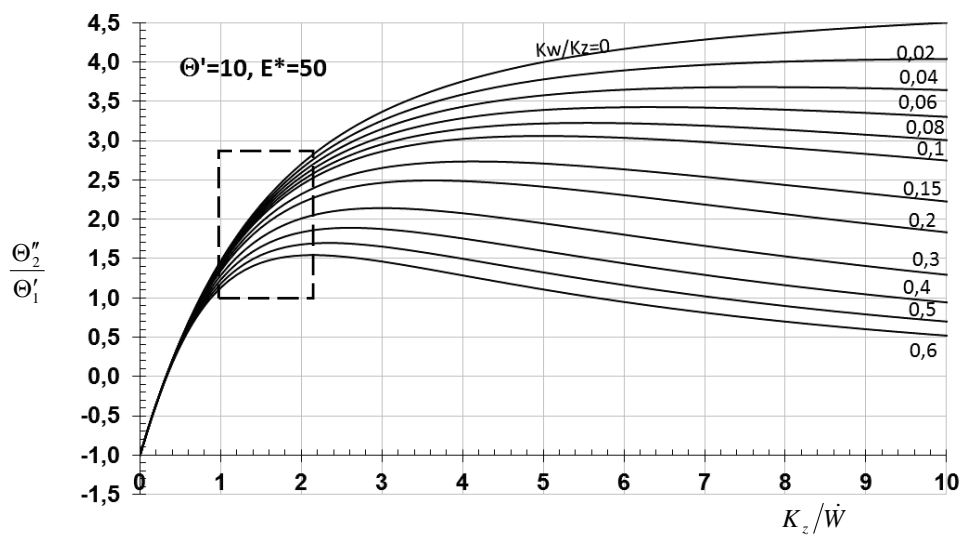
- różnic temperatur na wlocie do wymiennika $\Theta'_1 = -5; 1; 5; 10 \text{ K}$;
- parametru $E^* = 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170^\circ\text{C}$.

Z rysunków tych wynika, że istotny wpływ na Θ''_2/Θ'_1 ma stosunek K_w/K_z : jego mniejsze wartości odzwierciedlają lepszy stopień zaizolowania rury wewnętrznej kanału wymiennika, co skutkuje tym, że straty ciepła czynnika na drodze przenikania przez przegrodę między czynnikiem dopływającym do wymiennika, a czynnikiem wypływającym z wymiennika są minimalne. Dla mniejszych wartości K_w/K_z ze wzrostem K_z/\dot{W} rosną wartości Θ''_2/Θ'_1 , a przez to strumień pozyskiwanego ciepła \dot{Q} z wymiennika ciepła. Natomiast dla większych wartości K_w/K_z po przekroczeniu pewnej wielkości K_z/\dot{W} następuje spadek stosunku Θ''_2/Θ'_1 , a tym samym wartości pozyskiwanego strumienia ciepła \dot{Q} z wymiennika ciepła.

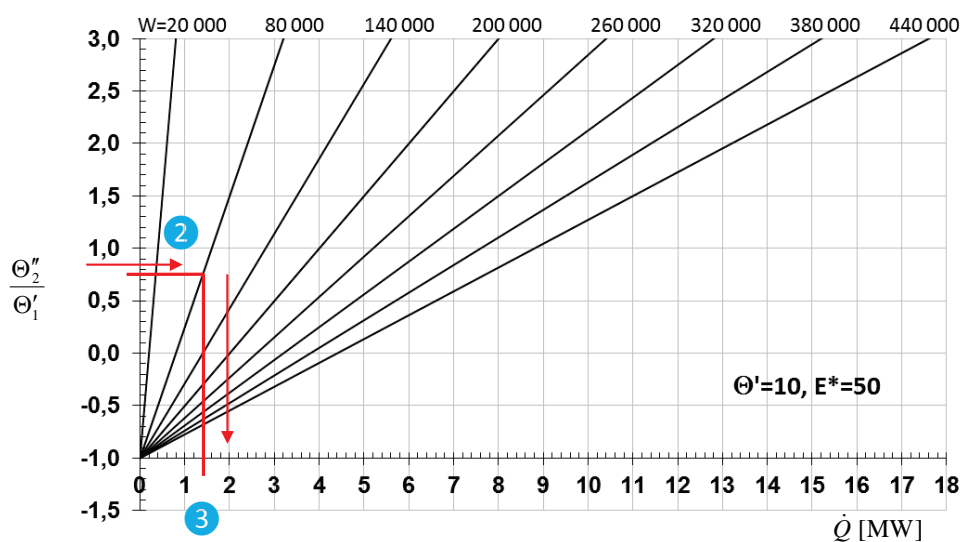
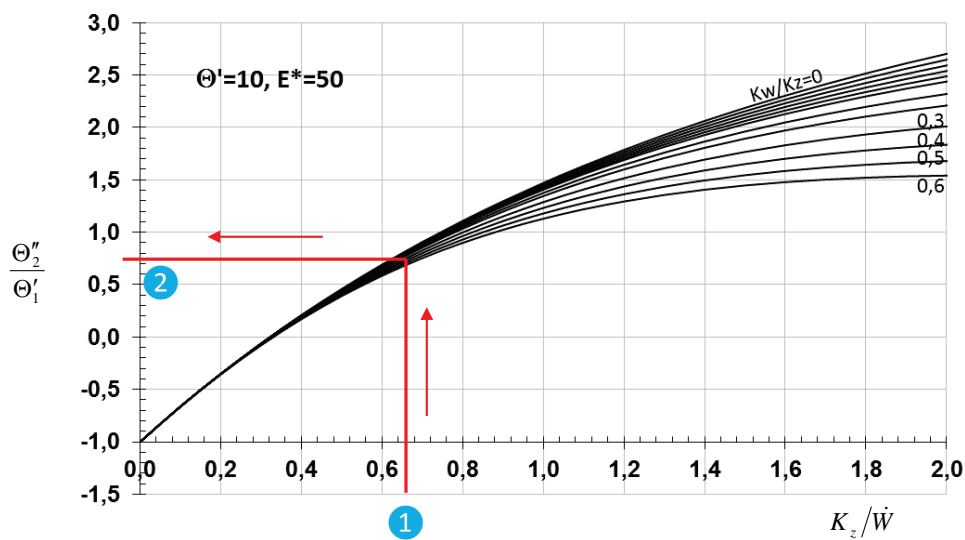
Na rys. 2.3a przedstawiono mechanizm określania strumienia pozyskiwanego ciepła z wymiennika: przy znanej wartości stosunku K_z/\dot{W} (wartość ❶) oraz K_w/K_z jesteśmy w stanie określić wartość stosunku Θ''_2/Θ'_1 (❷), a tym samym znając wartość strumienia pojemności cieplnej płynu \dot{W} krążącym w wymienniku, określić wartość pozyskiwanego ciepła (❸).

Należy zwrócić uwagę na fakt, że na nomogramach przedstawiono obszary wielkości K_w/K_z , K_z/\dot{W} , Θ''_2/Θ'_1 , a tym samym \dot{Q} , które w praktyce mogą się nie zrealizować, gdyż są one ściśle powiązane.

Na rys. Z1.3 zaznaczono poszczególne fragmentaryczne cztery obszary, które rozwinięto na kolejnych rysunkach (nomogramy rys. Z1.4 – Z1.7).



Rys. 2.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K, $E^* = 50^\circ\text{C}$



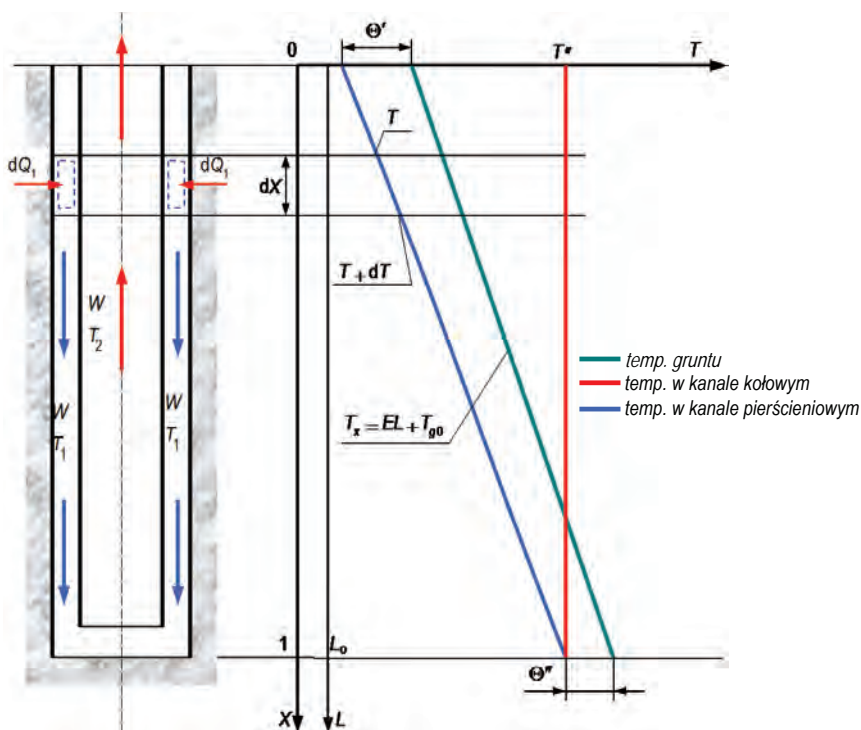
Rys. 2.3a. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K, $E^* = 50^\circ\text{C}$

W szczególnym przypadku, jeżeli rura wewnętrzna jest doskonale zaizolowana (rys. 2.4), przyrost temperatury nośnika energii określa zależność:

$$\Delta T_{x=0} = \left(\Theta' - \frac{E^*}{k_{z1}^*} \right) [1 - \exp(-k_{z1}^*)] + E^*, \quad (2.61)$$

gdzie: $k_{z1}^* = \frac{k_z \pi D_z L_0}{\dot{W}} = \frac{K_z}{\dot{W}}$, a mając różnicę temperatur czynnika zatłaczanego i wypływającego z wymiennika ciepła, możemy obliczyć strumień odbieranego ciepła przez czynnik od złoża ze wzoru:

$$\dot{Q} = \dot{W} \Delta T_{(x=0)} \quad (2.62)$$



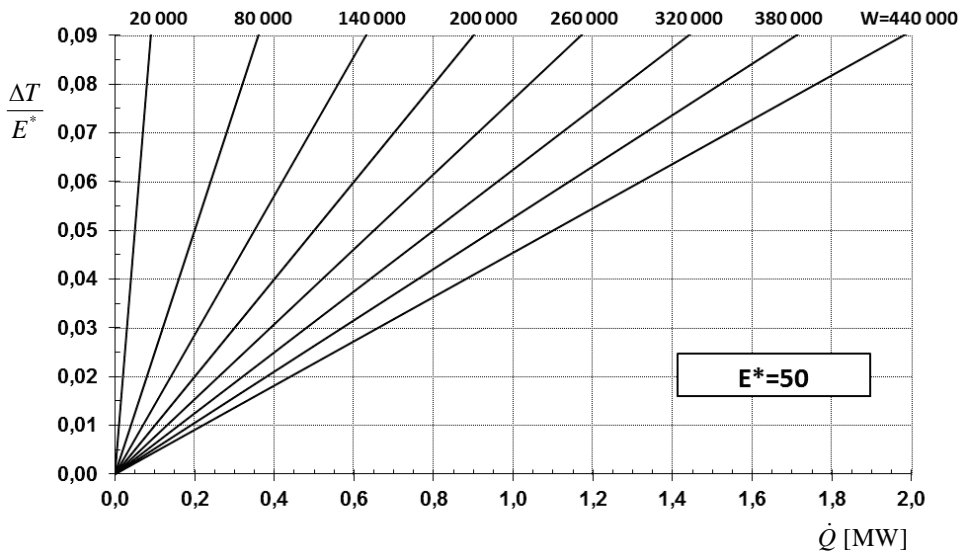
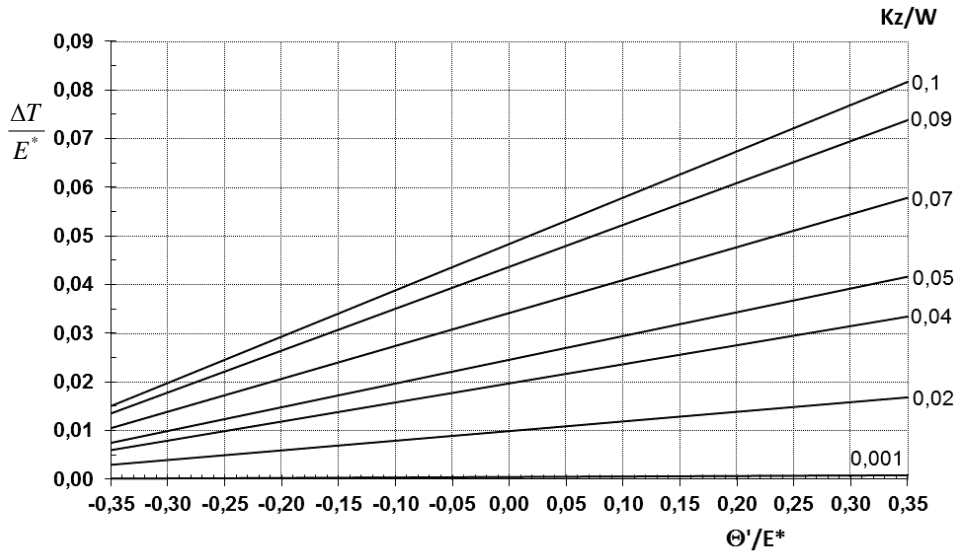
Rys. 2.4. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy doskonale zaizolowanej rurze wewnętrznej

Zależność (2.61) możemy przekształcić do postaci:

$$\frac{\Delta T}{E^*} = \left(\frac{\Theta'}{E^*} - \frac{1}{k_{z1}^*} \right) (1 - e^{-k_{z1}^*}) + 1, \quad (2.61a)$$

stąd strumień odbieranego ciepła przez czynnik od złoża obliczymy z zależności:

$$\dot{Q} = \dot{W} E^* \left(\frac{\Delta T}{E^*} \right) \quad (2.62a)$$



Rys. 2.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 50^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika)

Na tej podstawie opracowano wykresy uniwersalne pozyskiwanego strumienia ciepła \dot{Q} .

W porównaniu do modeli nieadiaterymicznych [87–89], rozpatrywanie modelu z adiaterymiczną rurą wewnętrzną daje maksymalne wartości pozyskiwanego strumienia ciepłego oraz wyższe temperatury wody sieciowej na wypływie z wymiennika geotermalnego.

Dokonano obliczeń dla przyjętych wartości wielkości charakterystycznych Θ'/E^* , \dot{W} , K_z/\dot{W} , określając tym samym wartość stosunku Θ'/E^* i \dot{Q} – wyniki obliczeń przedstawiono w formie nomogramów (rys. 2.5 oraz rys. Z2.1 – Z2.11 zestawione w załączniku Z2).

2.2. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody większą od temperatury złoża na powierzchni ziemi

Przy wyprowadzaniu modelu matematycznego opisującego wymianę ciepła w pionowym geotermalnym wymienniku ciepła typu Field (gdy temperatura zatłaczanej wody jest większa od temperatury złoża na powierzchni ziemi – rys. 2.6; jest to przypadek typowy, najczęściej spotykany w pracy instalacji geotermalnych, i wynika z faktu, że po schłodzeniu wody u odbiorców jej temperatura jest wyższa od temperatury przypowierzchniowych warstw gruntu) postępujemy podobnie, jak w opisanym wcześniej przypadku (patrz pkt 2.1) [84, 101–104].

Na podstawie równań bilansu wymiennika dla czynnika płynącego w kanale pierścieniowym oraz w kanale wewnętrznym, po uwzględnieniu równań wymiany ciepła i po wprowadzeniu

oznaczeń: $T_x = EL_o \frac{L}{L_o} + T_{g0} = E^* X + T_{g0}$, $K_w = k_w \pi D_2 L_o$, $K_z = k_z \pi D_1 L_o$, $\Theta_1 = T_1 - T_x$,

$a = K_w/\dot{W}$, $b = (K_w + K_z)/\dot{W}$, $\dot{W} = \dot{m}c_p$, otrzymano następujący układ równań różniczkowych rzędu pierwszego:

$$\frac{d\Theta_1}{dX} = -b\Theta_1 - a\Theta_2 + E^*, \quad (2.63)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dX} = a\Theta_1 + a\Theta_2 - E^* \quad (2.64)$$

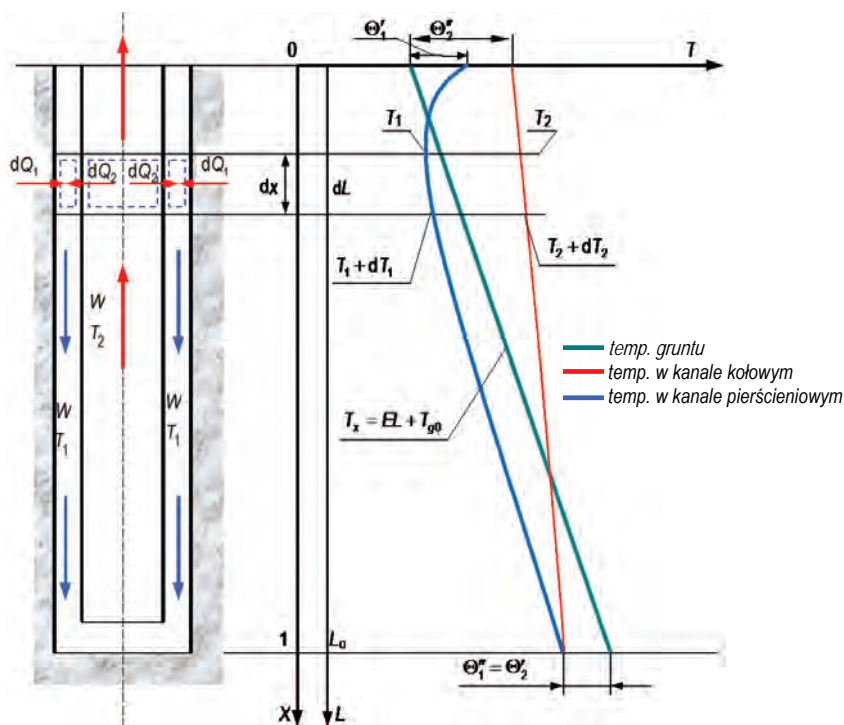
Rozwiązanie tego układu równań po zastosowaniu metody d’Alamberta przyjmuje postać:

$$\Theta_1 = -C_2^* \exp(\nu_2^2 X) + C_1^* \exp(\nu_1^2 X), \quad (2.65)$$

$$\Theta_2 = C_2^* \frac{q_2}{p_2} \exp(v_2^2 X) - C_1^* \frac{q_1}{p_1} \exp(v_1^2 X) + \frac{E^*}{a}, \quad (2.66)$$

gdzie:

$$v_i^2 = 0,5(K_z/\dot{W}) \left[-1 \pm \sqrt{1 + 4(K_w/K_z)} \right], (q_i/p_i) = -(v_i^2 + b)/a \text{ dla } i=1, 2.$$



Rys. 2.6. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy zmiennej temperaturze gruntu (temperatura zatlaczania jest większa od temperatury gruntu)

Dla jednoznacznego opisu pola temperatury w wymienniku należy wyznaczyć dwie stałe całkowania występujące w zależności (2.65) i (2.66), wykorzystując podane warunki brzegowe:

$$\text{jezeli } X = 0 \text{ to } \Theta_1 = \Theta'_1, \quad (2.67)$$

$$\text{jezeli } X=1 \text{ to } \Theta'_j = \Theta''_j \quad (2.68)$$

Z pierwszego warunku brzegowego (2.67) uzyskano:

$$\Theta'_1 = C_1^* - C_2^*, \quad (2.69)$$

natomiast z drugiego warunku (2.68):

$$C_2^* \frac{q_2}{p_2} \exp(\nu_2^2) - C_1^* \frac{q_1}{p_1} \exp(\nu_1^2) + \frac{E^*}{a} = C_1^* \exp(\nu_1^2) - C_2^* \exp(\nu_2^2) \quad (2.70)$$

Przekształcając zależność (2.69), otrzymano stałą:

$$C_1^* = \Theta_1' + C_2^*, \quad (2.71)$$

która podstawiona do równania (2.70) pozwala na uzyskanie zależności:

$$C_2^* \exp(\nu_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - (\Theta_1' + C_2^*) \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right] = -\frac{E^*}{a} \quad (2.72)$$

lub

$$C_2^* \left\{ \exp(\nu_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right] \right\} = \Theta_1' \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right] - \frac{E^*}{a} \quad (2.73)$$

lub

$$C_2^* = \frac{\Theta_1' \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right] - \frac{E^*}{a}}{\exp(\nu_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right]} \quad (2.74)$$

Stała C_2^* podstawiona do zależności (2.71) pozwala na wyznaczenie stałej C_1^* :

$$C_1^* = \frac{\Theta_1' \exp(\nu_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \frac{E^*}{a}}{\exp(\nu_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right]}. \quad (2.75)$$

Pole temperatur $\Theta_2'' = (T_2'' - T_{x=0})$ wyraża się wzorem:

$$\begin{aligned} \Theta_2'' &= C_2^* \frac{q_2}{p_2} - C_1^* \frac{q_1}{p_1} + \frac{E^*}{a} = \\ &= \frac{\frac{q_2}{p_2} \left\{ \Theta_1' \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right] - \frac{E^*}{a} \right\} - \frac{q_1}{p_1} \left\{ \Theta_1' \exp(\nu_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \frac{E^*}{a} \right\}}{\exp(\nu_2^2) \left[\frac{q_2}{p_2} + 1 \right] - \exp(\nu_1^2) \left[\frac{q_1}{p_1} + 1 \right]} + \frac{E^*}{a}, \end{aligned} \quad (2.76)$$

a przyrost temperatury czynnika można określić z zależności:

$$\Delta T = T_2'' - T_1' = T_{2 \text{ } x=0} - T_{1 \text{ } x=0} = (\Theta_2'' - \Theta_1'), \quad (2.77)$$

zaś strumień odbieranego ciepła obliczono ze wzoru:

$$\dot{Q} = \dot{W} \Delta T = \dot{W} (\Theta_2'' - \Theta_1') = \dot{W} \Theta_1' \left(\frac{\Theta_2''}{\Theta_1'} - 1 \right) \quad (2.78)$$

Na podstawie tej zależności opracowano wykresy uniwersalne (nomogramy), za pomocą których możemy określić ilość pozyskiwanego strumienia ciepła \dot{Q} z wymiennika ciepła. Nomogramy (rys. 2.7 oraz rysunki zestawione w załączniku Z3: rys. Z3.1 – Z3.9) opracowano dla przykładowych założonych wartości:

- różnic temperatur na wlocie do wymiennika $\Theta_1' = 5; 10 \text{ K}$;
- parametru $E^* = 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170^\circ\text{C}$.

Możemy zauważyć, że ze wzrostem stosunku K_z/\dot{W} i ze zmniejszeniem wartości K_w/K_z rośnie wartość stosunku różnic temperatur wyjście/wejście do wymiennika ciepła Θ''/Θ' , a tym samym pozyskanie strumienia ciepłego jest większe (rys. 2.7, rys. Z3.1 – Z3.2).

Z kolejnych wykresów (rys. Z3.3 – Z3.9) wnioskujemy, że wpływ na pozyskiwany strumień ciepła z wymiennika ma parametr E^* , który odpowiada za profil temperaturowy wzdłuż wymiennika oraz jego długość (głębokość otworu wiertniczego). Należy zauważyć, że ze wzrostem stosunku K_z/\dot{W} i K_w/K_z osiągane jest ekstremum wartości K_z/\dot{W} , przy którym pozyskujemy maksymalną wartość strumienia ciepła \dot{Q} z wymiennika (przy danej wartości E^*).

W szczególnym przypadku, jeżeli rura wewnętrzna jest doskonale zaizolowana [123–125] (rys. 2.8), przyrost temperatury nośnika energii określa zależność:

$$\Delta T_{x=0} = -\Theta' [1 + \exp(-k_{z1}^*)] + \frac{E^*}{k_{z1}^*} [1 - \exp(-k_{z1}^*)] + E^*, \quad (2.79)$$

gdzie: $k_{z1}^* = \frac{k_z \pi D_z L_0}{\dot{W}} = \frac{K_z}{\dot{W}}$, a mając różnicę temperatur czynnika zatłaczanego i wypływającego, możemy obliczyć strumień odbieranego ciepła przez czynnik od złoża ze wzoru:

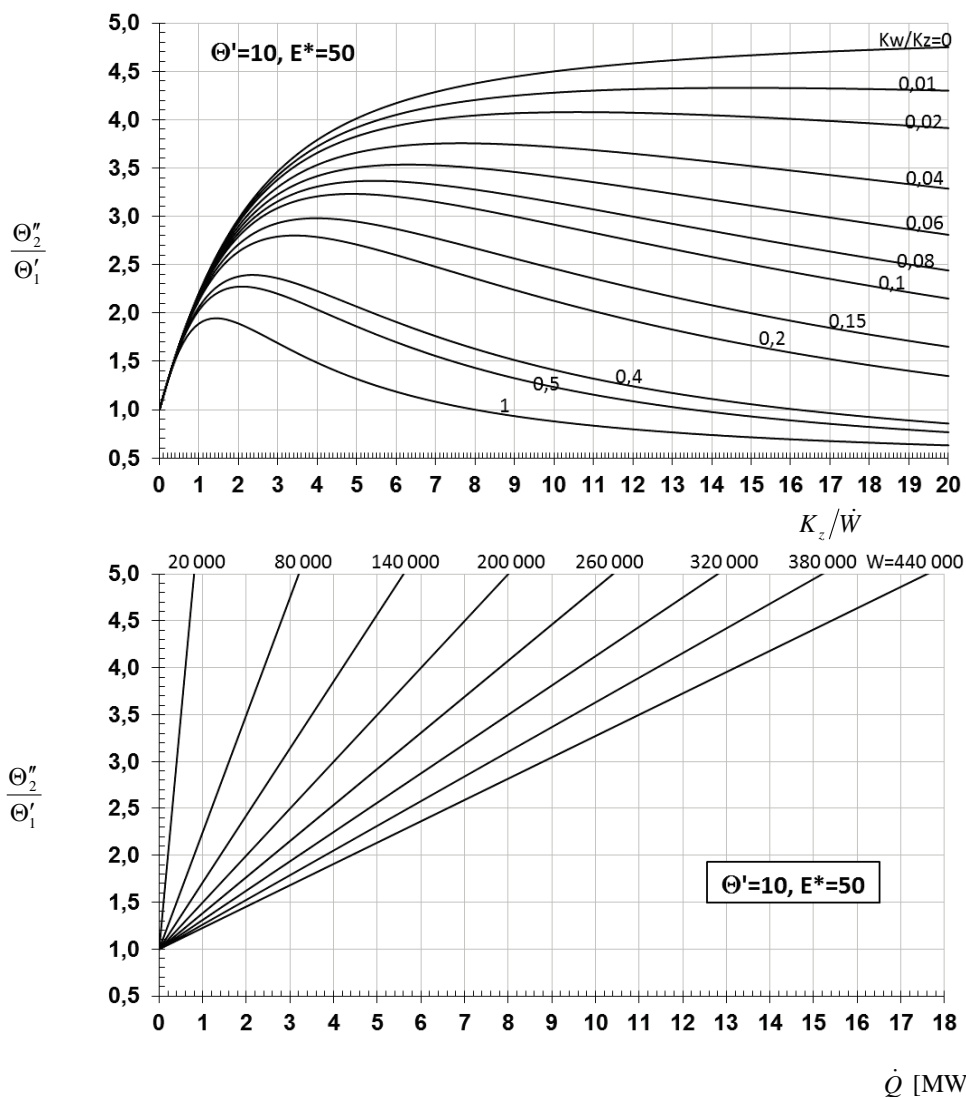
$$\dot{Q} = \dot{W} \Delta T_{(x=0)} \quad (2.80)$$

Zależność (2.79) możemy przekształcić do postaci:

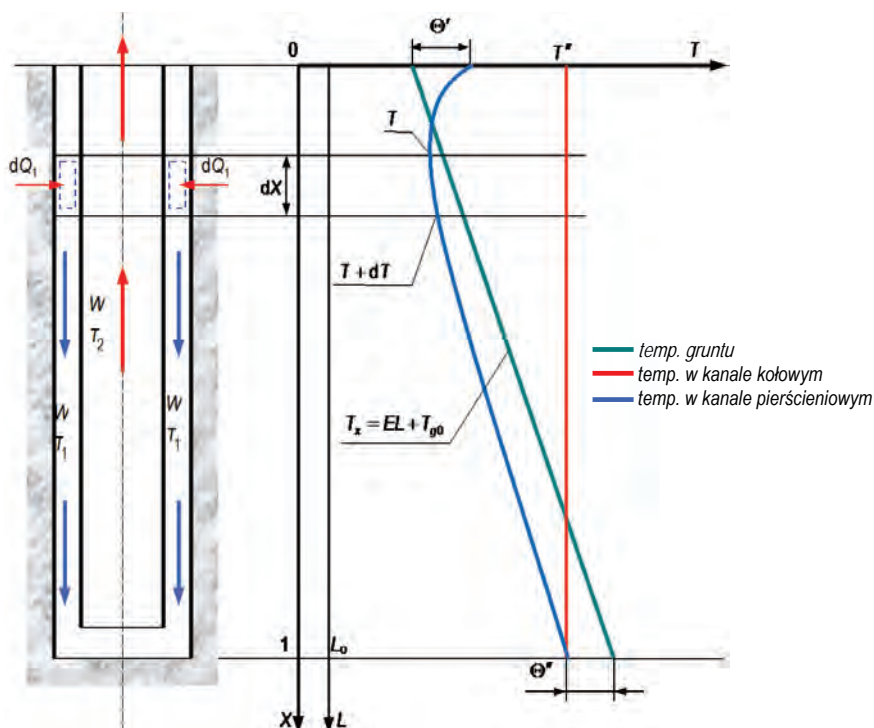
$$\frac{\Delta T}{E^*} = -\frac{\Theta'}{E^*} (1 + e^{-k_{z1}^*}) + \frac{1}{k_{z1}^*} (1 - e^{-k_{z1}^*}) + 1, \quad (2.79a)$$

stąd strumień odbieranego ciepła przez czynnik od złoża obliczymy z zależności:

$$\dot{Q} = \dot{W} E^* \left(\frac{\Delta T}{E^*} \right) \quad (2.80a)$$



Rys. 2.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K, $E^* = 50^\circ\text{C}$



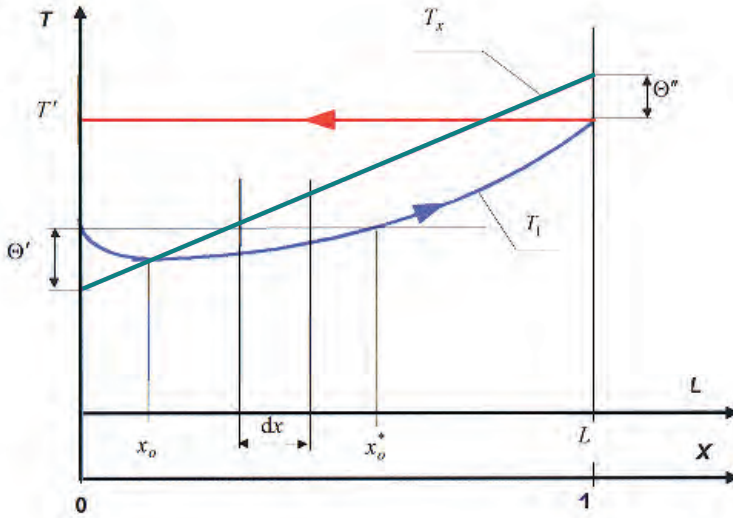
Rys. 2.8. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy doskonale zaizolowanej rurze wewnętrznej (temperatura na zatłaczaniu jest większa od temperatury gruntu)

Na tej podstawie opracowano wykresy uniwersalne pozyskiwanego strumienia ciepła \dot{Q} , które są identyczne jak w przypadku wariantu z temperaturą zatłaczania mniejszą od temperatury gruntu (nie przedstawiono ich w pracy).

Należy zauważyć (rys. 2.8), że jeżeli temperatura wody zatłaczanej do wymiennika jest większa od temperatury na powierzchni ziemi, woda w pierwszej fazie przepływu przez wymiennik oddaje ciepło do gruntu, ulegając schłodzeniu (efekt negatywny z punktu widzenia stosowania takiego wymiennika). Dopiero po przekroczeniu pewnego punktu (wtedy, gdy temperatura wody jest równa temperaturze gruntu na pewnej głębokości otworu – długości wymiennika) następuje odwrócenie procesu – woda pozyskuje ciepło z gruntu.

Na podstawie równań bilansu energii dla elementarnej części wymiennika o długości dx (rys. 2.9) z uwzględnieniem równań wymiany ciepła napisano równanie opisujące pole temperatury czynnika:

$$\dot{m}c_p T = k_z (T - T_x) dA + \dot{m}c_p \left(T + \frac{dT}{dA} dA \right). \quad (2.81)$$



Rys. 2.9. Profile temperaturowe w wymienniku typu Field z zaznaczeniem punktu x_o , przy którym temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu oraz punktu x_o^* , przy którym temperatura czynnika osiąga tę samą wartość, co przy $x = 0$

Po szeregu przekształceń i wprowadzeniu dodatkowych oznaczeń równanie (2.81) przyjmie postać:

$$\frac{dT}{dx} = -k_{z1}^* (T - T_x) \quad (2.82)$$

Wykorzystując równanie $\Theta = T + T_x$ opisujące różnicę temperatur między czynnikiem a złożem oraz zmianę temperatury $T_x = E^* x + F$, a jednocześnie różniczkując pierwszą zależność względem x , otrzymamy:

$$\frac{d\Theta}{dx} = \frac{d\Theta}{dx} + E^* \quad (2.83)$$

Wykorzystując w równaniu (2.83) zależność (2.82), dochodzimy do równania różniczkowego I rzędu:

$$\frac{d\Theta}{dx} + k_{z1}^* \Theta + E^* = 0, \quad (2.84)$$

którego rozwiązanie określa zależność:

$$\Theta = -\frac{E^*}{k_{z1}^*} + Ce^{-k_{z1}^*x} \quad (2.85)$$

Wykorzystując warunek brzegowy $\Theta = \Theta'$ dla $x = 0$, otrzymano stałą

$$C = \Theta' + \frac{E^*}{k_{z1}^*} \quad (2.86)$$

Podstawiając równanie (2.86) do zależności (2.85), otrzymamy:

$$\Theta = -\frac{E^*}{k_{z1}^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_{z1}^*} \right) e^{-k_{z1}^*x} \quad (2.87)$$

Temperaturę wody na powierzchni ziemi oblicza się z powyższego równania. Dla $x=1$ różnica temperatur $\Theta = \Theta''$, stąd równanie (2.87) przyjmie postać:

$$\Theta'' = -\frac{E^*}{k_{z1}^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_{z1}^*} \right) e^{-k_{z1}^*} \quad (2.88)$$

lub

$$T'' = E^* + F - \frac{E^*}{k_{z1}^*} + \left(\Theta' + \frac{E^*}{k_{z1}^*} \right) e^{-k_{z1}^*} \quad (2.89)$$

Za pomocą prostych przekształceń matematycznych zależności opisującej pole temperatury czynnika w wymienniku mamy możliwe jest podanie zależności na określenie (rys. 2.9):

- odległości x_o , przy której temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu:

$$x_o = \ln \left[\frac{(\Theta'/E^*)}{(1/k_{z1}^*)} + 1 \right]^{(1/k_{z1}^*)}, \quad (2.91)$$

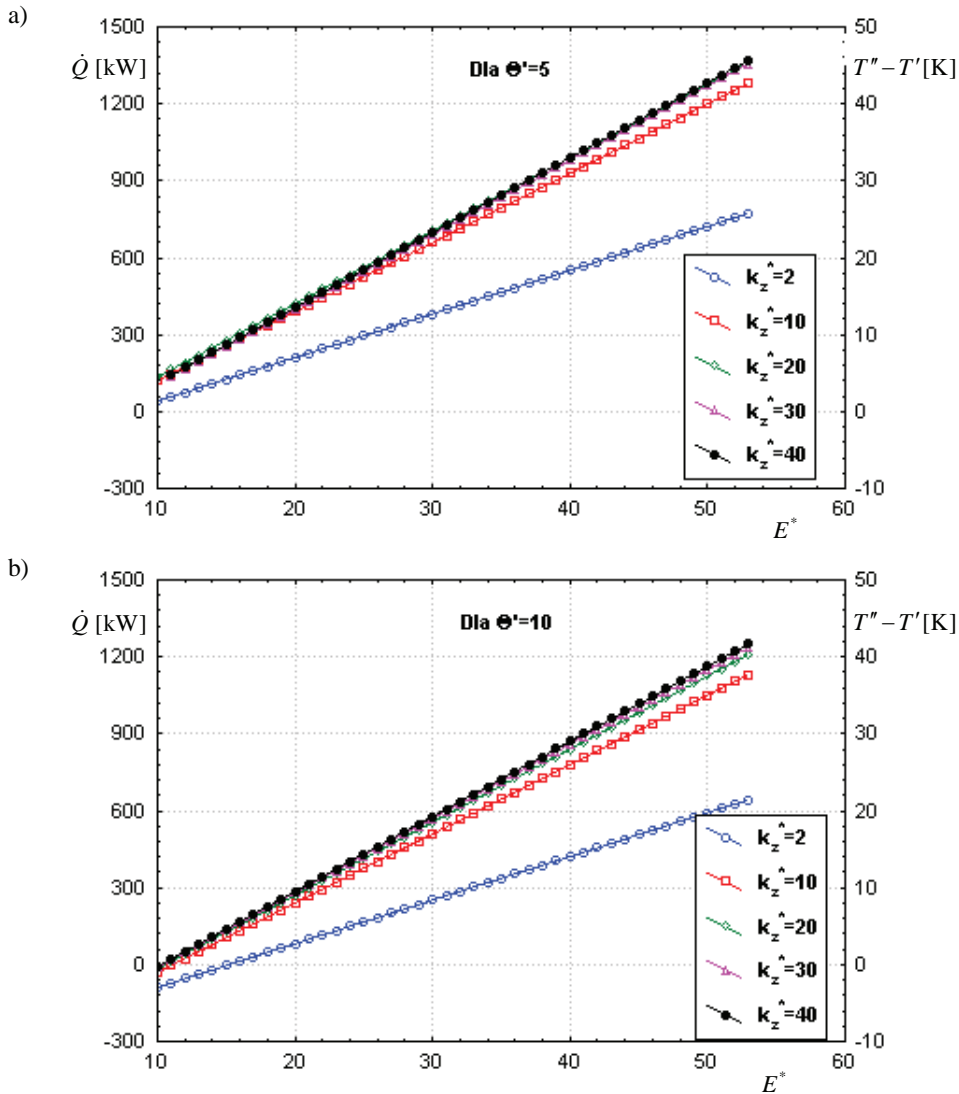
- odległości x_o^* , przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość, co przy $x = 0$

$$x_o^* = \left(\frac{\Theta'}{E^*} + \frac{1}{k_{z1}^*} \right) \left(1 - e^{-k_{z1}^*x_o^*} \right) \quad (2.91)$$

Jak daje się zauważyć, ostatnia z zależności (2.91) możliwa jest do rozwiązania metodą kolejnych przybliżeń (jest funkcją uwikłaną).

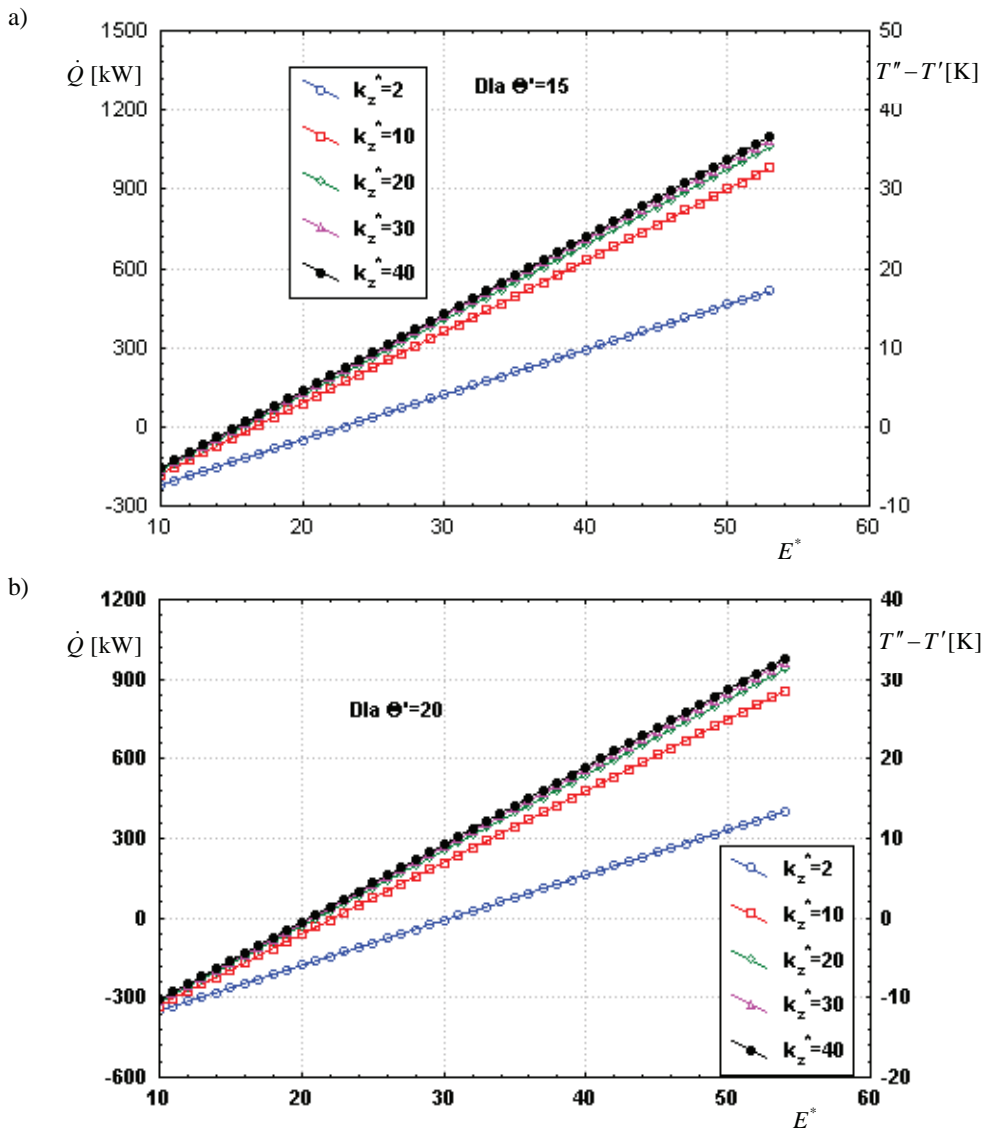
Dla wybranych wartości charakterystycznych wymiennika typu Field dokonano obliczeń interesujących nas wielkości, a wyniki zaprezentowano na rys. 2.10 – 2.14. Z przedstawionych na rys. 2.10 i 2.11 wykresów uzyskujemy informację, jak zmienia się strumień wydobywanego ciepła geotermalnego wraz ze zmianą parametru E^* (parametr odpowiedzialny za wartość temperatury złoża na głębokości $x = 0$), k_z^* oraz Θ' . Wraz ze wzrostem Θ' strumień wydoby-

bywanego ciepła maleje, natomiast rośnie wraz ze zwiększaniem się parametru k_z^* . Przy Θ' równym 10, 15 i 20 K dla pewnego obszaru wartości E^* i k_{z1}^* strumień wydobywanego ciepła ma wartości ujemne, co oznacza, że czynnik na wyjściu z wymiennika geotermalnego ma temperaturę niższą od temperatury zatłaczanej wody; zamiast pozyskiwać energię z gruntu doprowadzamy ją do ziemi.

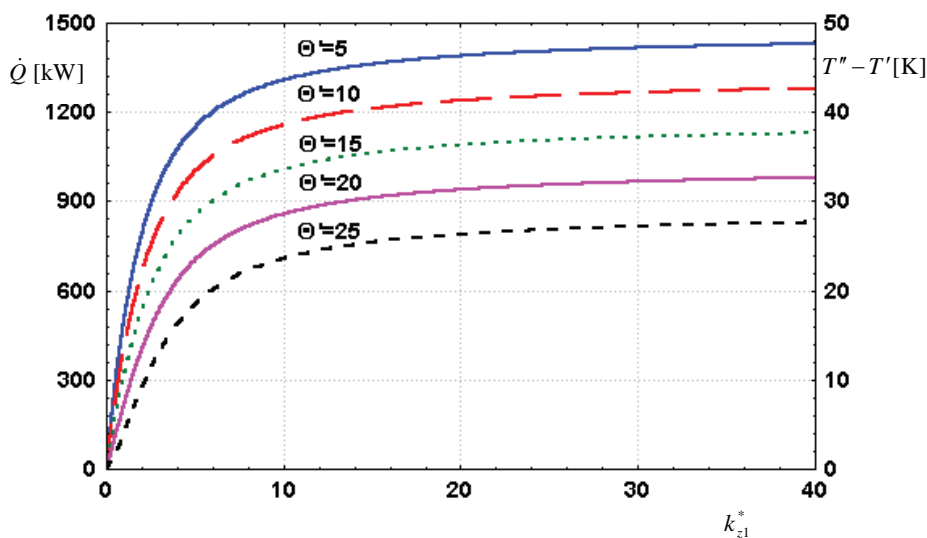


Rys. 2.10. Wpływ parametru E^* na wydajność cieplną geotermalnego wymiennika ciepła typu Field (dla $\dot{W} = 30\,000\text{ W/K}$) dla różnic temperatur $\Theta'_1 = 5\text{ K}$ oraz $\Theta'_1 = 10\text{ K}$

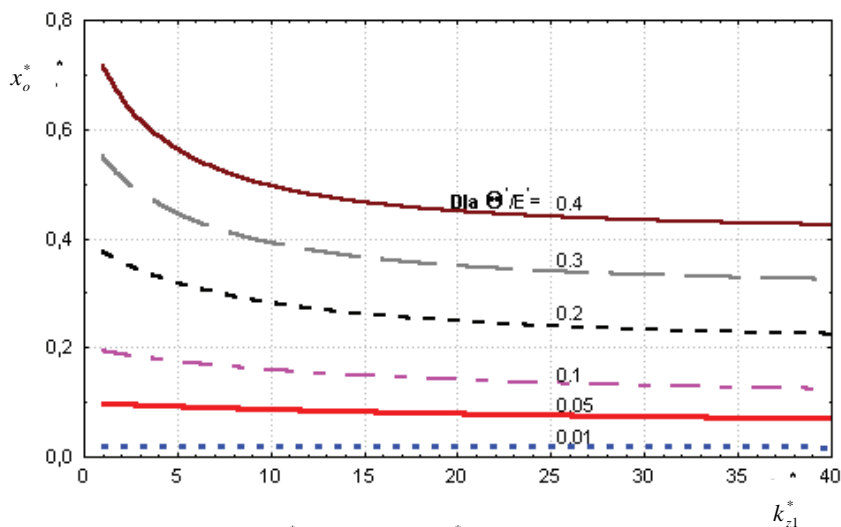
Na rys. 2.12 przedstawiono, jak zmienia się ilość pobieranego ciepła i różnica temperatur czynnika w funkcji k_{z1}^* dla wybranych wartości Θ' (przy $E^* = 54^\circ\text{C}$ i $\dot{W} = 30000 \text{ W/K}$).



Rys. 2.11. Wpływ parametru E^* na wydajność cieplną geotermalnego wymiennika ciepła typu Field (dla $\dot{W} = 30000 \text{ W/K}$) dla różnic temperatur $\Theta'_1 = 15 \text{ K}$ oraz $\Theta'_1 = 20 \text{ K}$



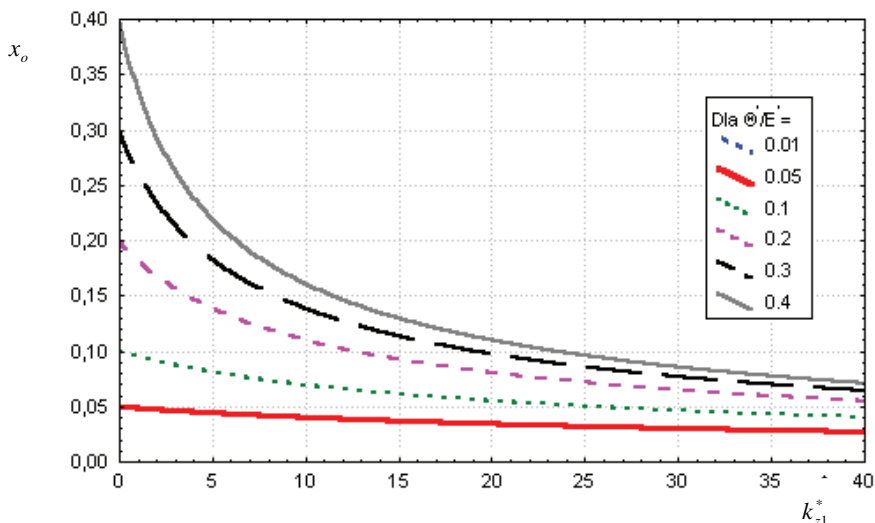
Rys. 2.12. Wpływ parametru k_{z1}^* na wydajność cieplną geotermalnego wymiennika ciepła typu Field dla wybranych wartości Θ' ($\dot{W} = 30\,000\text{ W/K}$, $E^* = 54^\circ\text{C}$)



Rys. 2.13. Wpływ parametru k_{z1}^* na odległość x_o^* , przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość co przy $x = 0$

Zauważa się, że przy stałej wartości Θ' wzrost k_{z1}^* powyżej wartości 20 nie powoduje zmiany strumienia pobieranego ciepła. Ocenę strumienia pozyskiwanego ciepła (temperatury wo-

dy na wyjściu z wymiennika) jesteśmy w stanie przeprowadzić po przeanalizowaniu: zmienności odległości x_o^* , przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość co przy $x = 0$ (rys. 2.13) i odległości x_o , przy której temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu (rys. 2.14). Im mniejsza jest wartość x_o^* i x_o , tym dłuższa jest droga $(1 - x_o^*)$ odbioru ciepła zatłaczanej wody od gruntu. Dla stałej wartości k_{z1}^* wzrost stosunku Θ'/E^* wpływa niekorzystnie na osiągi cieplne wymiennika geotermalnego [87, 112–115].

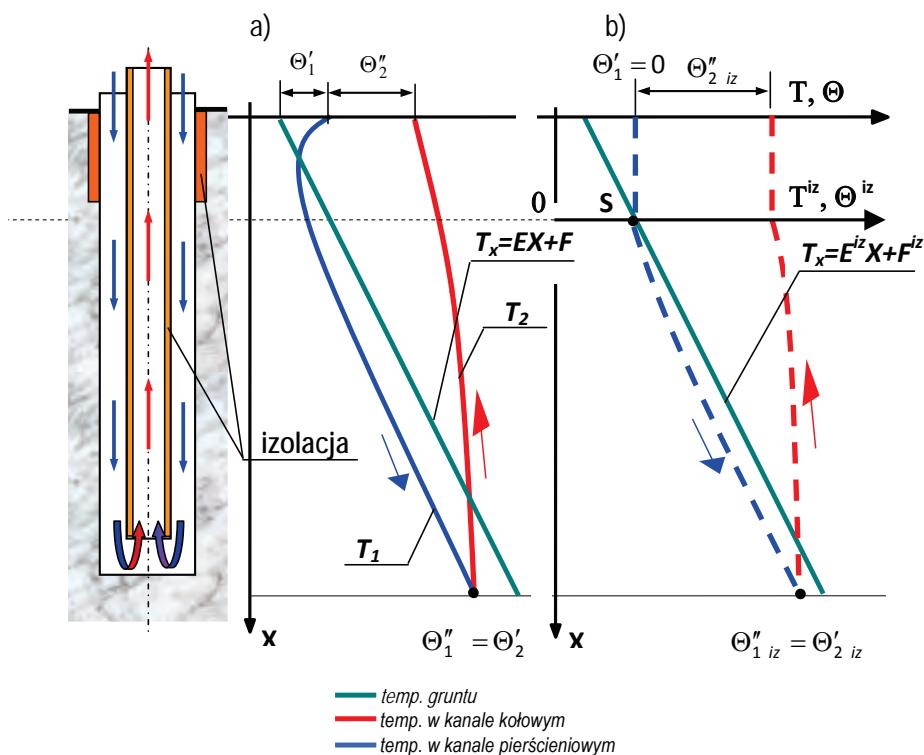


Rys. 2.14. Wpływ parametru k_{z1}^* na odległość x_o , przy której temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu (do osiągnięcia wartości x_o zatłaczany czynnik oddaje ciepło do gruntu; po przekroczeniu punktu x_o następuje pobieranie ciepła z gruntu)

Aby wyeliminować ten negatywny efekt, można zaizolować rurę zewnętrzną wymiennika na takiej długości, aby na końcu izolacji temperatura zatłaczanej wody była minimum identyczna jak temperatura górotworu (rys. 2.15 – punkt S) lub niższa. Rozwiązanie układu równań wymiany ciepła prowadzimy w nowym układzie odniesienia $(\Theta^{iz}, T^{iz}) - 0 - X$, co skutkuje tym, że musimy operować nowym równaniem określającym zmianę temperatury gruntu w tym układzie, a jednocześnie musimy zmniejszyć długość czynną wymiennika o długość zastosowanej izolacji: $\dot{W} = \dot{m}c_p$, $K_w = k_w \pi D_2 (L_0 - L_{iz})$, $K_z = k_z \pi D_1 (L_0 - L_{iz})$, $a_{iz} = K_w / \dot{W}$, $b_{iz} = (K_w + K_z) / \dot{W}$, $T_x = E^{iz} X + F$, $\Theta_1 = T_1 - T_x$, $\nu_{iz}^2 = 0,5 (K_z / \dot{W}) \cdot \left[-1 \pm \sqrt{1 + 4(K_w / K_z)} \right]$,

$(q_{iiz}/p_{iiz}) = -(v_{iiz}^2 + b_{iiz})/a_{iiz}$ dla $i=1, 2$. Gdy na końcu izolacji temperatura czynnika zatłaczającego jest równa temperaturze górotworu, wystąpi szczególny przypadek określenia stałych całkowania układu równań określonego zależnościami (2.65) i (2.66), gdyż pierwszy warunek brzegowy – zależność (2.67) – przyjmie postać:

$$\Theta_1(X=0) = \Theta'_1 = 0 \quad (2.92)$$



Rys. 2.15. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła: a) wariant bez izolacji, b) wariant z izolacją ($\Theta'_{2\text{ ins}} > \Theta'_2$, $\Theta''_{2\text{ ins}} > \Theta''_2$, $\Theta'_{1\text{ ins}} = 0$)

Spowoduje to, że stałe całkowania będą sobie równe:

$$C_1^* = C_2^* = C = \frac{\frac{E^{iz}}{a_{iz}}}{\exp(v_{1iz}^2) \left[\frac{q_{1iz}}{p_{1iz}} + 1 \right] - \exp(v_{2iz}^2) \left[\frac{q_{2iz}}{p_{2iz}} + 1 \right]} \quad (2.93)$$

Pole temperatur $\Theta_2'' = (T_2'' - T_{X=0})$, a jednocześnie przyrost temperatury czynnika można określić z zależności:

$$\begin{aligned}\Theta_2'' = \Delta T &= C \frac{q_{2iz}}{p_{2iz}} - C \frac{q_{1iz}}{p_{1iz}} + \frac{E^{iz}}{a_{iz}} = \\ &= \frac{\frac{E^{iz}}{a_{iz}} \left(\frac{q_{2iz}}{p_{2iz}} - \frac{q_{1iz}}{p_{1iz}} \right)}{\exp(v_{1iz}^2) \left[\frac{q_{1iz}}{p_{1iz}} + 1 \right] - \exp(v_{2iz}^2) \left[\frac{q_{2iz}}{p_{2iz}} + 1 \right]} + \frac{E^{iz}}{a_{iz}},\end{aligned}\quad (2.94)$$

zaś strumień odbieranego ciepła – ze wzoru:

$$\dot{Q} = \dot{W} \Delta T = \dot{W} \Theta_2'' \quad (2.95)$$

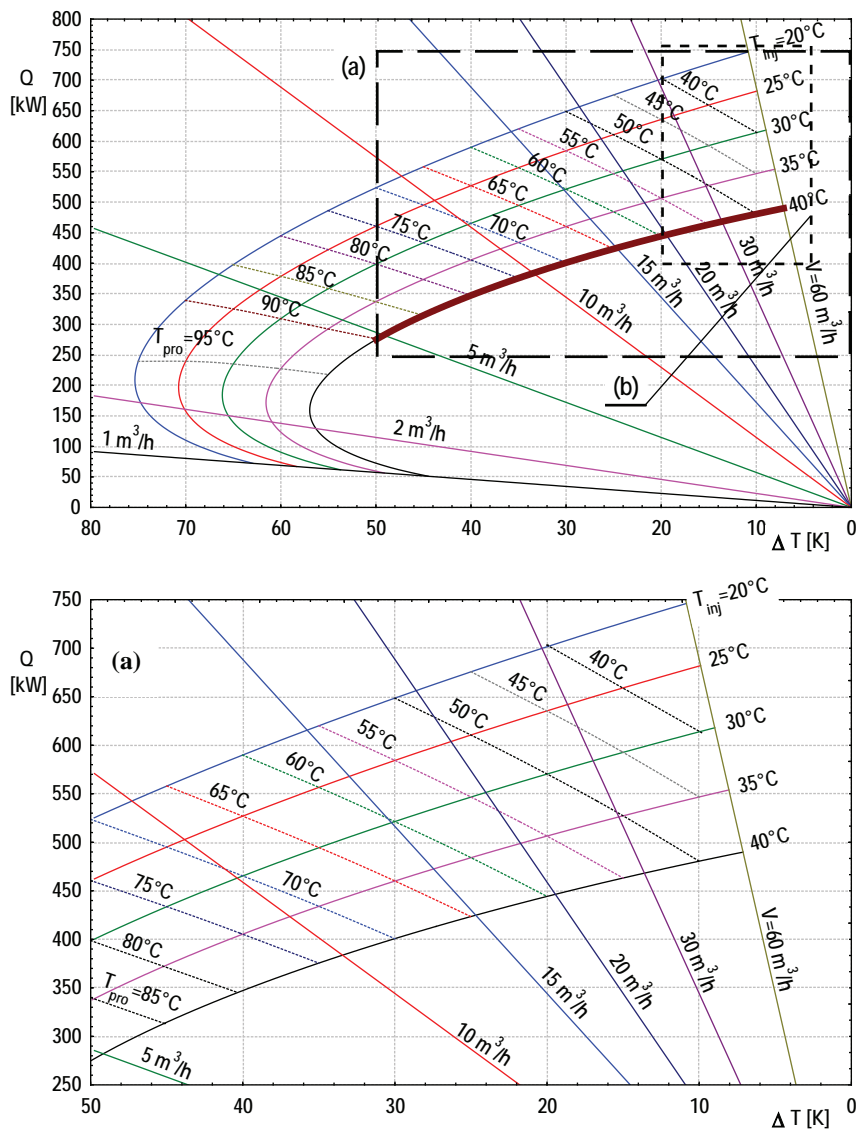
Na podstawie przedstawionego modelu matematycznego wymiany ciepła wykonano obliczenia (przy założonej ciągłej pracy równej 30 dni) dla niżej wybranych parametrów (przy założeniu, że górna część wymiennika geotermalnego jest zaizolowana na pewnej głębokości):

- temperatura masywu skalnego na głębokości 4000 m wynosi 142°C;
- temperatura na powierzchni ziemi wynosi 10°C;
- długość wymiennika L : 2000 m, 3000 m, 4000 m;
- temperatura wody zatłaczanej do wymiennika $T_1 = T_{inj} = 20, 25, 30, 35$ i 40°C;
- długość izolacji rury zewnętrznej $L_{ms} = \sim 303, \sim 455, \sim 606, \sim 758$ i ~ 909 m;
- strumień wody w wymienniku $\dot{V} = 1 - 60$ m³/h;
- średnica wewnętrzna rury zewnętrznej $D_1 = 0,2445$ m;
- średnica zewnętrzna rury wewnętrznej $D_2 = 0,1143$ m;
- współczynnik przenikania ciepła rury wewnętrznej $k_w = 0,91$ W/(m·K);
- parametry skały $\lambda = 3,46$ W/(m·K), $\rho = 3200$ kg/m³, $a_s = 1,3 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $c_p = 837,1$ J/(kg·K).

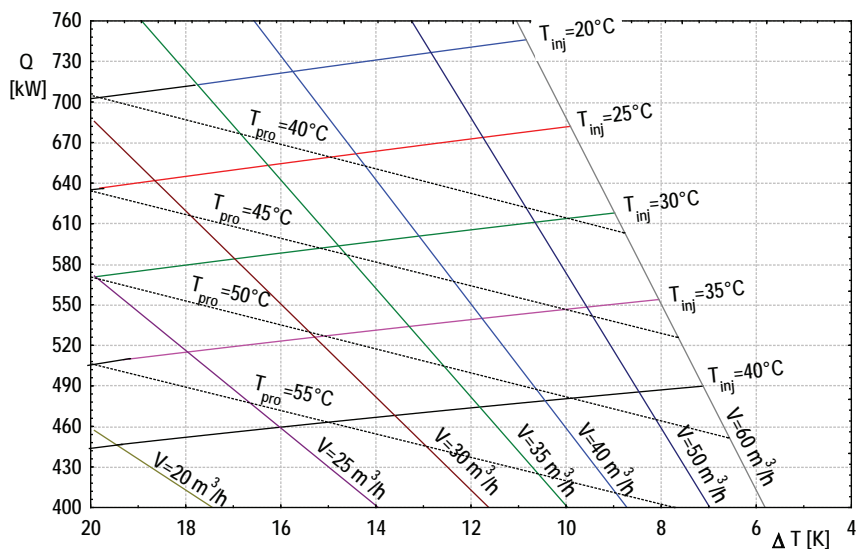
Obliczenia wykonano również dla przypadku, gdy rura wewnętrzna wymiennika nie była zaizolowana [107, 124–129, 131, 133]. Wyniki obliczeń w formie zaproponowanych charakterystyk cieplno-przepływowych przedstawiono na rys. 2.16 – 2.20.

Charakterystyki te pokazują, jak ze zmianą wartości objętościowego strumienia przepływającej wody w wymienniku geotermalnym (przy danej temperaturze zatłaczanej wody) zmieniają się strumienie pozyskiwanej energii geotermalnej z rzeczywistą zmianą temperatury wody na

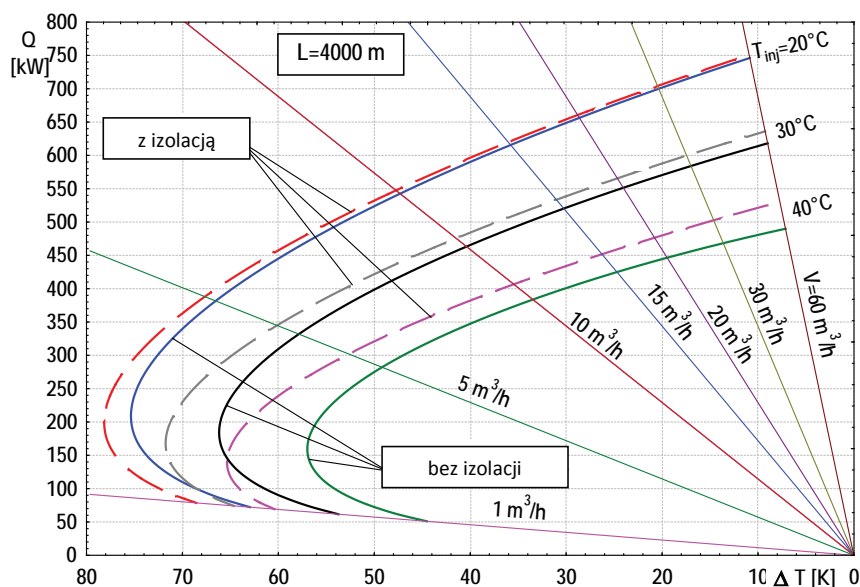
wypływie z wymiennika ciepła. Temperatura ta zależy od charakterystyki złoża oraz długości wymiennika ciepła.



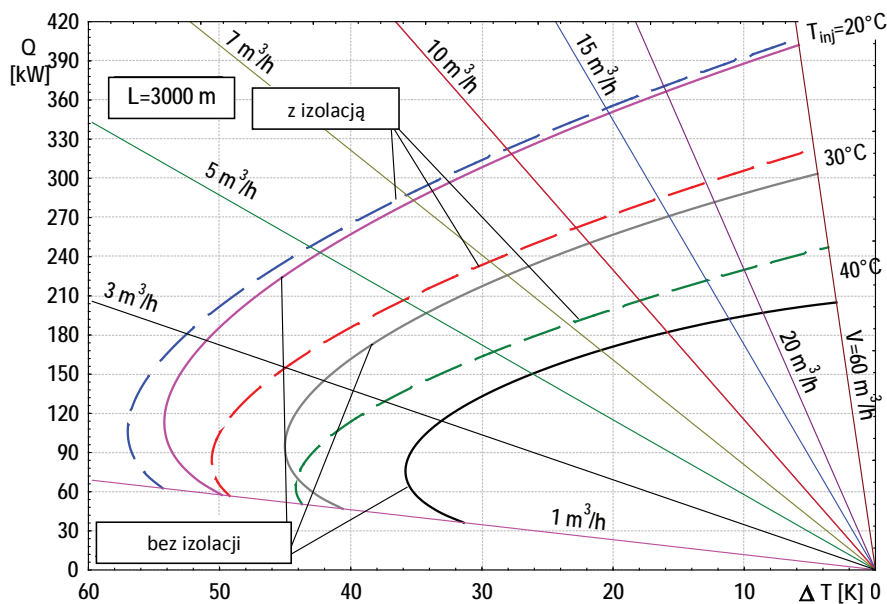
Rys. 2.16. Możliwości pozyskiwania energii z wymiennika geotermalnego o długości 4000 m z zaznaczonymi wydzielonymi obszarami współpracy wymiennik geotermalny – sieć ciepłownicza w przypadku przyrostu temperatury: (a) $\Delta T = 0\text{--}50$ K, (b) $\Delta T = 4\text{--}20$ K



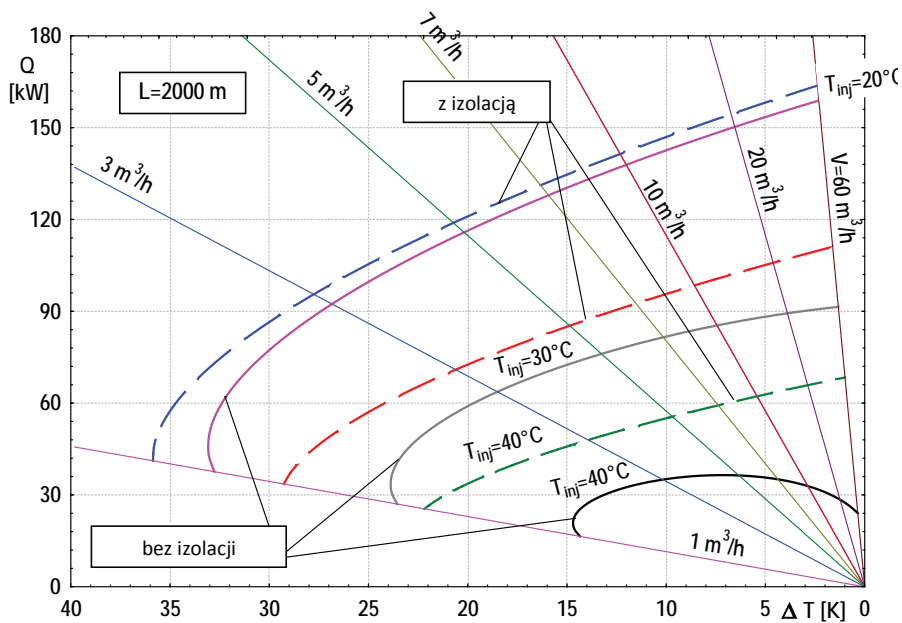
Rys. 2.16b. Możliwości pozyskiwania energii z wymiennika geotermalnego o długości 4000 m (obszar współpracy wymiennik geotermalny – sieć ciepłownicza) w przypadku przyrostu temperatury $\Delta T = 4\text{--}20\text{ K}$



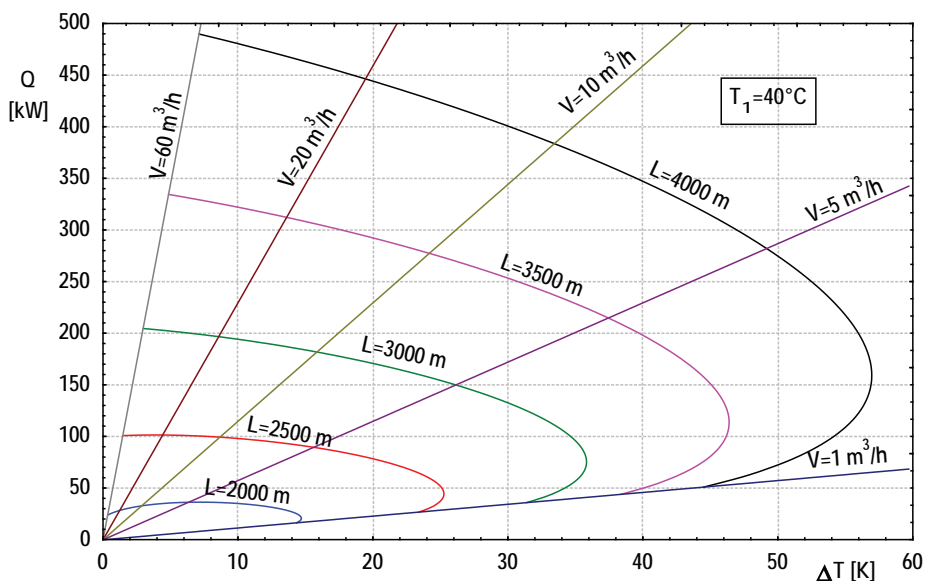
Rys. 2.17. Wpływ zastosowania izolacji na kształtowanie się wartości pozyskiwanego strumienia ciepła geotermalnego \dot{Q} (długość wymiennika $L = 4000\text{ m}$)



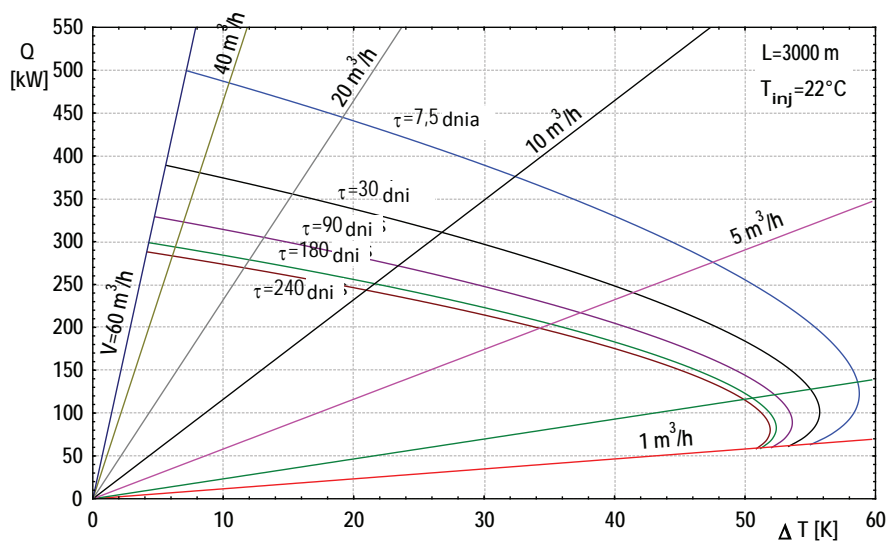
Rys. 2.18. Wpływ zastosowania izolacji na kształtowanie się wartości pozyskiwanego strumienia ciepła geotermalnego \dot{Q} (długość wymiennika $L = 3000$ m)



Rys. 2.19. Wpływ zastosowania izolacji na kształtowanie się wartości pozyskiwanego strumienia ciepła geotermalnego \dot{Q} (długość wymiennika $L = 2000$ m)



Rys. 2.20. Wpływ strumienia objętościowego wody geotermalnej \dot{V} , długości wymiennika geotermalnego L oraz różnicy temperatur ΔT pomiędzy wodą wydobywczą a zatłaczającą na pozyskiwany strumień ciepła geotermalnego \dot{Q} (wariant bez izolacji)



Rys. 2.21. Wpływ strumienia zatłaczającej wody \dot{V} , ciągłej pracy wymiennika τ oraz różnicy temperatur wyjścia–wejścia wody ΔT na pozyskiwany strumień ciepła \dot{Q} (temperatura zatłaczania wody $T_1 = T_{inj} = 22^\circ\text{C}$, długość wymiennika $L = 3000\text{ m}$)

Z analizy przedstawionego wykresu (rys. 2.16) wynikają odpowiednie wnioski dotyczące możliwości stosowania poszczególnych rodzajów regulacji. Najmniejsze możliwości regulacyjne występują w przypadku zastosowania regulacji jakościowej lub ilościowej, wtedy bowiem dla danej temperatury zatłaczania wody sieciowej istnieje tylko jeden punkt współpracy. Możliwa jest jednak współpraca dla punktów leżących na krzywej dotyczącej określonej temperatury zatłaczania. W przypadku regulacji jakościowej rozszerzenie zakresu regulacyjnego można uzyskać przez zatłaczanie zmiennej ilości wody sieciowej do wymiennika; dla regulacji ilościowej taki sam efekt uzyska się, stosując zmienną temperaturę wody sieciowej na wypływie z wymiennika. Dlatego też w przypadku wykorzystania wymienników geotermalnych współpracujących z siecią ciepłowniczą należy stosować regulację ilościowo-jakościową, bowiem wtedy punkt współpracy wymiennik geotermalny – sieć ciepłownicza może przemieszczać się na określonej powierzchni. Stąd na rys. 2.16a i 2.16b pokazano obszar współpracy wymiennika geotermalnego z siecią ciepłowniczą dla różnych obszarów przyrostu temperatury w wymienniku ciepła przy stosowaniu regulacji mieszanej.

W każdym z trzech sposobów regulacji czynnikiem decydującym o wyborze danego rodzaju regulacji powinna być ilość całkowitego wykorzystanego ciepła geotermalnego w sezonie ogrzewczym (c.o.+c.w.u.) oraz poza sezonem grzejnym (c.w.u.).

Z przeprowadzonej analizy oraz przedstawionych wykresów (rys. 2.16 – 2.20) wynikają następujące wnioski końcowe:

- do danych parametrów wymiennika geotermalnego zasilającego grupę odbiorców ciepła należy dostosować właściwy rodzaj regulacji sieci ciepłej, który zapewni najlepsze wykorzystanie wymiennika geotermalnego (rys. 2.16),
- wraz ze wzrostem objętościowego strumienia wody sieciowej wzrasta strumień pozyskiwanego ciepła geotermalnego, ale równocześnie spada przyrost temperatury w wymienniku geotermalnym i odwrotnie (rys. 2.16 – 2.19),
- stosowanie izolacji w górnej części wymiennika geotermalnego na takiej głębokości, aby temperatura zatłaczanej wody była równa temperaturze gruntu, powoduje wzrost strumienia pozyskiwanej energii geotermalnej oraz wzrost przyrostu temperatury wody sieciowej w wymienniku (rys. 2.17 – 2.19),
- głębokość wymiennika geotermalnego, a tym samym wyższy zakres temperatury złoża przyczynia się do wzrostu pozyskiwanego strumienia ciepła oraz wzrostu różnicy temperatury wody w wymienniku (rys. 2.20),

- czas eksploatacji (ciągłość pracy wymiennika) skutkuje obniżeniem jego mocy cieplnej (rys. 2.21).

2.3. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody większą od temperatury złoża na powierzchni ziemi przy dwóch zróżnicowanych parametrycznie warstwach górotworu (np. przy warstwie skalnej i złożu geotermalnym wodonośnym)

W przypadku zróżnicowanych miąższości warstw struktury geologicznej (pod względem współczynnika przekazywania ciepła), w której znajduje się geotermalny wymiennik ciepła, uzasadnione jest uwzględnienie tego faktu przy modelowaniu wymiennika i zastosowanie podziału wymiennika na dwie części. Podział taki tym bardziej powinniśmy wprowadzić, gdy mamy do czynienia z warstwą skalną znajdującą się w górnej części wymiennika i z tzw. warstwą wodonośną, która znajduje się poniżej (przypadek taki może mieć miejsce, gdy wykorzystujemy otwór wiertniczy, poprzez który była wydobywana woda geotermalna, a z pewnych względów eksploatacyjnych – na przykład zarastania otworów w wyniku wysokiej mineralizacji wody – zaniechamy dalszej eksploatacji złoża). W dalszej części podrozdziału przyjęto, że pierwsza część wymiennika znajduje się w nieprzepuszczalnym masywie skalnym, którego temperatura zmienia się liniowo. Część druga wymiennika zanurzona jest w złożu geotermalnym, od którego czynnik pobiera ciepło przy również liniowo zmieniającej się temperaturze wody geotermalnej [92–98, 103–109].

Przy wyprowadzaniu modelu matematycznego opisującego wymianę ciepła w pionowym geotermalnym wymienniku typu Field (rys. 2.22) postępujemy podobnie, jak w opisanym wcześniej przypadku (patrz pkt. 2.2).

Na podstawie równań bilansu wymiennika dla czynnika płynącego w kanale pierścieniowym oraz w kanale wewnętrznym w części pierwszej (warstwie skalnej), po uwzględnieniu równań wymiany ciepła i po wprowadzeniu oznaczeń: $\dot{W} = \dot{m}c_p$, $K_w = k_w \pi D_2 L_0$, $K_z = k_z \pi D_1 L_0$,

$$a = K_w / \dot{W}, \quad b = (K_w + K_z) / \dot{W}, \quad \Theta_1 = T_1 - T_x, \quad \Theta_2 = T_2 - T_x, \quad T_x = EL_o \frac{L}{L_o} + T_{g0} = E^* X + T_{g0},$$

otrzymano następujący układ równań różniczkowych rzędu pierwszego:

$$\frac{d\Theta_1}{dX} = -b\Theta_1 - a\Theta_2 + E^*, \quad (2.96)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dX} = a\Theta_1 + a\Theta_2 - E^* \quad (2.97)$$

Rozwiązanie tego układu równań dla warstwy skalnej po zastosowaniu metody d'Alamberta przyjmuje postać:

$$\Theta_1 = -C_2^* \exp(\nu_2^2 X) + C_1^* \exp(\nu_1^2 X), \quad (2.98)$$

$$\Theta_2 = C_2^* \frac{q_2}{p_2} \exp(\nu_2^2 X) - C_1^* \frac{q_1}{p_1} \exp(\nu_1^2 X) + \frac{E^*}{a}, \quad (2.99)$$

gdzie:

$$\nu_i^2 = 0,5 \left(K_z / \dot{W} \right) \left[-1 \pm \sqrt{1 + 4(K_w / K_z)} \right], (q_i / p_i) = -(\nu_i^2 + b) / a \quad \text{dla } i = 1, 2,$$

natomiast dla warstwy geotermalnej przedstawia się następująco:

$$\Theta_1^G = -C_2^G \exp(\nu_2^{2G} X) + C_1^G \exp(\nu_1^{2G} X), \quad (2.100)$$

$$\Theta_2^G = C_2^G \left(\frac{q_2}{p_2} \right)^G \exp(\nu_2^{2G} X) - C_1^G \left(\frac{q_1}{p_1} \right)^G \exp(\nu_1^{2G} X) + \frac{E^*}{a}, \quad (2.101)$$

gdzie:

$$\nu_i^{2G} = 0,5 \left(K_z^G / \dot{W} \right) \left[-1 \pm \sqrt{1 + 4(K_w^G / K_z^G)} \right], (q_i / p_i)^G = -(\nu_i^{2G} + b^G) / a \quad \text{dla } i = 1, 2 \quad \text{oraz}$$

$$K_z^G = k_z^G \pi D_1 L_0, \quad b^G = (K_w + K_z^G) / \dot{W}, \quad \Theta_1^G = T_1^G - T_x, \quad \Theta_2^G = T_2^G - T_x.$$

Należy zwrócić uwagę, że długość całkowita geotermalnego wymiennika ciepła L_0 równa jest sumie długości wymiennika, która znajduje się w warstwie skalnej L_S oraz w warstwie geotermalnej L_G : $L_0 = L_S + L_G$.

Dla jednoznacznego opisu pola temperatury w wymienniku należy wyznaczyć cztery stałe całkowania występujące w zależności od (2.98) do (2.101), wykorzystując podane warunki brzegowe:

$$\text{jeżeli } X = 0, \text{ to } \Theta_1 = \Theta_1', \quad (2.102)$$

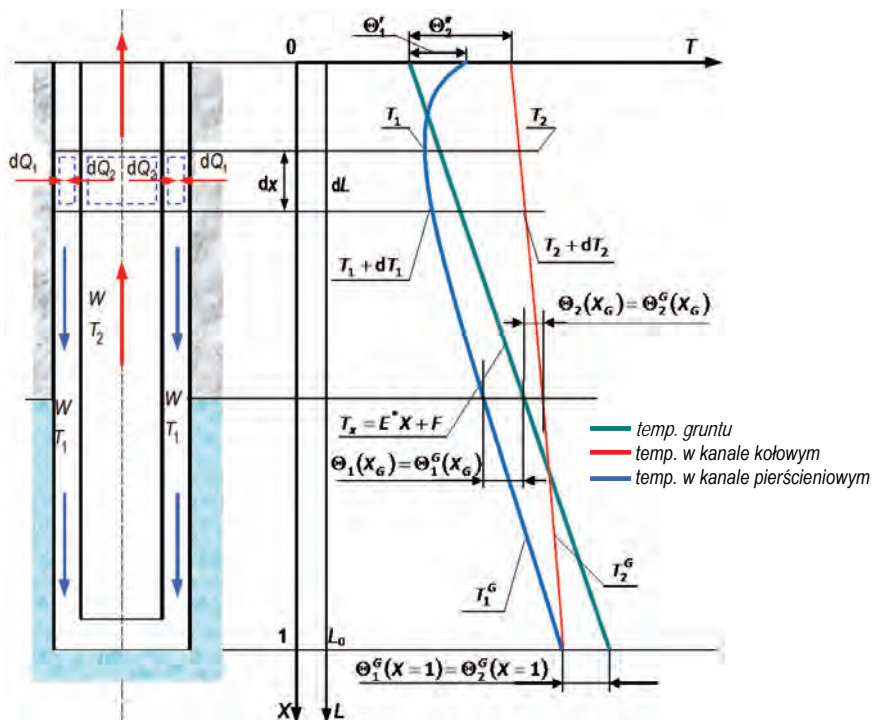
$$\text{jeżeli } X = X_G, \text{ to } \Theta_1 = \Theta_1^G, \quad (2.103)$$

$$\text{jeżeli } X = X_G, \text{ to } \Theta_2 = \Theta_2^G, \quad (2.104)$$

$$\text{jeżeli } X = 1, \text{ to } \Theta_2^{G'} = \Theta_1^{G''} \quad (2.105)$$

Stałe całkowania wraz z wielkościami pomocniczymi zestawiono w tabeli 2.1, zaś strumień odbieranego ciepła obliczono ze wzoru:

$$\dot{Q} = \dot{W} \Delta T = \dot{W} (\Theta_2'' - \Theta_1') \quad (2.106)$$



Rys. 2.22. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy doskonale zaizolowanej rurze wewnętrznej (temperatura na zatłaczaniu jest większa od temperatury gruntu)

Tabela 2.1. Stałe całkowania wraz z wielkościami pomocniczymi

Wielkość	Wyrażenie
1	2
C_1	$\Theta_1' + C_2$
C_2	$(N_2 \cdot M_1' + M_2') / (1 - N_1 \cdot M_1')$
C_1^G	$C_2 \cdot N_1 + N_2$
C_2^G	$C_1^G \cdot M_1 - M_2$
gdzie:	
M_1	$\exp(v_1^{2G}) \left[1 + \left(\frac{q_1}{p_1} \right)^G \right] / \exp(v_2^{2G}) \left[1 + \left(\frac{q_2}{p_2} \right)^G \right]$

cd. tabeli 2.1

1	2
M_2	$E^* / \left[a \left(\frac{q_2}{p_2} \right)^G \exp(v_2^{2G} X_G) + \exp(v_2^{2G}) \right]$
M_1'	$\left[-M_1 \exp(v_2^{2G} X_G) + \exp(v_1^{2G} X_G) \right] / \left[-\exp(v_2^2 X_G) + \exp(v_1^2 X_G) \right]$
M_2'	$\left[M_2 \exp(v_2^{2G} X_G) - \Theta_1' \exp(v_1^2 X_G) \right] / \left[-\exp(v_2^2 X_G) + \exp(v_1^2 X_G) \right]$
N_1	$\frac{\frac{q_2}{p_2} \exp(v_2^2 X_G) - \frac{q_1}{p_1} \exp(v_1^2 X_G)}{M_1 \left(\frac{q_2}{p_2} \right)^G \exp(v_2^{2G} X_G) - \left(\frac{q_1}{p_1} \right)^G \exp(v_1^{2G} X_G)}$
N_2	$\frac{M_2 \left(\frac{q_2}{p_2} \right)^G \exp(v_2^{2G} X_G) - \Theta_1' \frac{q_1}{p_1} \exp(v_1^2 X_G)}{M_1 \left(\frac{q_2}{p_2} \right)^G \exp(v_2^{2G} X_G) - \left(\frac{q_1}{p_1} \right)^G \exp(v_1^{2G} X_G)}$

Na podstawie przedstawionego modelu matematycznego wymiany ciepła wykonano obliczenia dla niżej wybranych parametrów:

- parametru odpowiedzialnego za profil temperaturowy złoża $E^* = 54^\circ\text{C}$;
- początkowej różnicy temperatur pomiędzy temperaturą na zatłaczaniu a temperaturą gruntu na powierzchni ziemi: $\Theta_1' = 0\text{ K}$ oraz $\Theta_1' = 10\text{ K}$;
- stosunku współczynnika przenikania ciepła strony zewnętrznej wymiennika i strony wewnętrznej $k_z^G/k_w = 0,1; 1; 5; 20$;
- stosunku długości części wymiennika umieszczonej w złożu geotermalnym do całkowitej jego długości: L_G/L_0 od 0,05 do 0,50;
- stosunku izolacji doskonałej zarówno rury zewnętrznej i wewnętrznej w górnej części wymiennika do całkowitej jego długości L_{insul}/L_0 od 0,0 do 0,5;
- strumienia pojemności cieplnej $\dot{W} = 10\ 000, 20\ 000, 30\ 000, 40\ 000, 100\ 000, 200\ 000$ oraz $300\ 000\text{ W/K}$;
- parametrów skały: $\lambda = 3,46\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\rho = 3200\text{ kg/m}^3$, $a_s = 1,3 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, $c_p = 837,1\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$.

Uzyskane wyniki obliczeń zaprezentowano w formie wykresów i przedstawiono na rys. 2.23, 2.24 oraz rys. Z4.1 – Z4.12 (załącznik Z4).

Potwierdzone zostały wcześniejsze analizy, że istotny wpływ na wielkość strumienia pobieranego ciepła, poza pojemnością strumienia czynnika, dla wybranych wartości k_w i k_z , ma: temperatura zatłaczanej wody T_1' (tutaj wyrażona przez parametr Θ_1'), grubość warstwy geotermalnej L_G oraz stosunek współczynników przenikania ciepła k_z^G/k_w . Wzrost grubości warstwy geotermalnej dla $k_z^G/k_w \geq 1$ powoduje wzrost pobieranego strumienia ciepła; większe przyrosty występują przy większych wartościach pojemności cieplnej strumienia czynnika (rys. 2.23, 2.24 oraz rys. Z4.1 – Z4.4) [126, 129, 132].

Dodatkowo przeprowadzono obliczenia umożliwiające ocenę wpływu zaizolowanej górnej części wymiennika. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że stosowanie izolacji w górnej części wymiennika ciepła powoduje zawsze zmniejszenie czynnej powierzchni wymiany ciepła. W zależności od warunków wymiany ciepła może to wpływać korzystnie albo niekorzystnie.

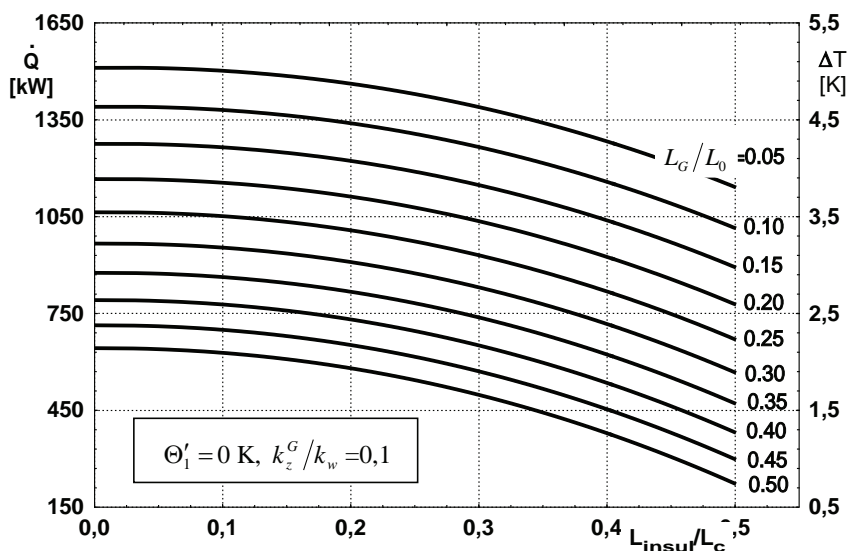
Jeżeli $\Theta_1' > 0$, wzrost względnej długości izolacji zmniejsza wprawdzie czynną powierzchnię wymiany ciepła, ale dotyczy to tej części wymiennika ciepła, w której czynnik zatłaczany oddaje ciepło do złoża, co w efekcie końcowym powoduje na ogół wzrost strumienia odbieranego ciepła.

Dla $\dot{W} < 40000 \text{ W/K}$ względny wzrost długości izolacji wpływa nieznacznie na wzrost strumienia wydobywanego ciepła. Dla $\dot{W} > 40000 \text{ W/K}$ przy większych wartościach k_z^G/k_w wzrost względnej długości izolacji praktycznie nie ma wpływu na zmianę strumienia ciepła (rys. Z4.5 – Z4.12), zaś przy mniejszych wartości k_z^G/k_w może powodować jego spadek (rys. Z4.6 – Z4.9).

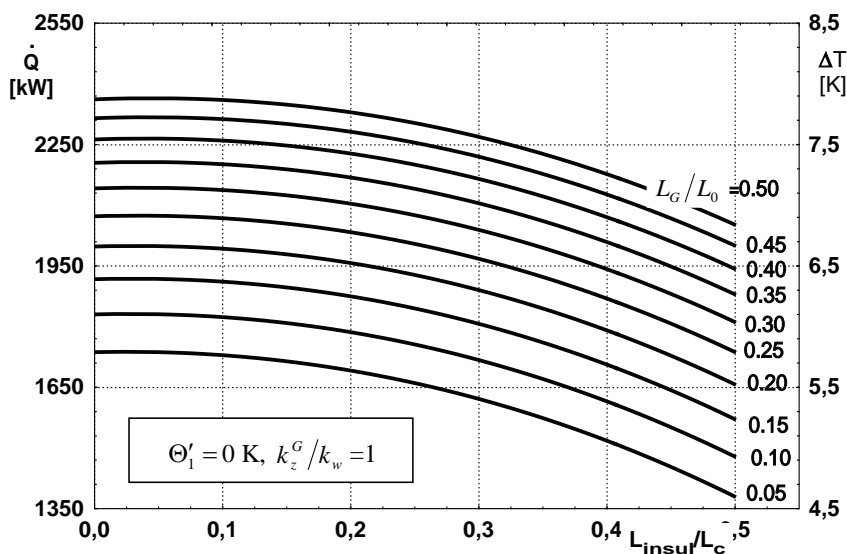
Natomiast jeżeli $\Theta_1' < 0$, wzrost względnej długości izolacji z jednej strony zmniejsza ilość odbieranego ciepła od złoża (wpływ niekorzystny), z drugiej zaś strony zmniejsza odpowiednio strumień przekazywanego ciepła między strumieniem wydobywanym a zatłaczanym (wpływ korzystny). W efekcie końcowym nakładania się tych procesów na wielkość strumienia odbieranego ciepła będą miały wpływ stosunki współczynników przenikania ciepła k_z^G/k_w i k_z/k_w (rys. 2.22).

Przy mniejszych wartościach \dot{W} ze wzrostem względnej długości izolacji na ogół występuje wzrost strumienia wydobywanego ciepła. Wzrost ten jest bardzo widoczny dla $k_z^G/k_w > 1$.

Jeżeli $k_z^G/k_w < 1$, wzrost strumienia wydobywanego ciepła zależy jednocześnie od względnej długości izolacji L_{insul}/L_c oraz względnego osadzenia wymiennika w warstwie geotermalnego złoża wodonośnego L_G/L_0 (rys. 2.54 – 2.58). Na rys. 2.58 dla $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 0,1$ oraz pojemności strumienia ciepłego $\dot{W} = 30\ 000$ W/K zaznaczono linią przerywaną linię graniczną, dla której przecięcie z krzywymi stałych wartości L_{insul}/L_c przy zwiększeniu długości izolacji powoduje zmniejszenie strumienia pozyskiwanego ciepła z wymiennika, co oczywiście jest niekorzystne.



Rys. 2.23. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field przy $\dot{W} = 300\ 000$ W/K, $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 0,1$

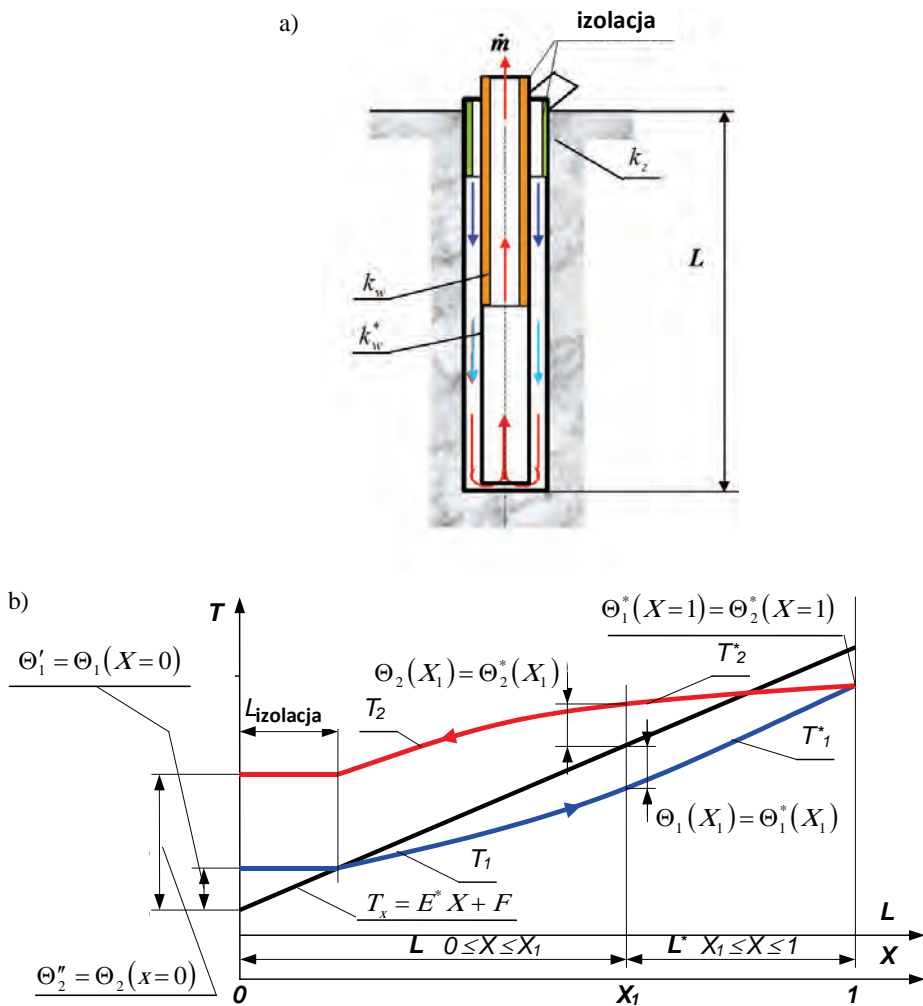


Rys. 2.24. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field przy $\dot{W} = 300\,000\text{ W/K}$, $\Theta_1' = 0\text{ K}$, $k_z^G/k_w = 1$

2.4. Model matematyczny wymiennika geotermalnego typu Field z temperaturą zatłaczanej wody większą od temperatury złoża na powierzchni ziemi przy dwóch zróżnicowanych parametrycznie powierzchniach wewnętrznych wymiennika (np. zaizolowanego i nieizolowanego kanału wewnętrznego wymiennika)

Jeżeli wewnętrzna rura wymiennika typu Field została wykonana z dwóch odcinków różniących się wartością współczynnika przenikania ciepła (np. część górna izolowana o współczynniku k_w , dolna o wartości k_w^* ; przypadek taki może mieć miejsce z pewnych względów konstrukcyjnych związanych z adaptacją otworu wiertniczego), do wykonania obliczeń charakterystyk wymiennika możemy wykorzystać zmodyfikowany w rozdziale 2.3 model matematyczny wymiennika z podziałem na dwie części, gdzie kryterium jest właśnie zróżnicowanie jego powierzchni wewnętrznej [80].

Przy wyprowadzaniu modelu matematycznego opisującego wymianę ciepła w pionowym wymienniku gruntowym typu Field (rys. 2.25) postępujemy podobnie jak w opisanym wcześniej przypadku (patrz pkt 2.3).



Rys. 2.25. Schemat geotermalnego wymiennika ciepła (a) wraz z profilem temperaturowym (b)

Na podstawie równań bilansu wymiennika dla czynnika płynącego w kanale pierścieniowym oraz w kanale wewnętrznym, w części pierwszej (np. izolacja) po uwzględnieniu równań wymiany ciepła i po wprowadzeniu oznaczeń: $\dot{W} = \dot{m}c_p$, $K_w = k_w \pi D_2 L_0$, $K_z = k_z \pi D_1 L_0$,

$$b = (K_w + K_z) / \dot{W}, \quad a = K_w / \dot{W}, \quad \Theta_1 = T_1 - T_x, \quad \Theta_2 = T_2 - T_x, \quad T_x = EL_o \frac{L}{L_o} + T_{g0} = E^* X + T_{g0},$$

otrzymano następujący układ równań różniczkowych rzędu pierwszego:

$$\frac{d\Theta_1}{dX} = -b\Theta_1 - a\Theta_2 + E^*, \quad (2.107)$$

$$\frac{d\Theta_2}{dX} = a\Theta_1 + a\Theta_2 - E^*, \quad (2.108)$$

Rozwiązanie tego układu równań dla warstwy skalnej po zastosowaniu metody d'Alamberta przyjmuje postać:

$$\Theta_1 = -C_2^* \exp(\nu_2^2 X) + C_1^* \exp(\nu_1^2 X), \quad (2.109)$$

$$\Theta_2 = C_2^* \frac{q_2}{p_2} \exp(\nu_2^2 X) - C_1^* \frac{q_1}{p_1} \exp(\nu_1^2 X) + \frac{E^*}{a}, \quad (2.110)$$

gdzie:

$$\nu_i^2 = 0,5 \left(K_z / \dot{W} \right) \left[-1 \pm \sqrt{1 + 4(K_w / K_z)} \right], (q_i / p_i) = -(\nu_i^2 + b) / a \text{ dla } i = 1, 2,$$

natomiast dla warstwy drugiej (np. rury stalowej o wartości k_w^*) przedstawia się następująco:

$$\Theta_1^* = -C_2^* \exp(\nu_2^{2*} X) + C_1^* \exp(\nu_1^{2*} X), \quad (2.111)$$

$$\Theta_2^* = C_2^* \left(\frac{q_2}{p_2} \right)^* \exp(\nu_2^{2*} X) - C_1^* \left(\frac{q_1}{p_1} \right)^* \exp(\nu_1^{2*} X) + \frac{E^*}{a^*}, \quad (2.112)$$

gdzie:

$$\nu_i^{2*} = 0,5 \left(K_z^* / \dot{W} \right) \left[-1 \pm \sqrt{1 + 4(K_w^* / K_z^*)} \right], (q_i / p_i)^* = -(\nu_i^{2*} + b^*) / a^* \text{ dla } i = 1, 2 \text{ oraz}$$

$$K_w^* = k_w^* \pi D_2 L_0, b^* = (K_w^* + K_z^*) / \dot{W}, \Theta_1^* = T_1^* - T_x, \Theta_2^* = T_2^* - T_x.$$

Dla jednoznacznego opisu pola temperatury w części pierwszej oraz w części drugiej wymiennika należy wyznaczyć cztery stałe całkowania występujące w zależnościach od (2.109) do (2.112), wykorzystując cztery niżej podane warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} \Theta_1(X=0) &= \Theta_1', & \Theta_1(X=X_1) &= \Theta_1^*(X=X_1) \\ \Theta_2(X=X_1) &= \Theta_2^*(X=X_1), & \Theta_2^*(X=1) &= \Theta_1^*(X=1) \end{aligned} \quad (2.113)$$

Obliczone stałe przedstawia tabela 2.2.

Strumień odbieranego ciepła przez wymiennik określa zależność:

$$\dot{Q} = \dot{W} [\Theta_2(X=0) - \Theta_1(X=0)] = \dot{W} (\Theta_2^* - \Theta_1') = \dot{W} (T_2'' - T_1') \quad (2.114)$$

Wykorzystując przedstawiony model matematyczny, wykonano obliczenia [111, 115] dla tych samych założeń co w pracy Mority [19], który swoje obliczenia wykonywał na drodze numerycznej. Długość wymiennika wynosiła 3000 m. Temperatura formacji wraz z głębokością zmieniała się liniowo: przyjęta temperatura na powierzchni ziemi wynosiła 13°C, zaś na

maksymalnej głębokości wynosiła 75°C; przewodność cieplna formacji 3,0 W/(m·K). Założono również, że stalowa rura zewnętrzna o średnicy zewnętrznej 0,222 m ma przewodność cieplną wynoszącą 46,1 W/(m·K), zaś rura wewnętrzna zbudowana jest z podwójnej rury izolowanej, wypełnionej między ściankami obojętnym gazem. Przyjęto, że ekwiwalentna przewodność cieplna wynosi 0,12 W/(m·K).

W celu zbadania wpływu zastosowania izolowanej rury wewnętrznej na temperaturę na wypływie i moc cieplną geotermalnego wymiennika ciepła wykonano obliczenia analityczne dla różnych długości izolowanego odcinka rury wewnętrznej. Założono posadowienie izolowanej rury na powierzchni ziemi oraz stalowej rury, o parametrach 4 ½", w przedłużeniu, poniżej izolacji do dna wymiennika.

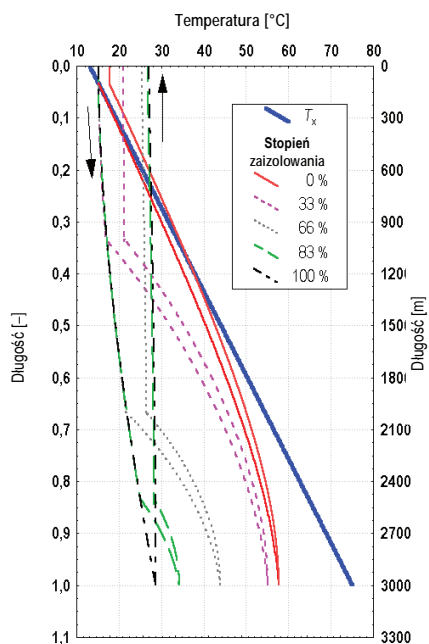
Tabela 2.2. Stałe całkowania wraz z wielkościami pomocniczymi

Wielkość	Wyrażenie
C_1	$\Theta'_1 + C_2$
C_2	$(N_2 M'_1 + M'_2)/(1 - N_1 M'_1)$
C_1^*	$C_2 N_1 + N_2$
C_2^*	$C_1^* M_1 - M_2$
gdzie:	
M_1	$\frac{[(1 + q_1^*/p_1^*)\exp(v_1^{*2} X_1)]}{[(1 + q_2^*/p_2^*)\exp(v_2^{*2} X_1)]}$
M_2	$E/[a^*(1 + q_2^*/p_2^*)\exp(v_2^{*2} X_1)]$
M'_1	$\frac{[\exp(v_1^{*2} X_1) - M_1 \exp(v_2^{*2} X_1)]}{[\exp(v_1^2 X_1) - \exp(v_2^2 X_1)]}$
M'_2	$\frac{[M_2 \exp(v_2^{*2} X_1) - \Theta'_1 \exp(v_1^2 X_1)]}{[\exp(v_1^2 X_1) - \exp(v_2^2 X_1)]}$
N_1	$\frac{(q_2/p_2)\exp(v_2^2 X_1) - (q_1/p_1)\exp(v_1^2 X_1)}{M_1(q_2^*/p_2^*)\exp(v_2^{*2} X_1) - (q_1^*/p_1^*)\exp(v_1^{*2} X_1)}$
N_2	$\frac{M_2(q_2^*/p_2^*)\exp(v_2^{*2} X_1) - \Theta'_1(q_1/p_1)\exp(v_1^2 X_1) + E^*\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a^*}\right)}{M_1(q_2^*/p_2^*)\exp(v_2^{*2} X_1) - (q_1^*/p_1^*)\exp(v_1^{*2} X_1)}$

Wyniki obliczeń w formie odpowiednich wykresów przedstawiono na rys. 2.26 – 2.27.

Uzyskane wyniki obliczeń korelują z wynikami uzyskanymi przez Moritę [19] na drodze numerycznej (rys. 2.27 i 2.28). Rys. 2.27 przedstawia profile temperatury w 180 dniu ciągłej

pracy. W przypadku, gdy stalowa rura stanowi całą długość wymiennika, temperatura i moc cieplna netto na wypływie wynoszą 17,5°C i 70 kW.

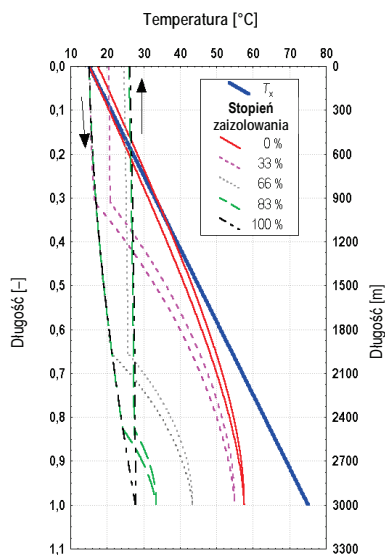


Rys. 2.26. Wpływ przewodności cieplnej wewnętrznej rury wymiennika typu Field na profile temperatury w wymienniku po 90 dniach ciągłej pracy

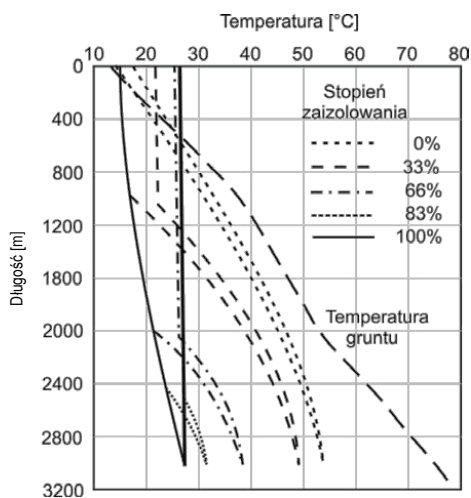
Warto zauważyć, że po 90 i 180 dniach pracy temperatura na wypływie i moc cieplna w przypadku 83-procentowego i 100-procentowego udziału odcinka izolowanego są prawie takie same (rys. 2.26 i 2.27). Oznacza to, że nie ma potrzeby używania izolowanej rury na całej długości wymiennika ze względu na zbyt duży udział kosztów inwestycyjnych związanych z zaizolowaniem rury wewnętrznej.

Rys. 2.29 – 2.31 pokazują zależności pomiędzy udziałem izolowanego odcinka i temperaturą na wypływie z wymiennika oraz mocą cieplną, przy natężeniach przepływu 300–500 dm³/min (odpowiednio 18, 24 i 30 m³/h), po 180 dniach pracy. Przedstawiono na nich wyniki obliczeń własnych oraz obliczenia wykonane numerycznie przez Moritę. We wszystkich przypadkach temperatura zatlaczanej wody wynosiła 15°C. Uzyskano pełną zgodność zmienności zarówno

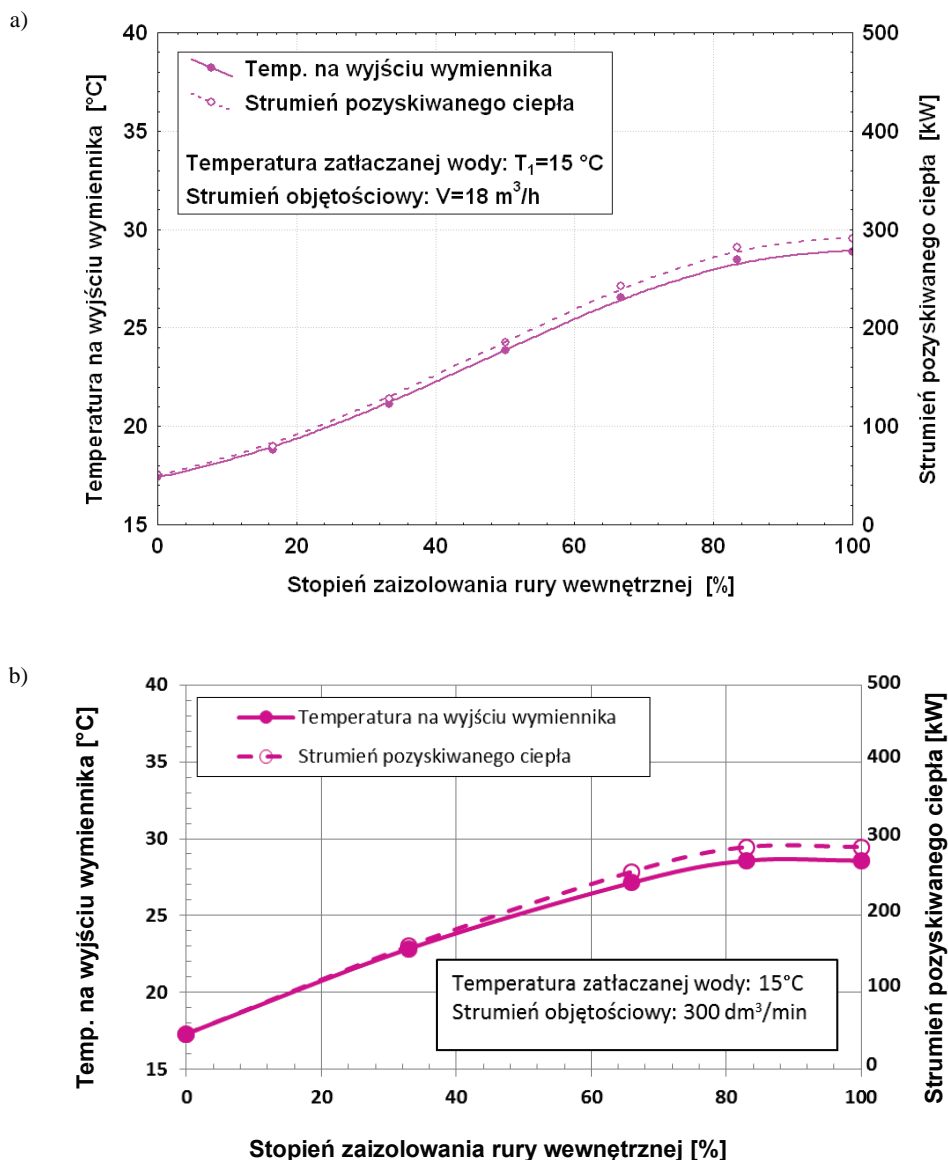
pozyskiwanego strumienia ciepła, jak i temperatury na wyjściu wymiennika ciepła z wynikami Mority.



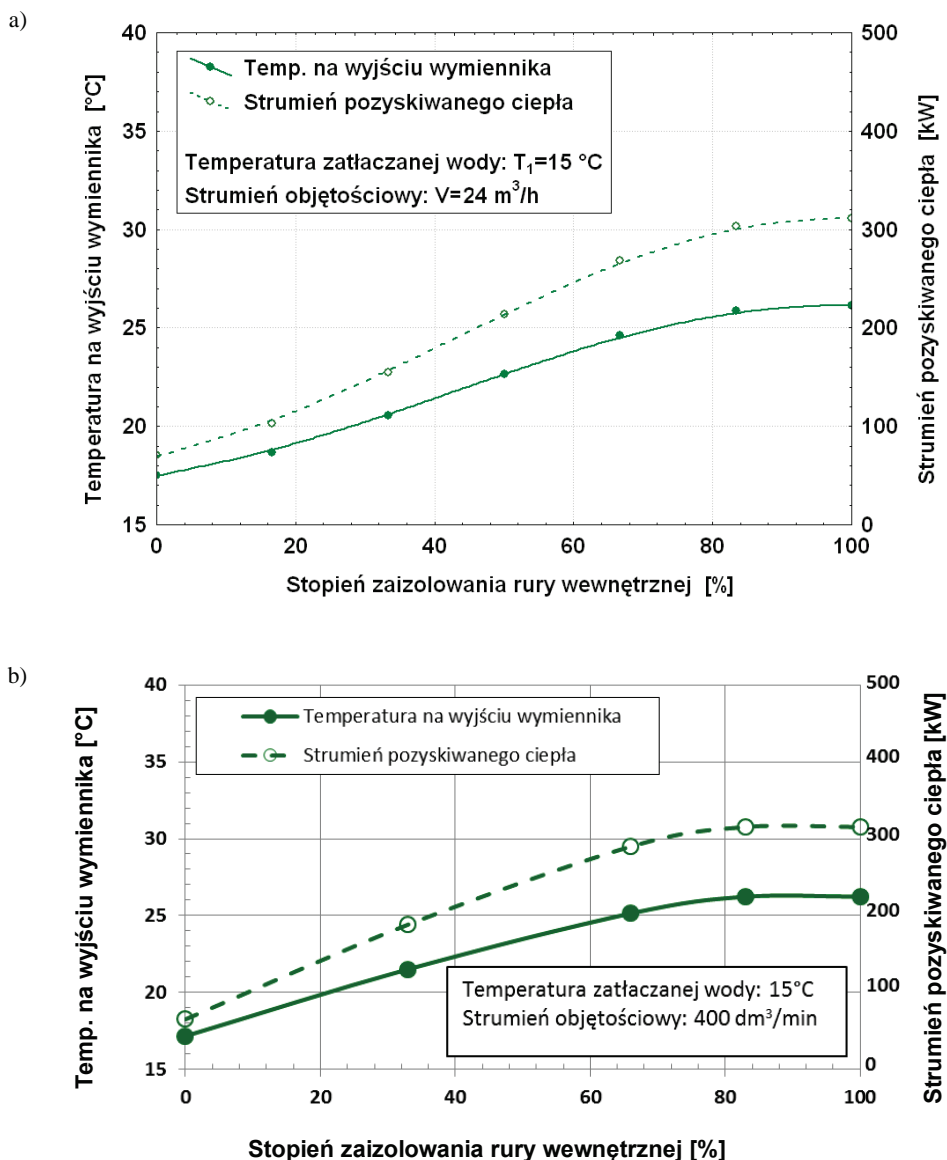
Rys. 2.27. Wpływ przewodności cieplnej wewnętrznej rury wymiennika typu Field na profile temperatury w wymienniku po 180 dniach ciągłej pracy



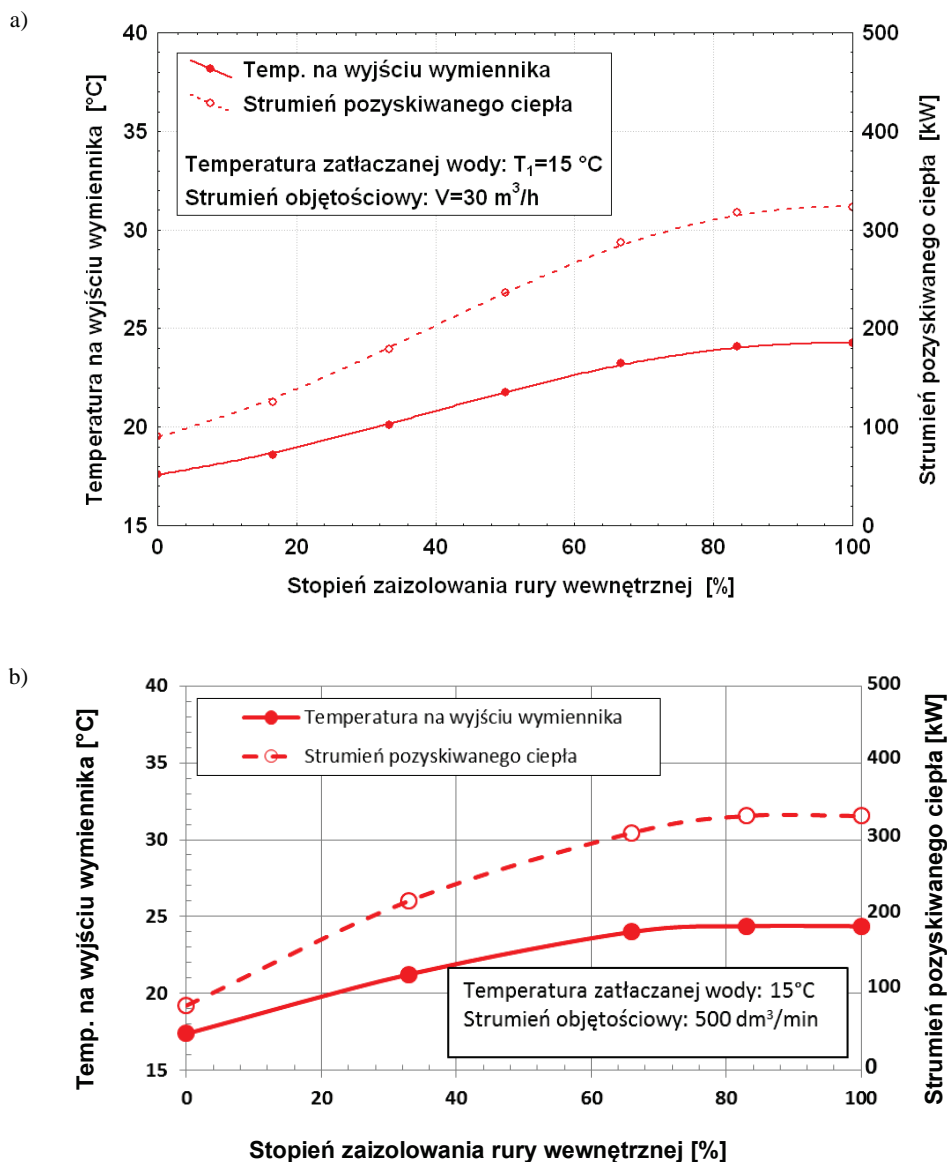
Rys. 2.28. Profile temperatury w geotermalnym wymienniku ciepła w 180. dniu pracy przy różnym udziale izolowanego odcinka rury wg obliczeń numerycznych Mority [19]



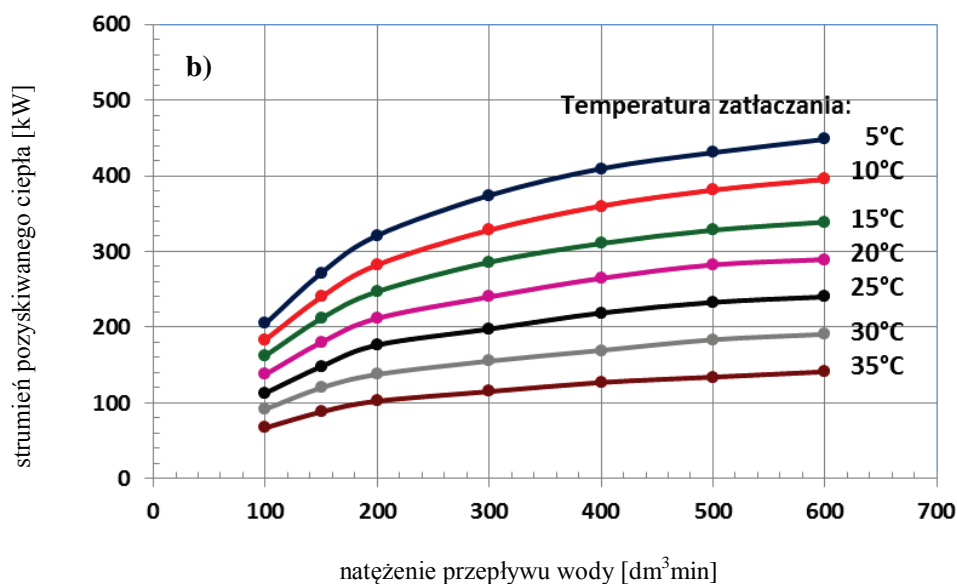
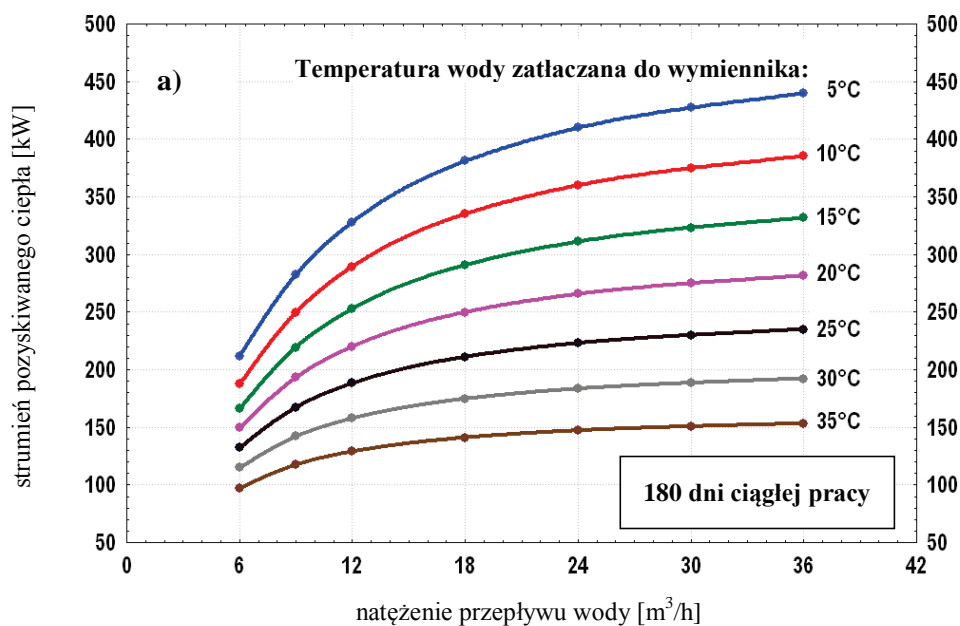
Rys. 2.29. Zależność między udziałem izolowanego odcinka rury wewnętrznej i temperaturą na wypływie oraz mocą cieplną przy natężeniu przepływu czynnika w wymienniku $300\text{ dm}^3/\text{min}$ ($18\text{ m}^3/\text{h}$), przy ciągłej pracy wymiennika wynoszącej 180 dni: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]



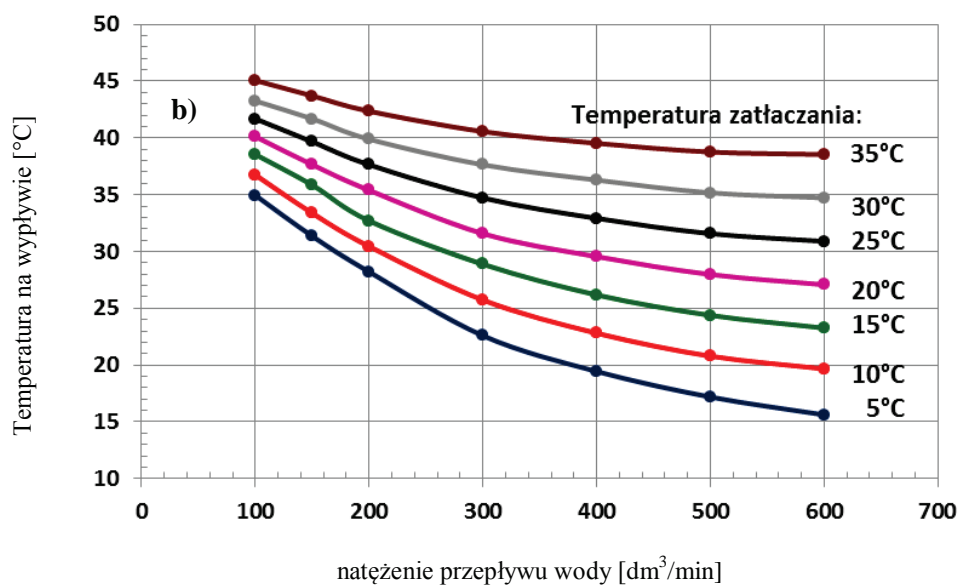
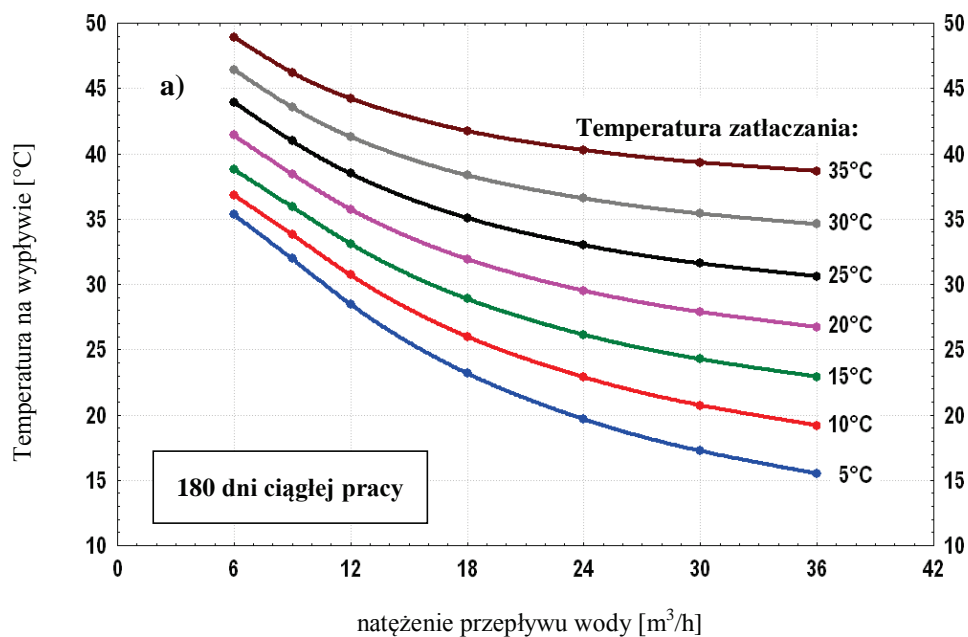
Rys. 2.30. Zależność między udziałem izolowanego odcinka rury wewnętrznej i temperaturą na wypływie oraz mocą cieplną przy natężeniu przepływu czynnika w wymienniku $400\text{ dm}^3/\text{min}$ ($24\text{ m}^3/\text{h}$), przy ciągłej pracy wymiennika wynoszącej 180 dni: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]



Rys. 2.31. Zależność między udziałem izolowanego odcinka rury wewnętrznej i temperaturą na wypływie oraz mocą cieplną przy natężeniu przepływu czynnika w wymienniku $500\text{ dm}^3/\text{min}$ ($30\text{ m}^3/\text{h}$), przy ciągłej pracy wymiennika wynoszącej 180 dni: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]



Rys. 2.32. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a pozyskiwanym strumieniem ciepła z wymiennika w 180. dniu pracy: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]

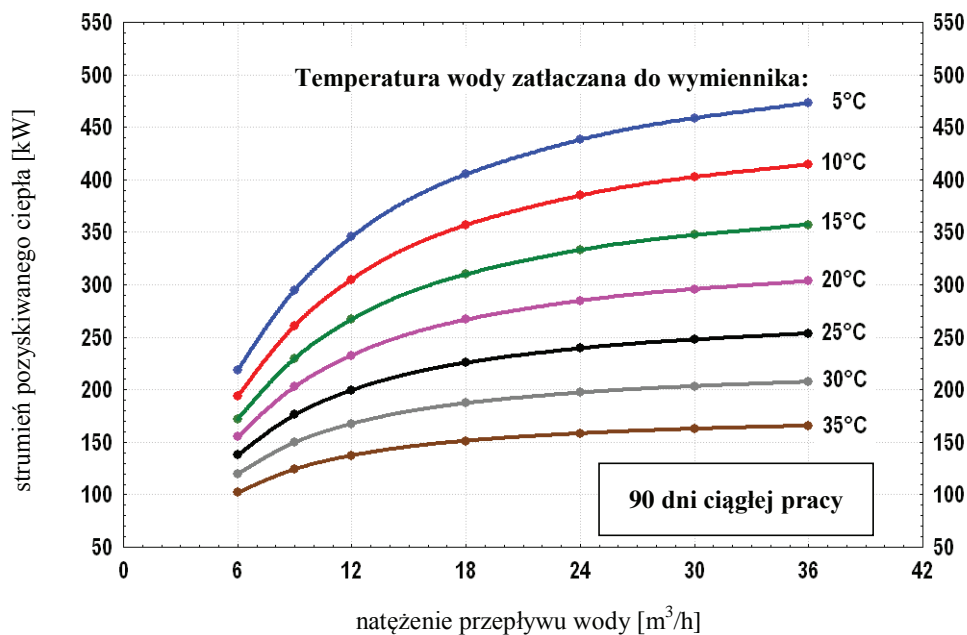


Rys. 2.33. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a temperaturą na wypływie z wymiennika w 180. dniu pracy: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]

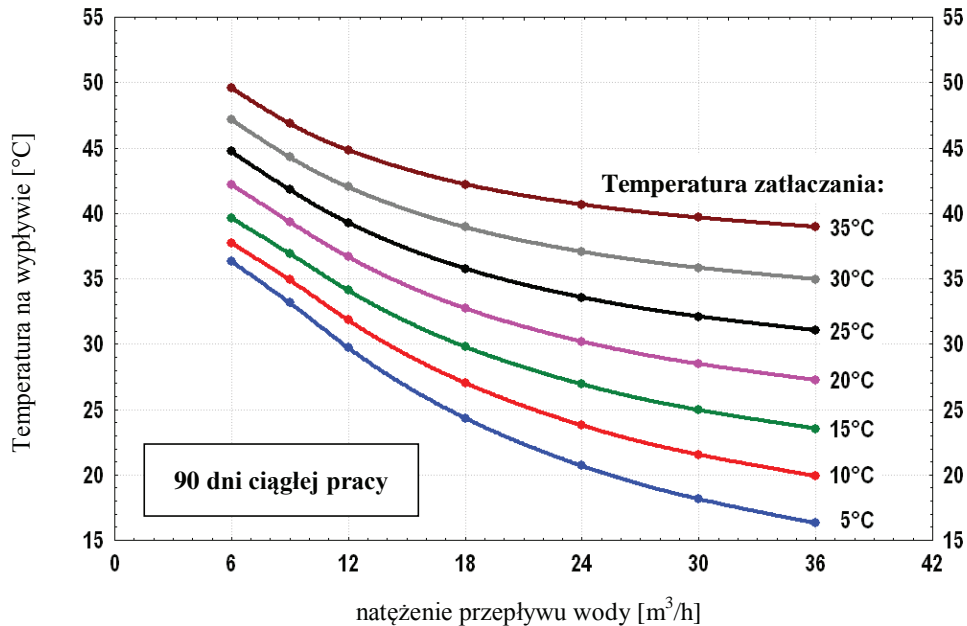
Przy użyciu stalowej rury na całej długości geotermalnego wymiennika typu Field temperatura na wypływie dla różnych wartości natężenia przepływu jest taka sama i wynosi $\sim 17,5^{\circ}\text{C}$. Z drugiej strony, moc cieplna wzrasta proporcjonalnie do wzrostu natężenia przepływu. Temperatura na wypływie i uzyskana moc cieplna dla tego samego natężenia przepływu w przypadku użycia rur izolowanych są prawie takie same przy 83-procentowym i 100-procentowym udziale odcinka izolowanego. Wpływ zastosowania izolacji rury wewnętrznej na wzrost mocy cieplnej maleje ze wzrostem natężenia przepływu.

Na rys. 2.32 i 2.33 przedstawiono odpowiednio, jaki wpływ ma natężenie przepływu wody w wymienniku oraz temperatura zatłaczania na strumień pozyskiwanego ciepła (rys. 2.32) oraz na temperaturę na wypływie z wymiennika (rys. 2.33). Oba wykresy zawierają obliczenia własne oraz obliczenia numeryczne wykonane przez Moritę [19] dla 180 dni ciągłej pracy geotermalnego wymiennika ciepła. Wyniki obliczeń na drodze numerycznej i na drodze analitycznej pokrywają się. Niewielkie rozbieżności w uzyskiwanych wartościach strumienia pozyskiwanego ciepła oraz temperatur na wyjściu z wymiennika występują w przypadku natężeń przepływu poniżej $300\text{ dm}^3/\text{min}$ ($18\text{ m}^3/\text{h}$).

Obliczenia własne, wykonane dla 90 dni ciągłej pracy wymiennika, przedstawiające zmienność strumienia pozyskiwanego ciepła oraz zmienność temperatury wydobywanej wody, zobrazowane są w formie wykresów – odpowiednio na rys. 2.34 oraz 2.35.



Rys. 2.34. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a strumieniem pozyskiwanego ciepła w 90. dniu pracy ciągłej – obliczenia własne



Rys. 2.35. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a temperaturą na wypływie z wymiennika w 90. dniu pracy ciągłej – obliczenia własne

3. WSPÓŁCZYNNIKI PRZEKAZYWANIA CIEPŁA

W celu przeanalizowania zagadnień związanych z procesami wymiany ciepła w wymienniku typu „rura w rurze” (zwanym również wymiennikiem Fielda) niezbędna jest znajomość odpowiednich współczynników: wnikania ciepła, przenikania ciepła oraz zastępczego współczynnika przekazywania ciepła gruntu. W tym ostatnim przypadku w obliczeniach przyjmuje się stan quasi-ustalonej wymiany ciepła. Dzięki temu obliczenia stają się prostsze i bardziej funkcjonalne w obliczeniach inżynierskich. Dlatego też w punktach 3.1 – 3.3 podano metody obliczania tych wielkości.

3.1. Współczynnik przenikania ciepła

Przy analizie wymiany ciepła pomiędzy dwoma strumieniami czynnika płynącego przeciuprądowo w kanałach wymiennika typu „rura w rurze” należy rozważyć poszczególne procesy towarzyszące temu zjawisku. Czynnik o wyższej temperaturze płynie do góry w rurze wewnętrznej wymiennika, która jest omywana z zewnątrz przez czynnik o temperaturze niższej płynący w przeciuprądzie w zewnętrznym kanale pierścieniowym. Ruchowi czynników towarzyszą procesy wnikania ciepła na powierzchniach omywanych przez płyn i proces przewodzenia ciepła przez przegrodę rozgraniczającą obydwie strumienie. Schemat fragmentu przegrody cylindrycznej z odpowiednim polem temperatury podano na rys. 3.1.

W stanie ustalonym, a takie założenie można przyjąć, zakładając dodatkowo w poniższych rozważaniach, że temperatura czynnika jest wielkością stałą, musi być spełniony warunek, że strumień wnikającego ciepła z ośrodka pierwszego jest równy strumieniowi przewodzonego ciepła przez przegrodę cylindryczną, a ten równy jest strumieniowi wnikającego ciepła do drugiego ośrodka. Liniową gęstość strumienia ciepła przenikającego z jednego ośrodka do drugiego określa zależność:

$$Q_l = \pi k_l (\bar{T}_{f1} - \bar{T}_{f2}) \quad (3.1)$$

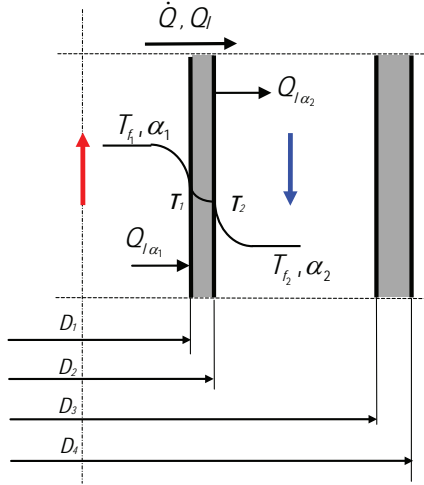
lub

$$Q_l = \frac{\pi (\bar{T}_{f1} - \bar{T}_{f2})}{R_{k_l}}, \quad (3.2)$$

gdzie: R jest oporem przenikania ciepła,

$$\frac{1}{k_l} = \frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_{2-1}} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\alpha_2 D_3}, \quad (3.3)$$

$$R_{k_l} = R_{l\alpha 1} + R_{l\lambda_{2-1}} + R_{l\alpha 2} \quad (3.4)$$



Rys. 3.1. Schemat przegrody cylindrycznej z zaznaczonym polem temperatur

Z zależności (3.1) i (3.2) po wykorzystaniu wyrażenia definicji na liniową gęstość strumienia ciepła $Q_l = \dot{Q}/l$ otrzymamy wzór na strumień przekazywanego ciepła:

$$\dot{Q} = k_w A_o (\bar{T}_{f1} - \bar{T}_{f2}) = k_w A_o \Delta T, \quad (3.5)$$

gdzie: A_o – powierzchnia obliczeniowa wymiany ciepła,

$$\frac{1}{k_w} = D_o \frac{1}{k_l} = D_o \left(\frac{1}{\alpha_1 D_1} + \frac{1}{2\lambda_{2-1}} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{\alpha_2 D_3} \right) \quad (3.6)$$

Zależność (3.5) jest słuszna, jeżeli \bar{T}_{f1} i \bar{T}_{f2} są wielkościami stałymi lub jeżeli traktuje się je jako temperatury średnie.

3.2. Współczynnik wnikania ciepła

Dla wymiennika geotermalnego typu Field proces wymiany ciepła zachodzi zarówno na ścianie zewnętrznej (pomiędzy złożem i płynem przemieszczającym się w kanale pierścieniowym), jak również pomiędzy płynem znajdującym się w kanale pierścieniowym i (płynącym w przeciwnym kierunku) w kanale wewnętrznym wymiennika.

Do wyznaczenia wartości współczynników wnikania ciepła we wspomnianych wymiennikach stosuje się zależności empiryczne opracowane z wykorzystaniem teorii podobieństwa. Jej

zastosowanie pozwala na opracowanie wyników badań w formie zależności uogólnionych między liczbami podobieństwa charakterystycznymi dla danego zjawiska.

W analizowanym wymienniku przy obliczaniu wartości współczynników wnikania ciepła α można posłużyć się wybranymi równaniami kryterialnymi spotkanymi w literaturze tematu [137]. Ze względu na zróżnicowany charakter przepływu czynnika obiegowego – analizowane zakresy prędkości przepływu czynnika pokrywają obszar ruchu laminarnego i burzliwego – muszą być stosowane zależności odpowiadające zarówno charakterowi przepływu, jak i konfiguracji geometrycznej wymiennika.

W celu określenia wartości współczynnika wnikania ciepła na ścianie wewnętrznej rury stanowiącej kanał wewnętrzny wymiennika przy przepływie burzliwym czynnika w tym kanale można zastosować zależności obowiązujące w danym zakresie liczb kryterialnych [137]:

a) zależność Micheeva:

$$Nu = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (3.7)$$

śluszną w zakresie liczb Reynoldsa $Re = 10^4 - 5 \cdot 10^6$ oraz liczb Prandtla $Pr = 0,6 - 2500$ dla dowolnego czynnika obiegowego,

b) zależność Planovskiego, Ramma i Kagana:

$$Nu = 0,008 \cdot Re_f^{0,9} \cdot Pr_f^{0,43}, \quad (3.8)$$

śluszną w zakresie liczb Reynoldsa $Re = 2300 - 10^4$,

c) zależność Elsnera:

$$Nu = 0,289 \cdot Re_f^{0,5} \cdot Pr_f^{1/3} \cdot (D_o/L)^{0,5}, \quad (3.9)$$

śluszną w zakresie liczb Reynoldsa $Re < 2300$.

We wszystkich wzorach indeks dolny f odnosi się do średniej temperatury płynu, a w do temperatury przy ścianie.

W przypadku prowadzenia obliczeń współczynnika wnikania ciepła α przy przepływie czynnika w kanale o przekroju pierścieniowym (wymiennik typu Field) należy posłużyć się dwoma zależnościami dostosowanymi do charakteru przepływu czynnika wewnątrz kanału.

Przy przepływie czynnika w obszarze ruchu laminarnego, co będzie miało miejsce przy najmniejszych prędkościach przepływu, wartość liczby Nusselta można określić na podstawie zależności uogólnionej Sarmy [137]:

$$\text{Nu} = 0,155 \cdot \left(1 - \frac{D_w}{D_z}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot \text{Re}_f^{0,645} \cdot \text{Pr}_f^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\eta_f}{\eta_w}\right)^{0,14}, \quad (3.10)$$

śluznej w zakresie liczb Reynoldsa $\text{Re} = 10^3 - 1,5 \cdot 10^4$ (η dynamiczny współczynnik lepkości płynu).

Przy przepływie czynnika w obszarze ruchu burzliwego wartość liczby Nu można określić na podstawie zależności uogólnionej opracowanej przez Averina i współpracowników [137]:

$$\text{Nu} = 0,021 \cdot \text{Re}_f^{0,8} \cdot \text{Pr}_f^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_f}{\text{Pr}_w}\right)^{0,25}, \quad (3.11)$$

śluznej w zakresie liczb Reynoldsa $\text{Re} = 6 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^5$.

Zarówno zależność (3.10), jak i zależność (3.11) odnoszą się do przypadku obustronnego wnikanie ciepła na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej kanału pierścieniowego.

Określenie wartości liczby Nusselta jest równoznaczne z określeniem wartości współczynnika wnikanie ciepła α z zależności $\bar{\alpha} = \frac{\lambda}{l} \bar{\text{Nu}}$.

3.3. Zastępczy opór cieplny gruntu

Aby określić pole temperatury dla nieustalonego przewodzenia ciepła otaczającego złoża skalne, można skorzystać z podawanych w literaturze rozwiązań równania przewodnictwa dla odpowiednich warunków granicznych. Niektóre z rozwiązań, dla uśrednionych właściwości cieplno-fizycznych złoża skalnego lub gruntu, umożliwiają określenie zmiennego w czasie zastępczego liniowego oporu przewodzenia ciepła w złożu skalnym. W pracach rosyjskich badaczy [138–145] podano sposób obliczania liniowego oporu przewodzenia ciepła złoża skalnego przez wprowadzenie zmiennego w czasie promienia oddziaływania otaczającego ośrodka $r_s = f(t)$ na warunki przewodzenia ciepła w złożu skalnym.

Jeżeli $r_s \gg r_w$, zwiększający się promień r_s w czasie można określić z zależności:

$$r_s = 2\sqrt{a_s \tau} \quad (3.12)$$

gdzie:

r_w – promień otworu w skale [m],

$a_s = \lambda_s / (c_s \rho_s)$ – współczynnik wyrównywania temperatury złoża skalnego [m^2/s].

Wtedy liniowy opór przewodzenia ciepła w złożu skalnym określa się ze wzoru:

$$R_s = \frac{1}{2\lambda_s} \ln \frac{2\sqrt{a_s \tau}}{r_w}, \quad (3.13)$$

a całkowity liniowy opór przekazywania ciepła od złoża skalnego do płynu:

$$R_t = R_\alpha + R_\lambda + R_s, \quad (3.14)$$

gdzie:

$$R_\alpha = \frac{1}{2r_1\alpha} \quad (3.15)$$

jest liniowym oporem wnikania ciepła, natomiast:

$$R_\lambda = \sum_{i=1}^n R_{\lambda_i} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} \quad (3.16)$$

jest całkowitym liniowym oporem przewodzenia ciepła orurowania otworu.

Wykorzystując (3.15) oraz (3.16), zależność (3.14) można zapisać następująco:

$$R_t = \frac{1}{2r_1\alpha} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{1}{2\lambda_s} \ln \frac{2\sqrt{a_s \tau}}{r_{n+1}} \quad (3.17)$$

W przypadku głębokich odwiertów można pominąć opory orurowania, a zastępczy liniowy opór przekazywania ciepła określa zależność:

$$R_t \cong \frac{1}{2r_1\alpha} + \frac{1}{2\lambda_s} \ln \frac{2\sqrt{a_s \tau}}{r_{n+1}} \quad (3.18)$$

Związek między zastępczym liniowym współczynnikiem przekazywania ciepła k_l i zastępczym współczynnikiem przekazywania ciepła k_z :

$$\frac{1}{k_z} = 2r_1 \frac{1}{k_l} = D_1 \frac{1}{k_l} \quad (3.19)$$

Zastępczy współczynnik przekazywania ciepła k_z , wykorzystując zależności (3.19), (3.17) i (3.18), można określić z następujących zależności (wg Czarnego) [138, 139]:

$$\frac{1}{k_z} = \frac{1}{\alpha} + \frac{D_1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i} + \frac{D_1}{2\lambda_s} \ln \frac{4\sqrt{a_s \tau}}{D_{n+1}} \quad (3.20)$$

lub

$$\frac{1}{k_z^*} = \frac{1}{k_z} \cong \frac{1}{\alpha} + \frac{D_1}{2\lambda_s} \ln \frac{4\sqrt{a_s \tau}}{D_1} \quad (3.21)$$

oraz Diatkina i Giendlera [142, 143]:

$$k_z^* = k_z = \frac{k'_z}{1 + \text{Bi} \ln(1 + \sqrt{\gamma} \text{Fo})} \quad (3.22)$$

gdzie:

$$\frac{1}{k'_z} = \frac{1}{\alpha} + \frac{D_1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{D_{i+1}}{D_i} \quad (3.23)$$

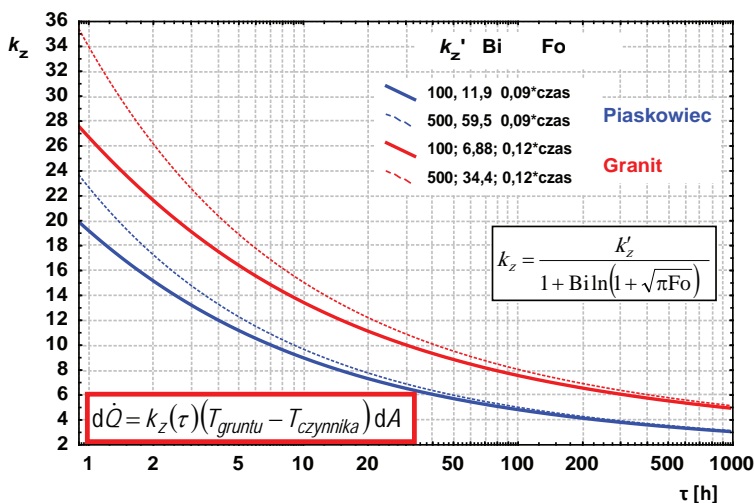
Jeżeli $Bi < 30$, zależność (3.22) można zapisać w sposób następujący:

$$k_z^* = k_z = \frac{k'_z}{1 + Bi \ln(1 + \sqrt{\pi Fo})} \quad (3.22a)$$

Jeżeli zaś $Bi \rightarrow \infty$, co praktycznie odpowiada $Bi > 30$, zależność (3.22) przyjmuje postać:

$$k_z^* = k_z \cong \frac{\lambda_s}{r_i \ln(1 + \sqrt{\pi Fo})} \quad (3.22b)$$

Na podstawie opracowanych zależności przez Czarnego [138, 139] i Diadkina-Giendlera [142, 143], wykorzystując cieplno-fizyczne parametry skał oraz geometrię geotermalnego wymiennika ciepła, wykonano obliczenia zastępczego współczynnika przekazywania ciepła w funkcji czasu (rys. 3.2). Jego wartości na tyle są zbliżone i dla czasu dłuższego od stu godzin ciągłej pracy nie ulegają istotnym zmianom. Te przybliżone wzory obowiązują, jeżeli praca wymiennika jest stabilna, tzn. gdy podczas eksploatacji utrzymywany jest stały objętościowy strumień przepływającego płynu. Gdy występują dłuższe przerwy lub zakłócenia, należy stosować zależności opisane w pracy [144].



Rys. 3.2. Zmienność wartości zastępczego współczynnika przekazywania ciepła dla piaskowca i granitu w funkcji ciągłej eksploatacji geotermalnego wymiennika ciepła

4. WYKORZYSTANIE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO GEOTERMALNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA TYPU FIELD DO OCENY POZYSKANIA CIEPŁA Z OTWORU JACHÓWKA 2K

Wykorzystując opracowane, przedstawione w rozdziale 3, modele analityczne geotermalnego wymiennika ciepła (GWC) typu Field, opracowano koncepcję wykorzystania energii geotermalnej w obiektach balneologiczno-rekreacyjnych w miejscowości Sucha Beskidzka, która bazuje na wykorzystaniu istniejącego pojedynczego odwiertu Jachówka 2K [96, 97, 146].

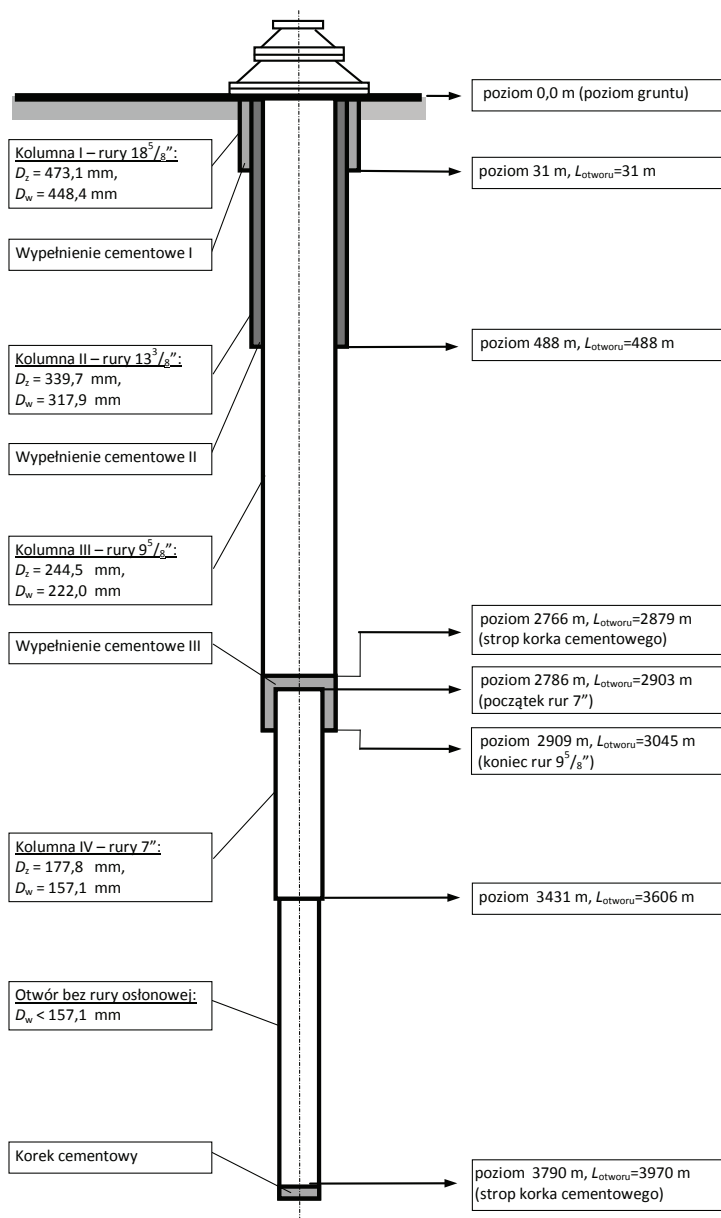
Szczegółowe dane techniczne odwiertu Jachówka 2K wraz z analizą i opisem istniejących warunków geologicznych zostały opracowane przez PGNiG „Geonafta”.

Otwór wykonany jest teleskopowo i posiada orurowanie wykonane za pomocą rur stalowych. Rury tworzą cztery kolumny o stopniowo zmniejszających się średnicach. Przestrzeń pomiędzy rurami wypełniona jest kamieniem cementowym.

Wymiary odwiertu Jachówka 2K przedstawiono w tabeli 4.1 i na rysunku 4.1.

Tabela 4.1. Dane dotyczące odwiertu Jachówka 2K

Nr kolumny	Wymiar rury	Średnica		Długość kolumny	Łączna długość odwiertu	Poziom końca kolumny
		zewnętrzna	wewnętrzna			
–	cal	mm		m		
I	18 ⁵ / ₈	473,1	448,4	31	31	31
II	13 ³ / ₈	339,7	317,9	488	488	488
III	9 ⁵ / ₈	244,5	222,0	3045	3045	2909
IV	7	177,8	157,1	703	3606	3431
V	–	–	~157	364	3970	3790



Rys. 4.1. Schemat otworu kierunkowego JACHÓWKA 2K – wymiarowanie;
 L_{otworu} – długość otworu mierzona po krzywiźnie

Do odbioru energii cieplnej zawartej w ziemi przewidziano wykorzystanie wymiennika typu Field. Jego budowa bazuje na istniejącym orurowaniu otworu wiertniczego Jachówka-2K, stanowiącym korpus zewnętrzny projektowanego wymiennika. W istniejącym orurowaniu przewidziane jest koncentryczne umieszczenie rury wewnętrznej o odpowiednio mniejszej średnicy, stanowiącej kolumnę wewnętrzną wymiennika. W tak powstałym wymienniku woda byłaby zatłaczana do zewnętrznego kanału pierścieniowego utworzonego przez ścianki koncentrycznie usytuowanych rur: zewnętrznej i wewnętrznej. Czynnik, przepływając w dół wymiennika, ogrzewałby się stopniowo od skał posiadających wyższą od niego temperaturę. W dolnym punkcie zwrotnym czynnik osiąga maksymalną temperaturę, której wartość zależy między innymi od warunków wymiany ciepła i prędkości przepływu czynnika. Dalszy przepływ czynnika na powierzchnię ziemi realizowany jest w rurze wewnętrznej. Na zewnętrznej ścianie kanału pierścieniowego występuje proces wymiany ciepła pomiędzy nagrzanymi do wysokiej temperatury warstwami skał a zatłaczanym czynnikiem o niższej temperaturze. Również na ścianie wewnętrznej kanału pierścieniowego, stanowiącej przegrodę pomiędzy przeciwnie skierowanymi strumieniami czynnika obiegowego, przebiega proces wymiany ciepła. Nagrzany do wysokiej temperatury strumień wody płynący do góry rurą wewnętrzną oddaje część ciepła do chłodniejszego strumienia wody płynącego zewnętrznym kanałem pierścieniowym w dół na drodze przenikania ciepła. W wyniku tego procesu następuje obniżenie temperatury czynnika wypływającego na powierzchnię w stosunku do temperatury, jaką posiada w punkcie zwrotnym. Celem zmniejszenia ilości przekazywanego ciepła przez powierzchnię wewnętrzną należy stosować materiały charakteryzujące się dużym oporem cieplnym.

W prowadzonej analizie możliwości wykorzystania energii geotermalnej przy pomocy odwiertu Jachówka 2K rozważano dwa zasadnicze warianty wykonania wymienników typu Field.

Wariant pierwszy dotyczył wykonania wymiennika typu Field o całkowitej długości 2870 m. W związku z tym na głębokości 2879 m założono korek cementowy wyłączający z użytkowania dalszą część istniejącego odwiertu. Korpus wymiennika stanowi kolumna rur stalowych ($9\frac{5}{8}$ ") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_z = 244,5$ mm, średnica wewnętrzna $D_w = 222,0$ mm, długość całkowita 2870 m. Wewnątrz umieszczona jest kolumna rur ($2\frac{3}{8}$ ") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D'_z = 60,3$ mm, średnica wewnętrzna $D'_w = 50,7$ mm, długość całkowita 2870 m.

Na zewnętrznej powierzchni rury, stanowiącej kolumnę wewnętrzną wymiennika typu Field, przewidziano założenie izolacji cieplnej zmniejszającej wymianę ciepła pomiędzy strumieniami czynnika płynącego w przeciwnych kierunkach w kanałach wewnętrznym i zewnętrznym wymiennika. W przeprowadzonej analizie uwzględniono następujące warianty wykonania izolacji:

- 1) z izolacją doskonałą rury wewnętrznej na całą jej długości;
- 2) z izolacją w postaci szczeliny powietrznej utworzonej przez nasunięcie na wewnętrzną kolumnę rur ($2\frac{3}{8}$ "") osłony wykonanej z rur stalowych ($4\frac{1}{2}$ "") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_z'' = 114,3$ mm, średnica wewnętrzna $D_w'' = 100,5$ mm, długość całkowita równa długości kolumny wewnętrznej wymiennika;
- 3) z izolacją w postaci warstwy pianki poliuretanowej naniesionej na ograniczony, górny odcinek wewnętrznej kolumny rur ($2\frac{3}{8}$ ""): średnica zewnętrzna $D_z'' = 114,3$ mm, średnica wewnętrzna $D_w'' = 60,3$ mm, długość całkowita 600 m.

Szkic wymiennika typu Field (wariant I) z zaznaczonymi głównymi wymiarami przedstawiono na rysunku 4.2.

Wariant drugi dotyczy wykonania wymiennika typu Field o całkowitej długości 3950 m. Korpus wymiennika do długości 2870 m. stanowi kolumna rur stalowych ($9\frac{5}{8}$ "") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_z = 244,5$ mm, średnica wewnętrzna $D_w = 222,0$ mm, długość całkowita 2870 m. Poniżej tej długości, aż do 3431 m korpus wymiennika stanowi kolumna rur (7"") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_z = 177,8$ mm, średnica wewnętrzna $D_w = 157,1$ mm, długość całkowita 703 m. W dalszym odcinku otwór o przybliżonej średnicy 157 mm jest nieorurowany, zaś korpus wymiennika stanowi lita skała – do głębokości 3970 m. Na tej odległości otwór jest zaczopowany korkiem cementowym.

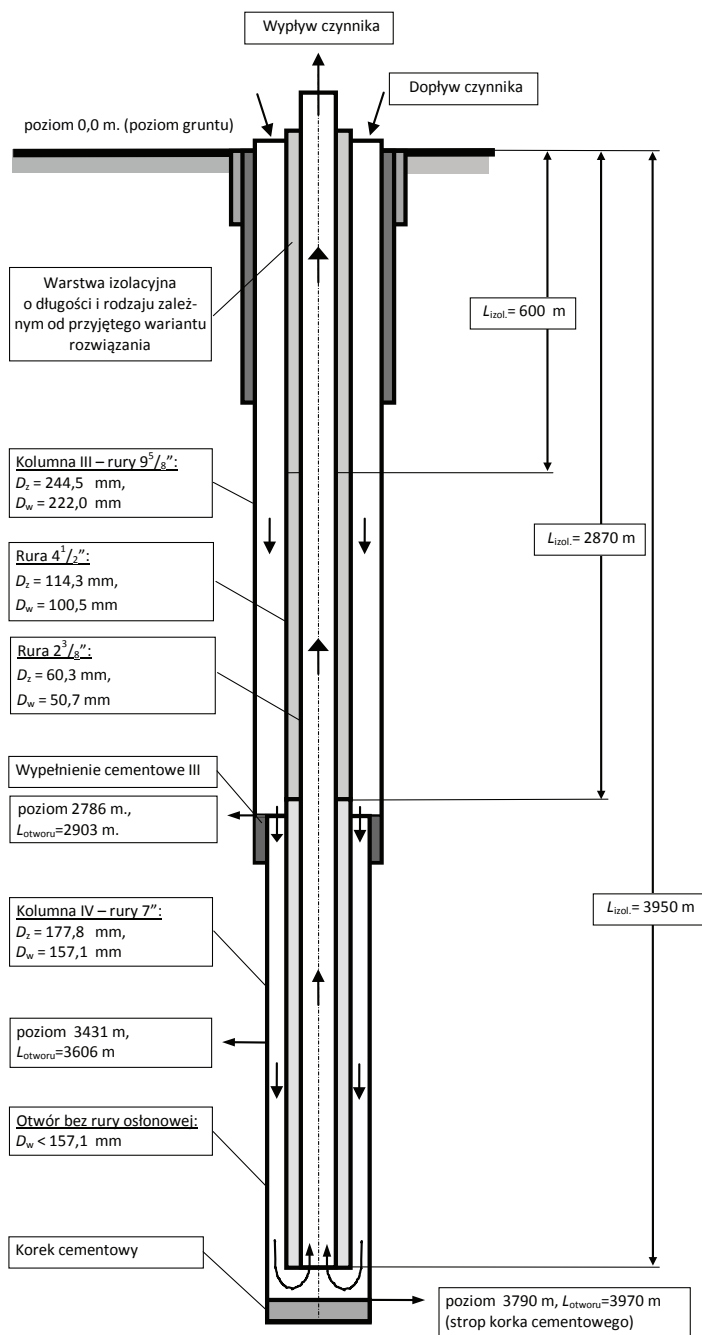
Kolumna wewnętrzna wymiennika wykonana jest z rur stalowych ($2\frac{3}{8}$ "") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_z' = 60,3$ mm, średnica wewnętrzna $D_w' = 50,7$ mm, długość całkowita 3950 m.

Na zewnętrznej powierzchni rury, stanowiącej kolumnę wewnętrzną wymiennika typu Field, przewidziane jest założenie izolacji cieplnej zmniejszającej wymianę ciepła pomiędzy strumieniami czynnika płynącego w przeciwnych kierunkach w kanałach wewnętrznym i zewnętrznym wymiennika.

W przeprowadzonej analizie uwzględniono następujące warianty wykonania izolacji:

- 1) z izolacją doskonałą rury wewnętrznej na całej jej długości;
- 2) z izolacją w postaci szczeliny powietrznej utworzonej przez nasunięcie na wewnętrzną kolumnę rur ($2\frac{3}{8}$ "") osłony wykonanej z rur stalowych ($4\frac{1}{2}$ "") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_z'' = 114,3$ mm, średnica wewnętrzna $D_w'' = 100,5$ mm, długość całkowita równa długości kolumny wewnętrznej wymiennika;
- 3) z izolacją w postaci warstwy pianki poliuretanowej naniesionej na ograniczony, górny odcinek wewnętrznej kolumny rur ($2\frac{3}{8}$ ""): średnica zewnętrzna $D_z'' = 114,3$ mm, średnica wewnętrzna $D_w'' = 60,3$ mm, długość całkowita 600 m.
- 4) Z izolacją w postaci szczeliny powietrznej utworzonej przez nasunięcie na wewnętrzną kolumnę rur ($2\frac{3}{8}$ "") osłony wykonanej z rur stalowych ($4\frac{1}{2}$ "") o wymiarach: średnica zewnętrzna $D_z'' = 114,3$ mm, średnica wewnętrzna $D_w'' = 100,5$ mm, długość całkowita równa 2870 m.

Szkic wymiennika typu Field (wariant II) z zaznaczonymi głównymi wymiarami przedstawiono na rysunku 4.3.



Rys. 4.3. Schemat wymiennika geotermalnego w otworze kierunkowym JACHÓWKA 2K (wariant II – długość wymiennika $L = 3950 \text{ m}$)

4.1. Właściwości cieplno-fizyczne ośrodka otaczającego otwór wydobywczo-zatłaczający

Ze względu na konieczność wykonania obliczeń symulacyjnych, pozwalających na określenie ilości ciepła możliwego do pozyskania w udostępnionym otworze, niezbędna jest znajomość wybranych danych cieplno-fizycznych warstw geologicznych przewierconych otworem Jachówka 2K. Wartości miąższości warstw geologicznych, ich gęstości objętościowej, współczynnika przewodzenia ciepła i współczynnika przewodzenia temperatury przyjęto na podstawie materiałów udostępnionych przez Polgeotermię sp. z o.o.

Ze względu na nierównomierny rozkład (miąższość) poszczególnych warstw geologicznych wartości średnie poszczególnych wielkości cieplno-fizycznych określono jako wartości średnie ważone. Elementem decydującym był udział miąższości poszczególnych warstw geologicznych w łącznej grubości zalegania warstw, przy czym zarówno udziały miąższości, jak i grubość warstw odniesiono do wymiarów pozornych wynikających z odchylenia odwiertu od pionu.

W obliczeniach wartości średnich ważonych wykorzystano zależność:

$$\bar{s} = \frac{\sum s_i l_i}{l_c},$$

gdzie: \bar{s} jest średnią ważoną danego parametru cieplno-fizycznego s_i , l_i jest grubością pozorną warstwy geologicznej, zaś $l_c = \sum l_i$ jest sumą grubości wszystkich warstw.

Wyniki obliczeń własności cieplno-fizycznych podano w tablicach w podrozdziałach 4.1 i 4.2. Niezbędne do obliczeń inne wielkości cieplno-fizyczne charakteryzujące złożę, takie jak rozkład temperatur i ciśnień w odwiercie, przyjęto na podstawie danych udostępnionych przez Polgeotermię sp. z o.o., a uzyskanych na podstawie przeprowadzonych pomiarów rzeczywistych. Dane te zostały dołączone do opracowania jako kolejne załączniki.

W myśl opracowanych modeli matematycznych wymiany ciepła w wymiennikach geotermalnych przyjęto liniowy rozkład temperatur górotworu. Określono go przez ekstrapolację wyników pomiarowych przeprowadzonych przez Geofizykę. Równanie to przyjęło następującą postać:

$$T(H) = 7,03 + 0,025H, \quad (4.1)$$

gdzie: H jest długością wymiennika.

Inne niezbędne do obliczeń wielkości fizyczne przyjęto na podstawie dostępnych danych literaturowych [147].

4.2. Obliczenia ilości ciepła geotermalnego możliwego do pozyskania z otworu Jachówka 2K do głębokości 2870 m

Wszystkie warianty obliczeniowe wymiennika typu Field zostały zrealizowane w oparciu o materiał przedstawiony w rozdziale 2. Obliczenia prowadzono dla wybranych strumieni objętościowych wody przepływającej przez wymiennik $\dot{V} = 2, 10, 20$ i $30 \text{ m}^3/\text{h}$, natomiast temperaturę wody zatłaczanej do wymiennika przyjęto na poziomie: $T'_1 = 10, 15, 20$ i 25°C .

Temperatura warstw geologicznych w myśl równania (4.1) na głębokości $L = 2870 \text{ m}$ osiąga $78,78^\circ\text{C}$, natomiast dla $L = 0$ temperatura ta wynosi $7,03^\circ\text{C}$. Zatem liniowa zmiana temperatury w masywie skalnym w funkcji zredukowanej głębokości wyraża się równaniem:

$$T_x = E^* x + F = 71,75x + 7,03 \text{ } [^\circ\text{C}], \quad x = 0 - 1 \quad (4.2)$$

Szczegółowa metodyka obliczeń zostanie przedstawiona tylko dla wariantu zaprezentowanego poniżej. W innych wariantach poda się jedynie wartości wielkości wyjściowych i obliczeniowych końcowych.

4.2.1. Wariant z izolacją doskonałą rury wewnętrznej na całej długości otworu (2870 m)

Przykład obliczeniowy przedstawiono dla $\dot{V} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ oraz $T'_1 = 10^\circ\text{C}$. W tym wariantcie znane są następujące dane:

– geometria wymiennika: $D_z = 0,2445 \text{ m}$, $D_w = 0,2220 \text{ m}$, $d'_z = 0,1143 \text{ m}$, $d_w = 0,0507 \text{ m}$, $L = 2870 \text{ m}$, $\lambda_{stali} = 50,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

– własności cieplno-fizyczne warstw geologicznych (tabela 4.2).

Aby określić współczynnik wnikania ciepła α_{wody1} dla wody płynącej w przestrzeni pierścieniowej wymiennika, potrzebne jest początkowe przyjęcie średniej wartości temperatury wody. W pierwszym przybliżeniu przyjęto, że $T_{f\text{ wody}} = (10 + 60)/2 = 35^\circ\text{C}$, a własności cieplno-fizyczne wynoszą [147]: $\rho_w = 994,1 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\lambda_w = 0,624 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\nu = 0,725 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $c_{p(w)} = 4175,0 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, $\text{Pr} = 4,8$.

Tabela 4.2. Zestawienie własności cieplno-fizycznych warstw geologicznych dla wymiennika typu Field
– wariant I (długość 2870 m)

Lp.	Interwał warstw geologicznych	Mięższość	Gęstość $\rho_s \cdot 10^{-3}$	Współczynnik przewodzenia ciepła λ_s	Współczynnik wyrównywania temperatury $a_s \cdot 10^3$	Ciepło właściwe $c_{p(s)}$
		m	kg/m ³	W/(m·K)	m ² /h	J/(kg·K)
1	0 – 3,0 m	3	1,87	2,4	3,25	1421,64
2	3,0 – 1488,5 m (1490 m)	1487	2,595	2,7	4,18	896,09
3	1488,5 – 1504,0 m (1506 m)	16	2,53	2,182	3,41	910,51
4	1504,0 – 1888,0 m (1890 m)	384	2,4	2,395	3,975	903,77
5	1888,0 – 2231,5 m (2240 m)	350	2,51	2,35	4,18	806,34
6	2231,5 – 2446,0 m (2490 m)	250	2,523	3,027	3,795	1138,11
7	2446,0 – 2454,0 m (2500 m)	10	2,4	3,24	3,5	1388,57
8	2454,0 – 2482,0 m (2535 m)	35	2,478	3,098	3,7	1216,41
9	2482,0 – 2621,0 m (2710 m)	175	2,4	3,24	4,1	1185,36
10	2621,0 – 2708,0 m (2815 m)	105	2,555	3,027	3,8	1122,38
11	2708,0 – 2763,0 m (2870 m)	55	2,4	3,24	3,9	1246,15
	Wartości średnie arytmetyczne	2870 m	2,42	2,81	3,80	1112,30
	Wartości średnie ważone	2870 m	2,53	2,70	4,08	946,14

Zastosowanie wykazanych w rozdziale 3 zależności pozwala na obliczenie:

- średnicy hydraulicznej

$$D_h = 0,1077 \text{ m}, \quad (4.3)$$

- prędkości przepływu wody

$$w = 0,02 \text{ m/s}, \quad (4.4)$$

- liczby Reynoldsa w kanale pierścieniowym

$$\text{Re} = 2901, \quad (4.5)$$

- liczby Nusselta

$$\text{Nu} = 27,63 \quad (4.6)$$

- współczynnika wnikanie ciepła

$$\alpha_{\text{wody}1} = 160,07 \text{ W/(m}^2\text{K)}, \quad (4.7)$$

- zastępczego współczynnika przekazywania ciepła między złożem i wodą płynącą w przestrzeni pierścieniowej

$$\frac{1}{k_z} = 0,1068 \text{ (m}^2\text{K)/W}, \quad (4.8)$$

stąd $k_z = 9,37 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Obliczenie temperatur wody przepływającej przez wymiennik typu Field oraz strumienia wydobywanego ciepła obliczono, wykorzystując model matematyczny zaprezentowany w podrozdziale 2.4.

Strumień pojemności cieplnej wody:

$$\dot{W} = 2305,8 \text{ W/K} \quad (4.9)$$

Zmodyfikowany zastępczy współczynnik przekazywania ciepła między złożem i wodą płynącą w przestrzeni pierścieniowej:

$$k_z^* = 8,13 \quad (4.10)$$

Temperatura wody w punkcie zwrotnym wymiennika:

$$T_1'' = T_2 = 69,96^\circ\text{C}$$

Jak wynika z obliczeń, przyjęta średnia temperatura wody na poziomie 35°C jest zbyt niska i uległa zmianie: $T_{f\text{ wody}} = (10 + 69,96)/2 \cong 40^\circ\text{C}$. W związku z tym powtarzamy cykl obliczeń, przyjmując parametry cieplno-fizyczne wody dla 40°C . Uzyskamy wówczas następujące wartości poszczególnych wielkości:

$$\text{Re} = 3197, \quad (4.5a)$$

$$\text{Nu} = 28,35, \quad (4.6a)$$

$$\alpha_{\text{wody}1} = 166,64 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}), \quad (4.7a)$$

$$\frac{1}{k_z} = 0,1065 \text{ (m}^2\text{K)/W} \quad (4.8a)$$

stąd $k_z = 9,39 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;

$$\dot{W} = 2301,4 \text{ W/K}, \quad (4.9a)$$

$$k_z^* = 8,15 \quad (4.10a)$$

Korekta ta powoduje, że temperatura wody na wyjściu z wymiennika ciepła wynosi $T_1'' = T_2 = 69,98^\circ\text{C}$.

Strumień wydobywanego ciepła wynosi:

$$\dot{Q} = 138,03 \text{ kW} \quad (4.11)$$

Zestawienie danych wyjściowych i obliczonych interesujących nas wielkości fizycznych podano w tabeli 4.3.

4.2.2. Wariant z izolacją w postaci szczeliny powietrznej rury wewnętrznej na całej długości otworu (2870 m)

Metodyka obliczeń tego wariantu wymiennika ciepła zbliżona jest z metodyką wariantu poprzedniego, z tą tylko różnicą, że istnieje konieczność obliczenia współczynnika wnikania ciepła $\alpha_{\text{wody}2}$ dla wody płynącej w rurze wewnętrznej wymiennika oraz współczynnika przenikania ciepła k_w przez przegrodę cylindryczną (podrozdział 3.1). Wykorzystano również model obliczeniowy wymiennika ciepła przedstawiony w podrozdziale 2.4.

Zestawienie danych wyjściowych i interesujących nas wielkości obliczonych podano w tabeli 4.4.

Tabela 4.3. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 2870$ m przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej

Lp.	\dot{V}	Θ'_1	T_1	\dot{W}	k_z^*	T_2	\dot{Q}	Q	
	m ³ /h	K	°C	W/K	–	°C	kW	MWh/a	GJ/a
1	2	2,97	10	2301	9,39	69,98	138,03	1163	4186
2	2	7,97	15	2299	9,39	70,01	126,48	1065	3836
3	2	12,97	20	2297	9,40	70,03	114,92	968	3485
4	2	17,97	25	2295	9,41	70,04	103,39	871	3135
5	10	2,97	10	11561	9,75	44,68	400,97	3378	12160
6	10	7,97	15	11550	9,75	45,63	353,73	2980	10727
7	10	12,97	20	11539	9,75	46,56	306,54	2582	9296
8	10	17,97	25	11518	9,76	47,53	259,51	2186	7870
9	20	2,97	10	23191	9,82	31,67	502,53	4233	15240
10	20	7,97	15	23144	9,83	33,86	436,41	3676	13235
11	20	12,97	20	23123	9,83	36,01	370,08	3118	11223
12	20	17,97	25	23079	9,83	38,16	303,75	2559	9212
13	30	2,97	10	34824	9,85	25,68	546,06	4600	16560
14	30	7,97	15	34751	9,86	28,55	471,05	3968	14285
15	30	12,97	20	34716	9,86	31,40	395,70	3333	12000
16	30	17,97	25	34650	9,86	34,25	320,37	2699	9716
$D_z = 0,2445 \text{ m}, \quad D_w = 0,2220 \text{ m}, \quad d'_z = 0,1143 \text{ m}, \quad d_w = 0,0507 \text{ m}, \quad \lambda_{stali} = 50,3 \text{ W/(m} \cdot \text{K)},$ $E^* = 71,75 \text{ }^\circ\text{C}$									

Tabela 4.4. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 2870$ m przy zastosowaniu izolacji rury wewnętrznej w postaci szczeliny powietrznej

Lp.	\dot{V}	Θ'_1	T_1	\dot{W}	K_z	K_w	T_2	\dot{Q}	Q	
	m ³ /h	K	°C	W/K	W/K	W/K	°C	kW	MWh/a	GJ/a
1	2	2,97	10	2291	9,39	0,91	64,42	124,68	1050	3781
2	2	7,97	15	2288	9,39	0,91	64,53	113,35	955	3438
3	2	12,97	20	2288	9,40	0,91	64,65	102,17	861	3098
4	2	17,97	25	2286	9,41	0,91	64,76	90,91	766	2757
5	10	2,97	10	11529	9,75	0,92	44,23	394,68	3325	11969
6	10	7,97	15	11518	9,75	0,92	45,21	347,93	2931	10551
7	10	12,97	20	11507	9,75	0,92	46,18	301,24	2538	9136
8	10	17,97	25	11496	9,76	0,92	47,16	254,78	2146	7727
9	20	2,97	10	23122	9,82	0,92	31,61	499,76	4210	15156
10	20	7,97	15	23100	9,83	0,92	33,79	434,03	3656	13163
11	20	12,97	20	23079	9,83	0,92	35,94	367,97	3100	11159
12	20	17,97	25	23058	9,83	0,92	38,10	301,95	2544	9157
13	30	2,97	10	34751	9,86	0,92	25,68	545,04	4591	16529
14	30	7,97	15	34716	9,86	0,92	28,53	469,81	3958	14248
15	30	12,97	20	34650	9,86	0,92	31,39	394,57	3324	11966
16	30	17,97	25	34618	9,86	0,92	34,23	319,44	2691	9687
$D_z = 0,2445\text{ m}$, $D_w = 0,2220\text{ m}$, $d'_z = 0,1143\text{ m}$, $d'_w = 0,1005\text{ m}$, $d_z = 0,0603\text{ m}$, $d_w = 0,0507\text{ m}$, $\lambda_{\text{stali}} = 50,3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_{\text{powietrza}} = 0,0268\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $E^* = 71,75\text{ }^\circ\text{C}$										

4.2.3. Wariant z izolacją w postaci pianki poliuretanowej w górnym odcinku rury wewnętrznej na długości 600 m (pozostała część rury wewnętrznej wymiennika o długości 2270 m jest niez izolowana)

Przy obliczaniu tego wariantu wymiennika ciepła posłużono się pewnym uproszczeniem polegającym na potraktowaniu izolacji pianką poliuretanową jako izolacji doskonałej rury we-

wewnętrznej. Skorzystano z obliczeń przeprowadzonych w podrozdziale 4.2.1 i na ich podstawie określono na głębokości 600 m temperaturę warstwy skalnej $T_{x(600\text{m})}$ oraz temperaturę wody w przestrzeni pierścieniowej wymiennika $T_{1(600\text{m})}$. W dalszej części do obliczeń brano część niezaizolowaną o długości 2270 m, wprowadzając nowy układ współrzędnych i jednocześnie modyfikując równanie opisujące zmianę temperatury warstw geologicznych: na długości $L_{(x=2870\text{m})} = 2270\text{ m}$ temperatura skał osiąga $78,78^{\circ}\text{C}$, natomiast dla $L_{(x=600\text{m})} = 0$ temperatura ta wynosi $22,03^{\circ}\text{C}$. Zatem liniowa zmiana temperatury w masywie skalnym w funkcji zredukowanej głębokości dla wymiennika o długości 2270 m wyraża się równaniem:

$$T_x = E^* x + F = 56,75x + 22,03^{\circ}\text{C}, \quad x = 0 - 1 \quad (4.12)$$

Dla tej części wymiennika ciepła zastosowano model matematyczny omówiony szczegółowo w podrozdziale 2.1. Obliczona temperatura wody wypływającej z rury wewnętrznej wymiennika T_2 (długość $L_{(x=600\text{m})} = 0$) jest maksymalną temperaturą, którą jesteśmy w stanie uzyskać przy idealnym zaizolowaniu rury wewnętrznej wymiennika typu Field na długości 600 m. W rzeczywistości przy izolacji pianką poliuretanową temperatura ta będzie o około 1–2 stopnie mniejsza.

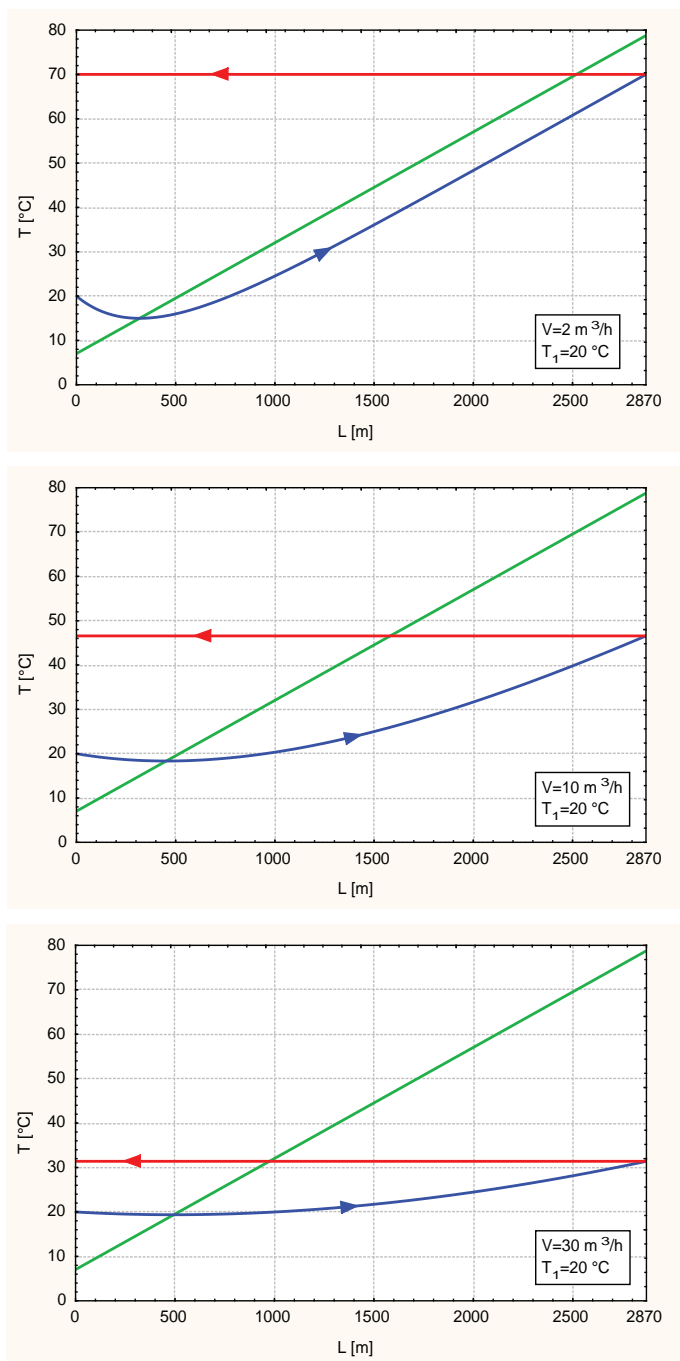
Zestawienie danych wyjściowych i interesujących nas wielkości obliczonych podano w tabeli 4.5.

W tabelach 4.3 – 4.5 obliczenia ilości energii Q uzyskanej w ciągu roku z ujęcia geotermalnego przeprowadzono dla okresu pracy instalacji równego 351 dni, co odpowiada 8424 godzinom. Założono, że w ciągu roku instalacja nie pracuje przez 14 dni (prace konserwacyjne oraz remontowe).

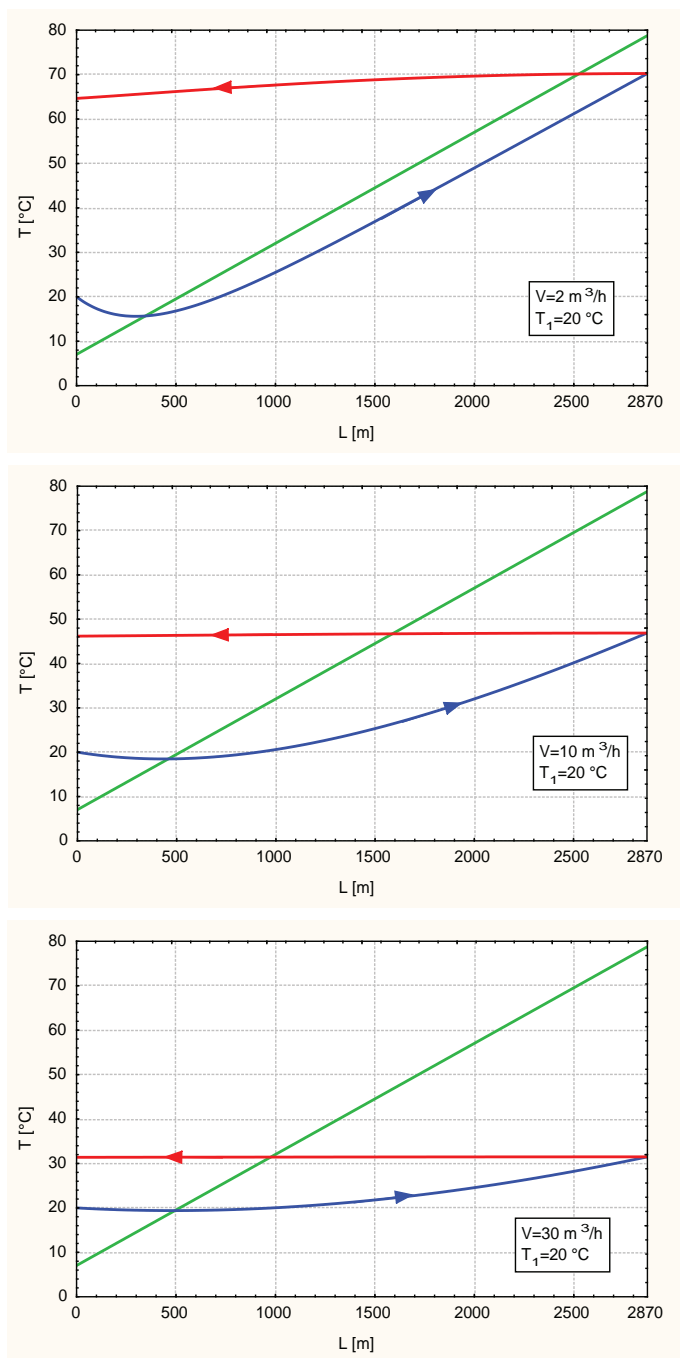
Wybrane wykresy ilustrujące poszczególne warianty przedstawiają rysunki 4.4 – 4.6.

Tabela 4.5. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 2870$ m przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na rurze wewnętrznej na długości 600 m

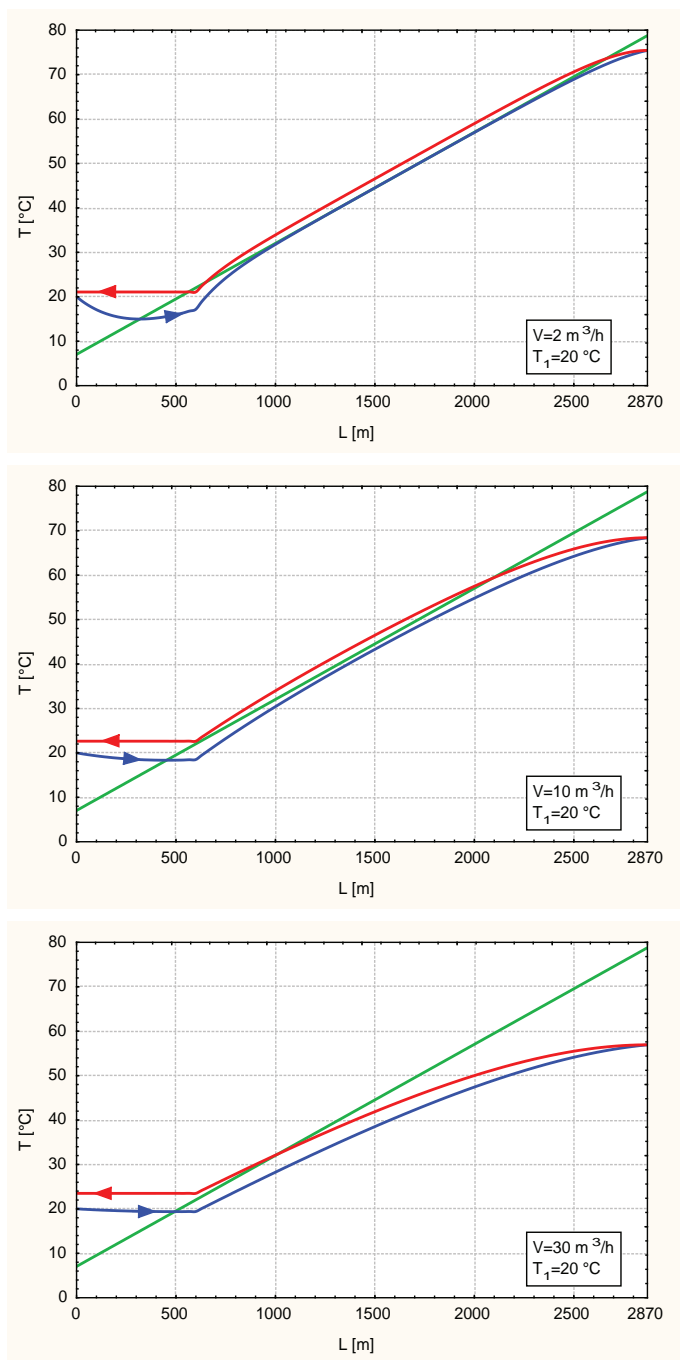
Lp.	\dot{V}	Θ'_1	T_1	\dot{W}	K_z	K_w	Θ'_1 ($L=600$ m)	T_2	\dot{Q}	Q	
	m ³ /h	K	°C	W/K	W/K	W/K	K	°C	kW	MWh/a	GJ/a
1	2	2,97	10	2295	9,40	173,00	-6,65	20,01	22,98	194	697
2	2	7,97	15	2295	9,40	173,00	-5,57	20,57	12,77	108	387
3	2	12,97	20	2295	9,41	176,02	-4,84	21,08	2,48	21	75
4	2	17,97	25	2295	9,41	176,02	-3,94	21,64	-7,72	-65	-234
5	10	2,97	10	11496	9,77	529,74	-10,55	17,39	84,96	716	2577
6	10	7,97	15	11496	9,77	536,98	-7,04	19,98	57,28	483	1737
7	10	12,97	20	11486	9,77	536,98	-3,53	22,63	30,20	254	916
8	10	17,97	25	11486	9,77	544,80	-0,02	25,24	2,70	23	82
9	20	2,97	10	23036	9,84	858,70	-11,26	16,72	154,76	1304	4693
10	20	7,97	15	23013	9,84	874,56	-7,07	20,01	115,19	970	3493
11	20	12,97	20	22993	9,84	891,74	-2,89	23,29	75,74	638	2297
12	20	17,97	25	22993,1	9,84	903,51	1,3	26,63	37,37	315	1133
13	30	2,97	10	34586,4	9,87	1127,72	-11,51	16,27	216,79	1826	6574
14	30	7,97	15	34553,3	9,87	1151,74	-7,07	19,87	168,19	1416	5101
15	30	12,97	20	34520,3	9,87	1175,24	-2,63	23,48	120,23	1013	3646
16	30	17,97	25	34489,6	9,87	1197,66	1,81	27,11	72,93	614	2212
$D_z = 0,2445$ m, $D_w = 0,2220$ m, $d'_z = 0,1143$ m, $d'_w = 0,1005$ m, $d_z = 0,0603$ m, $d_w = 0,0507$ m, $\lambda_{stali} = 50,3$ W/(m·K), $E^* = 56,75$ °C, $K_{w(L=0÷600\text{ m})} = 0$											



Rys. 4.4. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej



Rys. 4.5. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji w formie szczeliny powietrznej rury wewnętrznej



Rys. 4.6. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na 600 m

W tabeli 4.6 oraz 4.7 zestawiono moce cieplne wymiennika dla różnych czasów eksploatacji: 24 h, 100 h, 225 dni (przyjęty czas trwania sezonu ogrzewczego), rok, 10 i 30 lat.

Tabela 4.6. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego

V	T ₁	T ₂	Q	T ₁	T ₂	Q	Czas eksploatacji
m ³ /h	°C	°C	kW	°C	°C	kW	
2	10	72,95	143,02	25	72,97	108,99	24 h
2	10	70,00	138,08	25	70,04	103,39	100 h
2	10	64,75	126,11	25	64,90	91,66	225 dni
2	10	64,12	124,67	25	64,28	90,23	rok
2	10	60,88	117,31	25	61,25	83,36	10 lat
2	10	59,57	113,20	25	60,01	79,95	30 lat
10	10	53,06	496,86	25	54,30	337,16	24 h
10	10	44,68	400,97	25	47,53	259,51	100 h
10	10	35,05	290,14	25	40,47	178,54	225 dni
10	10	34,22	280,52	25	39,88	171,65	rok
10	10	30,54	238,14	25	37,41	143,28	10 lat
10	10	29,24	222,28	25	36,49	132,69	30 lat
20	10	39,16	674,94	25	43,40	424,21	24 h
20	10	31,67	502,53	25	38,16	303,75	100 h
20	10	24,51	336,93	25	33,50	196,37	225 dni
20	10	23,93	323,46	25	33,14	187,99	rok
20	10	21,54	268,12	25	31,66	154,03	10 lat
20	10	20,67	247,87	25	31,13	141,80	30 lat
30	10	31,84	759,65	25	38,27	459,41	24 h
30	10	25,68	546,06	25	34,25	320,37	100 h
30	10	20,19	355,18	25	30,85	202,73	225 dni
30	10	19,76	340,26	25	30,59	193,81	rok
30	10	18,02	279,59	25	29,55	157,94	10 lat
30	10	17,37	257,15	25	29,18	145,14	30 lat

Tabela 4.7. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego

V	T ₁	T ₂	Q	T ₁	T ₂	Q	Czas eksploatacji
m ³ /h	°C	°C	kW	°C	°C	kW	
2	10	66,99	130,41	25	67,28	96,56	24 h
2	10	64,42	124,68	25	64,76	90,91	100 h
2	10	59,77	114,15	25	60,37	80,94	225 dni
2	10	59,23	112,90	25	59,84	79,74	rok
2	10	56,42	106,54	25	57,30	74,00	10 lat
2	10	55,14	103,62	25	56,16	71,46	30 lat
10	10	52,39	487,29	25	53,72	329,65	24 h
10	10	44,23	394,68	25	47,16	254,78	100 h
10	10	34,83	286,73	25	40,29	176,12	225 dni
10	10	33,99	277,40	25	39,70	169,44	rok
10	10	30,38	235,86	25	37,29	141,68	10 lat
10	10	29,05	220,46	25	36,38	131,32	30 lat
20	10	39,03	670,05	25	43,28	420,79	24 h
20	10	31,61	499,76	25	38,10	301,95	100 h
20	10	24,48	335,77	25	33,46	195,61	225 dni
20	10	23,90	322,39	25	33,11	187,28	rok
20	10	21,52	267,38	25	31,65	153,53	10 lat
20	10	20,65	247,24	25	31,12	141,38	30 lat
30	10	31,82	756,65	25	38,23	457,56	24 h
30	10	25,68	545,04	25	34,23	319,44	100 h
30	10	20,18	354,59	25	30,84	202,34	225 dni
30	10	19,76	339,71	25	30,58	193,46	rok
30	10	18,01	279,24	25	29,55	157,71	10 lat
30	10	17,37	256,84	25	29,18	144,94	30 lat

W tabeli 4.87 i 4.9 zestawiono ilość energii geotermicznej możliwej do uzyskania z wymiennika wyrażonej w GJ i t.p.u. przez okres eksploatacji wynoszący 24 h, rok, 10 i 30 lat. Za podstawę obliczeń przyjęto strumienie ciepła uzyskanego po 100 h pracy wymiennika.

Tabela 4.8. Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego

T_1	T_2	V	Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania Q							
			24 h	rok	10 lat	30 lat	24 h	rok	10 lat	30 lat
°C	°C	m ³ /h	GJ				t.p.u.			
10	64,42	2	11	3781	37811	113433	$368 \cdot 10^{-3}$	129	$129 \cdot 10$	$387 \cdot 10$
15	64,53	2	10	3438	34376	103127	$334 \cdot 10^{-3}$	117	$117 \cdot 10$	$352 \cdot 10$
20	64,65	2	9	3099	30986	92957	$301 \cdot 10^{-3}$	106	$106 \cdot 10$	$317 \cdot 10$
25	64,76	2	8	2757	27569	82706	$268 \cdot 10^{-3}$	$941 \cdot 10^{-1}$	941	$282 \cdot 10$
10	44,23	10	34	11969	119693	359080	$116 \cdot 10^{-2}$	409	$409 \cdot 10$	$123 \cdot 10^2$
15	45,21	10	30	10552	105515	316546	$103 \cdot 10^{-2}$	360	$360 \cdot 10$	$108 \cdot 10^2$
20	46,18	10	26	9135	91354	274062	$888 \cdot 10^{-3}$	312	$312 \cdot 10$	$935 \cdot 10$
25	47,16	10	22	7727	77266	231799	$751 \cdot 10^{-3}$	264	$264 \cdot 10$	$791 \cdot 10$
10	31,61	20	43	15156	151559	454678	$147 \cdot 10^{-2}$	517	$517 \cdot 10$	$155 \cdot 10^2$
15	33,79	20	38	13163	131627	394881	$128 \cdot 10^{-2}$	449	$449 \cdot 10$	$135 \cdot 10^2$
20	35,94	20	32	11159	111592	334775	$108 \cdot 10^{-2}$	381	$381 \cdot 10$	$114 \cdot 10^2$
25	38,10	20	26	9157	91570	274711	$890 \cdot 10^{-3}$	313	$313 \cdot 10$	$938 \cdot 10$
10	25,68	30	47	16529	165292	495876	$161 \cdot 10^{-2}$	564	$564 \cdot 10$	$169 \cdot 10^2$
15	28,53	30	41	14248	142476	427429	$139 \cdot 10^{-2}$	486	$486 \cdot 10$	$146 \cdot 10^2$
20	31,39	30	34	11966	119659	358977	$116 \cdot 10^{-2}$	408	$408 \cdot 10$	$123 \cdot 10^2$
25	34,23	30	28	9687	96874	290622	$942 \cdot 10^{-3}$	331	$331 \cdot 10$	$992 \cdot 10$

Tabela 4.9. Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego

T_1	T_2	V	Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania Q							
			24 h	rok	10 lat	30 lat	24 h	rok	10 lat	30 lat
°C	°C	m ³ /h	GJ				t.p.u.			
10	70,00	2	12	4187	41874	125621	$407 \cdot 10^{-3}$	143	$143 \cdot 10$	$429 \cdot 10$
15	70,01	2	11	3836	38356	115069	$373 \cdot 10^{-3}$	131	$131 \cdot 10$	$393 \cdot 10$
20	70,03	2	10	3485	34852	104555	$339 \cdot 10^{-3}$	119	$119 \cdot 10$	$357 \cdot 10$
25	70,04	2	9	3135	31355	94065	$305 \cdot 10^{-3}$	107	$107 \cdot 10$	$321 \cdot 10$
10	44,68	10	35	12160	121600	364800	$118 \cdot 10^{-2}$	415	$415 \cdot 10$	$125 \cdot 10^2$
15	45,63	10	31	10727	107272	321816	$104 \cdot 10^{-2}$	366	$366 \cdot 10$	$110 \cdot 10^2$
20	46,56	10	26	9296	92961	278884	$904 \cdot 10^{-3}$	317	$317 \cdot 10$	$952 \cdot 10$
25	47,53	10	22	7870	78701	236103	$765 \cdot 10^{-3}$	269	$269 \cdot 10$	$806 \cdot 10$
10	31,67	20	43	15240	152399	457198	$148 \cdot 10^{-2}$	520	$520 \cdot 10$	$156 \cdot 10^2$
15	33,86	20	38	13235	132347	397042	$129 \cdot 10^{-2}$	452	$452 \cdot 10$	$136 \cdot 10^2$
20	36,01	20	32	11223	112231	336693	$109 \cdot 10^{-2}$	383	$383 \cdot 10$	$115 \cdot 10^2$
25	38,16	20	26	9212	92115	276346	$896 \cdot 10^{-3}$	314	$314 \cdot 10$	$943 \cdot 10$
10	25,68	30	47	16560	165600	496799	$161 \cdot 10^{-2}$	565	$565 \cdot 10$	$170 \cdot 10^2$
15	28,55	30	41	14285	142851	428553	$139 \cdot 10^{-2}$	488	$488 \cdot 10$	$146 \cdot 10^2$
20	31,40	30	34	12000	120003	360008	$117 \cdot 10^{-2}$	410	$410 \cdot 10$	$123 \cdot 10^2$
25	34,25	30	28	9716	97158	291474	$945 \cdot 10^{-3}$	332	$332 \cdot 10$	$995 \cdot 10$

4.3. Obliczenia ilości ciepła geotermalnego możliwego do pozyskania z otworu Jachówka 2K do głębokości 3950 m

Wszystkie warianty obliczeniowe wymiennika typu Field zostały zrealizowane w oparciu o materiał przedstawiony w rozdziale 2. Obliczenia prowadzono dla wybranych strumieni objętościowych wody przepływającej przez wymiennik wynoszących $\dot{V} = 2, 10, 20$ i $30 \text{ m}^3/\text{h}$, natomiast temperaturę wody zatłaczanej do wymiennika przyjęto na poziomie: $T'_1 = 10, 15, 20$ i 25°C .

W tym wariancie temperatura warstw geologicznych w myśl równania (4.1) na głębokości $L = 3950 \text{ m}$ osiąga $105,78^\circ\text{C}$, natomiast dla $L = 0$ temperatura ta wynosi $7,03^\circ\text{C}$. Zatem liniowa zmiana temperatury w masywie skalnym w funkcji zredukowanej głębokości wyraża się równaniem:

$$T_x = E^* x + F = 98,75x + 7,03 \text{ } [^\circ\text{C}], \quad x = 0 - 1 \quad (4.13)$$

Geometria wymiennika jest następująca:

- na długości do 2870 m: $D_z = 0,2445 \text{ m}$, $D_w = 0,2220 \text{ m}$, $d'_z = 0,1143 \text{ m}$, $d_w = 0,0507 \text{ m}$, $\lambda_{stali} = 50,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- na długości od 2870 do 3950 m: $D_z = 0,1778 \text{ m}$, $D_w = 0,1571 \text{ m}$, $d'_z = 0,1143 \text{ m}$, $d_w = 0,0507 \text{ m}$, $\lambda_{stali} = 50,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;
- własności cieplno-fizyczne warstw geologicznych (tabela 4.10).

Aby przeprowadzić obliczenia według przygotowanych modeli matematycznych wymiennika typu Field (rozdział 2), do obliczeń przyjęto zastępczą średnicę zewnętrzną $D_{z \text{ zast}}$ i wewnętrzną $D_{w \text{ zast}}$ korpusu wymiennika. Średnice obliczono jako średnie ważone do długości wymiennika i wynoszą one: $D_{z \text{ zast}} = 0,2263 \text{ m}$, $D_{w \text{ zast}} = 0,2043 \text{ m}$.

Tabela 4.10. Zestawienie własności cieplno-fizycznych warstw geologicznych dla wymiennika typu Field – wariant II (długość 3950m)

Lp.	Interwał warstw geologicznych	Miąższość	Gęstość $\rho_s \cdot 10^{-3}$	Współczynnik przewodzenia λ_s	Współczynnik wyrównywania temperatury $\alpha_s \cdot 10^3$	Ciepło właściwe $c_{p(s)}$
		m	kg/m ³	W/(m·K)	m ² /h	J/(kg·K)
1	2	3	4	5	6	7
1	0 – 3,0 m	3	1,87	2,4	3,25	1421,64
2	3,0 – 1488,5 m (1490 m)	1487	2,595	2,7	4,18	896,09
3	1488,5 – 1504,0 m (1506 m)	16	2,53	2,182	3,41	910,51
4	1504,0 – 1888,0 m (1890 m)	384	2,4	2,395	3,975	903,77
5	1888,0 – 2231,5 m (2240 m)	350	2,51	2,35	4,18	806,34
6	2231,5 – 2446,0 m (2490 m)	250	2,523	3,027	3,795	1138,11
7	2446,0 – 2454,0 m (2500 m)	10	2,4	3,24	3,5	1388,57
8	2454,0 – 2482,0 m (2535 m)	35	2,478	3,098	3,7	1216,41
9	2482,0 – 2621,0 m (2710 m)	175	2,4	3,24	4,1	1185,37
10	2621,0 - 2708,0 m (2815 m)	105	2,555	3,027	3,8	1122,38
11	2708,0 – 2763,0 m (2880 m)	65	2,4	3,24	3,9	1246,15

c.d. tabeli 4.10

1	2	3	4	5	6	7
12	2763,0 - 2900,0 m (3040 m)	160	2,527	3,027	3,97	1086,22
13	2900,0 – 3140,0 m (3310 m)	270	2,4	3,1	3,8	1223,68
14	3140,0 – 3368,0 m (3548 m)	238	2,306	3,09	3,9	1236,91
15	3368,0 – 3463,0 m (3642 m)	94	2,575	2,605	3,75	971,18
16	3463,0 – 3547,0 m (3726 m)	84	2,638	2,895	3,75	1053,53
17	3547,0 – 3680,0 m (3862 m)	136	2,638	2,895	3,75	1053,53
18	3680,0 – 3986,0 m (3950 m)	88	2,698	2,895	3,75	1030,10
	Wartości średnie arytmetyczne	3950 m	2,47	2,86	3,80	1105,03
	Wartości średnie ważone	3950 m	2,519	2,781	4,013	997,509

4.3.1. Wariant z izolacją doskonałą rury wewnętrznej na całej długości otworu (3950 m)

Metodyka obliczeń dla tego wariantu jest identyczna jak w przypadku wariantu omawianego w podrozdziale 4.2.1.

Zestawienie danych wyjściowych i interesujących nas wielkości obliczonych podano w tabeli 4.11.

Tabela 4.11. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej

Lp.	\dot{V}	Θ'_1	T_1	\dot{W}	k_z^*	T_2	\dot{Q}	Q	
–	m ³ /h	K	°C	W/K	–	°C	kW	MWh/a	GJ/a
1	2	2,97	10	2291,0	10,26	97,08	199,50	1681	6050
2	2	7,97	15	2288,5	10,27	97,10	187,88	1583	5698
3	2	12,97	20	2286,1	10,28	97,12	176,30	1485	5347
4	2	17,97	25	2283,8	10,28	97,13	164,72	1388	4995
5	10	2,97	10	11506,8	10,64	67,97	667,10	5620	20231
6	10	7,97	15	11496,5	10,64	68,48	614,82	5179	18645
7	10	12,97	20	11486,3	10,62	68,93	562,05	4735	17045
8	10	17,97	25	11476,9	10,63	69,46	510,21	4298	15473
9	20	2,97	10	23100,2	10,68	48,54	890,23	7499	26997
10	20	7,97	15	23078,9	10,68	50,11	810,29	6826	24573
11	20	12,97	20	23057,6	10,69	51,70	730,91	6157	22166
12	20	17,97	25	23013,5	10,69	53,28	650,90	5483	19739
13	30	2,97	10	34715,7	10,71	38,63	993,91	8373	30142
14	30	7,97	15	34683,0	10,71	40,94	899,57	7578	27281
15	30	12,97	20	34618,4	10,71	43,26	805,14	6783	24417
16	30	17,97	25	34586,4	10,71	45,56	710,95	5989	21561
$D_{z\text{ zast}} = 0,2263\text{ m}, \quad D_{w\text{ zast}} = 0,2043\text{ m}, \quad d'_z = 0,1143\text{ m}, \quad d_w = 0,0507\text{ m}, \quad E^* = 98,75^\circ\text{C}$ $\lambda_{\text{stali}} = 50,3\text{ W/(m}\cdot\text{K)},$									

4.3.2. Wariant z izolacją w postaci szczeliny powietrznej rury wewnętrznej na całej długości otworu (3950 m)

Metodyka obliczeń jest identyczna jak w przypadku wariantu omawianego w pkt. 4.2.2.

Zestawienie danych wyjściowych i interesujących nas wielkości obliczonych podano w tabeli 4.12.

Tabela 4.12. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu izolacji rury wewnętrznej w postaci szczeliny powietrznej

Lp.	\dot{V}	Θ'_1	T_1	\dot{W}	K_z	K_w	T_2	\dot{Q}	Q	
–	m ³ /h	K	°C	W/K	W/K	W/K	°C	kW	MWh/a	GJ/a
1	2	2,97	10	2272	10,26	0,91	86,30	173,35	1460	5257
2	2	7,97	15	2269	10,27	0,91	86,41	162,05	1365	4914
3	2	12,97	20	2269	10,28	0,91	86,52	150,96	1272	4578
4	2	17,97	25	2267	10,28	0,91	86,63	139,69	1177	4236
5	10	2,97	10	11455	10,62	0,92	66,72	649,74	5473	19704
6	10	7,97	15	11442	10,62	0,92	67,28	598,24	5040	18142
7	10	12,97	20	11431	10,62	0,92	67,84	546,84	4607	16584
8	10	17,97	25	11431	10,63	0,92	68,39	496,02	4178	15042
9	20	2,97	10	23013	10,68	0,92	48,32	881,91	7429	26745
10	20	7,97	15	22993	10,68	0,92	49,90	802,55	6761	24338
11	20	12,97	20	22973	10,69	0,92	51,50	723,74	6097	21948
12	20	17,97	25	22954	10,69	0,92	53,08	644,48	5429	19545
13	30	2,97	10	34618	10,71	0,92	38,57	989,17	8333	29998
14	30	7,97	15	34586	10,71	0,92	40,88	895,20	7541	27148
15	30	12,97	20	34553	10,71	0,92	43,19	801,28	6750	24300
16	30	17,97	25	34520	10,71	0,92	45,49	707,42	5959	21453
$D_{z\text{ zast}} = 0,2263\text{ m}, D_{w\text{ zast}} = 0,2043\text{ m}, d'_z = 0,1143\text{ m}, d_w = 0,0507\text{ m}, \lambda_{\text{stali}} = 50,3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}),$ $\lambda_{\text{powietrza}} = 0,0268\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}), E^* = 98,75^\circ\text{C}$										

4.3.3. Wariant z izolacją w postaci pianki poliuretanowej w górnym odcinku rury wewnętrznej na długości 600 m (pozostała część rury wewnętrznej wymiennika o długości 3350 m jest nieizolowana)

Metodyka obliczeń jest identyczna jak w przypadku wariantu omawianego w podrozdziale 4.2.3. Skorzystano z obliczeń przeprowadzonych w podrozdziale 4.3.1 i na ich podstawie

określono na głębokości 600 m temperaturę warstwy skalnej $T_{x(600\text{m})}$ oraz temperaturę wody w przestrzeni pierścieniowej wymiennika $T_{1(600\text{m})}$.

W dalszej części do obliczeń brano część niez izolowaną o długości 3350 m, wprowadzając nowy układ współrzędnych i jednocześnie modyfikując równanie opisujące zmianę temperatury warstw geologicznych do postaci:

$$T_x = E^* x + F = 83,75x + 22,03 \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad x = 0 - 1 \quad (4.14)$$

Dla tej części wymiennika ciepła zastosowano model matematyczny omówiony w podrozdziale 2.1 (jeżeli temperatura wody na głębokości 600 m $T_{1(600\text{m})}$ jest mniejsza od temperatury górotworu $T_{x(600\text{m})}$) lub omówiony w podrozdziale 2.2 (jeżeli $T_{1(600\text{m})} > T_{x(600\text{m})}$). Obliczona temperatura wody wypływającej z rury wewnętrznej wymiennika T_2 (długość $L_{(x=600\text{m})} = 0$) jest maksymalną temperaturą, którą jesteśmy w stanie uzyskać przy idealnym zaizolowaniu rury wewnętrznej wymiennika typu Field na długości 600 m. W rzeczywistości przy izolacji pianką poliuretanową temperatura ta będzie o około 1–2 stopnie mniejsza.

Zestawienie danych wyjściowych i interesujących nas wielkości obliczonych podano w tabeli 4.13.

Tabela 4.13. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na rurze wewnętrznej na długości 600 m

Lp.	\dot{V}	Θ'_1	T_1	K_z	K_w	Θ'_1 ($L=600\text{ m}$)	T_2	\dot{Q}	Q	
	m ³ /h	K	°C	W/K	W/K	K	°C	kW	MWh/a	GJ/a
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	2,97	10	10,28	217,5	-6,62	19,39	21,44	181	650
2	2	7,97	15	10,28	217,6	-5,72	19,97	11,34	96	344
3	2	12,97	20	10,28	217,6	-4,83	20,54	1,24	10	38
4	2	17,97	25	10,28	217,6	-3,95	21,11	-8,87	-75	-269
5	10	2,97	10	10,64	706,0	-10,54	16,33	72,40	610	2196
6	10	7,97	15	10,64	706,0	-7,04	19,06	46,43	391	1408
7	10	12,97	20	10,64	717,6	-3,54	21,75	20,03	169	607

cd. tabeli 4.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	10	17,97	25	10,64	727,7	-0,04	24,46	-6,18	-52	-187
9	20	2,97	10	10,70	1143,3	-11,26	15,85	133,95	1128	4062
10	20	7,97	15	10,70	1159,2	-7,07	19,25	97,20	819	2948
11	20	12,97	20	10,70	1175,4	-2,89	22,65	60,68	511	1840
12	20	17,97	25	10,70	1191,3	1,29	26,06	24,32	205	738
13	30	2,97	10	10,72	1494,7	-11,51	15,75	197,83	1667	5999
14	30	7,97	15	10,72	1523,0	-7,07	19,43	152,15	1282	4614
15	30	12,97	20	10,72	1543,4	-2,63	23,13	107,61	907	3263
16	30	17,97	25	10,73	1564,2	1,81	26,85	63,63	536	1930
$D_{z_{zast}} = 0,2263 \text{ m}, \quad D_{w_{zast}} = 0,2043 \text{ m}, \quad d'_z = 0,1143 \text{ m}, \quad d'_w = 0,1005 \text{ m}, \quad d_z = 0,0603 \text{ m},$ $d_w = 0,0507 \text{ m}, \quad \lambda_{stali} = 50,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \quad E^* = 83,75^\circ\text{C}, \quad K_{w(L=0+600 \text{ m})} = 0$										

4.3.4. Wariant z izolacją w postaci szczeliny powietrznej rury wewnętrznej na długości 2870 m (pozostała część rury wewnętrznej wymiennika o długości 1080 m jest niez izolowana)

Metodyka obliczeń jest identyczna jak w przypadku wariantu omawianego w podrozdziale 4.3.3. Skorzystano z obliczeń przeprowadzonych w podrozdziale 4.3.1 i na ich podstawie określono na głębokości 2870 m temperaturę warstwy skalnej $T_{x(2870 \text{ m})}$ oraz temperaturę wody w przestrzeni pierścieniowej wymiennika $T_{i(2870 \text{ m})}$. W dalszej części do obliczeń brano część niez izolowaną o długości 1080 m, wprowadzając nowy układ współrzędnych i jednocześnie modyfikując równanie opisujące zmianę temperatury warstw geologicznych do postaci:

$$T_x = E^* x + F = 27,00x + 22,03 [^\circ\text{C}], \quad x = 0 - 1 \quad (4.15)$$

Dla tej części wymiennika ciepła zastosowano model matematyczny omówiony w podrozdziale 2.1. Obliczona temperatura wody wypływającej z rury wewnętrznej wymiennika T_2 (długość $L_{(x=2870 \text{ m})} = 0$) jest maksymalną możliwą uzyskaną temperaturą, którą jesteśmy w stanie uzyskać przy idealnym zaizolowaniu rury wewnętrznej wymiennika typu Field na dłu-

gości 2870 m. W rzeczywistości przy izolacji szczeliną powietrzną temperatura ta będzie o około 1–6 stopnie mniejsza.

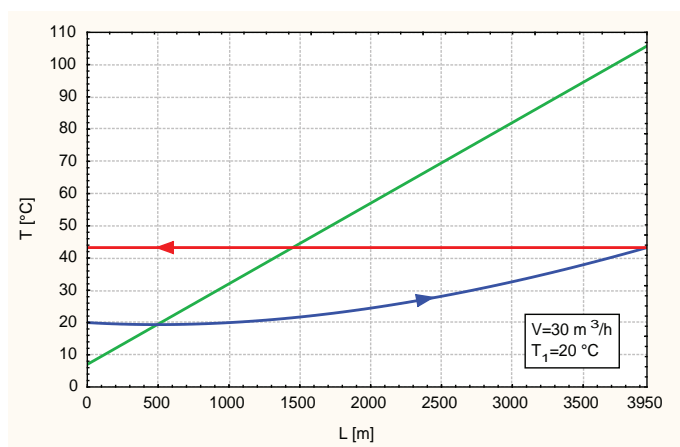
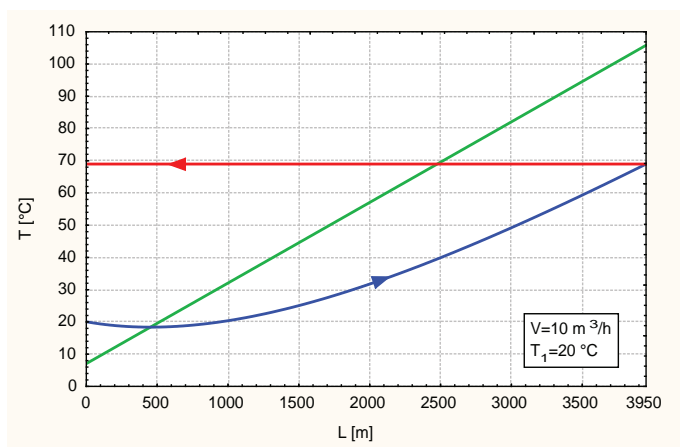
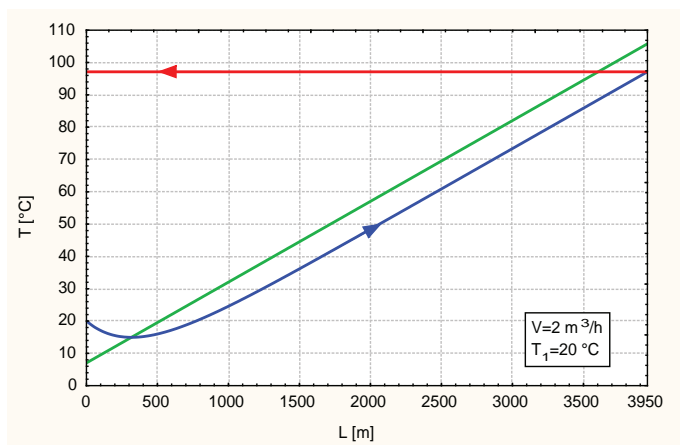
Zestawienie danych wyjściowych i interesujących nas wielkości obliczonych podano w tabeli 4.14.

W tabelach 4.11 – 4.14 obliczenia ilości energii Q uzyskanej w ciągu roku z ujęcia geotermalnego przeprowadzono dla okresu pracy instalacji równego 351 dni, co odpowiada 8424 godzinom. Założono, że w ciągu roku instalacja nie pracuje przez 14 dni (prace konserwacyjne oraz remontowe).

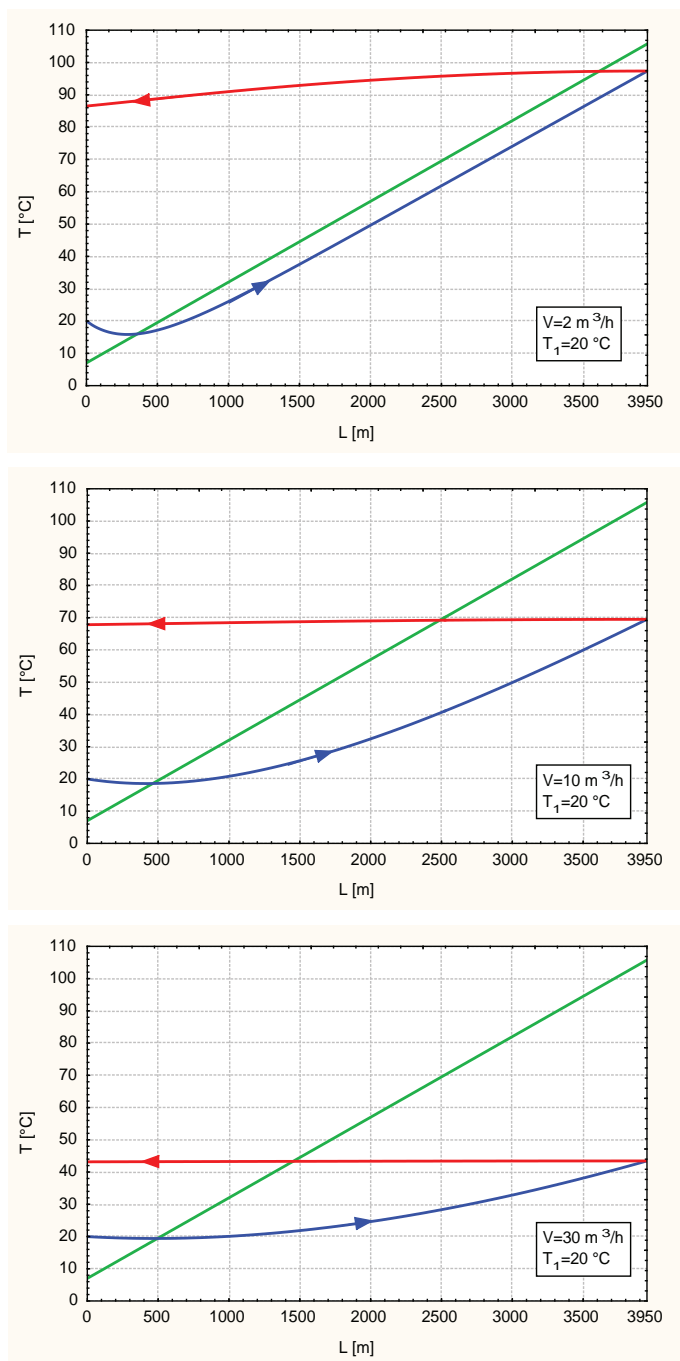
Wybrane wykresy ilustrujące poszczególne warianty przedstawiają rysunki 4.7 – 4.10.

Tabela 4.14. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu izolacji na rurze wewnętrznej w postaci szczeliny powietrznej na długości 2870 m

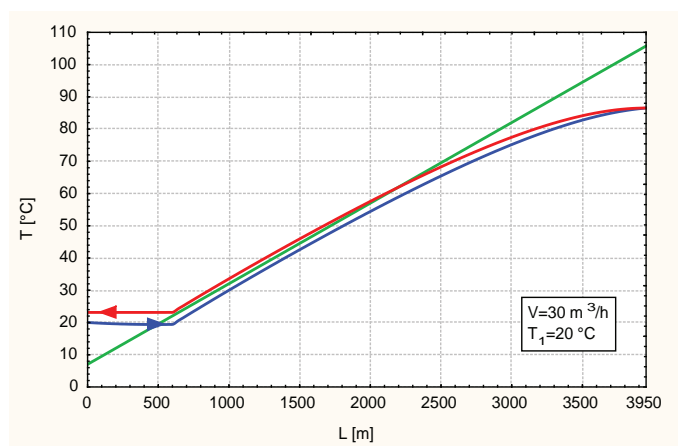
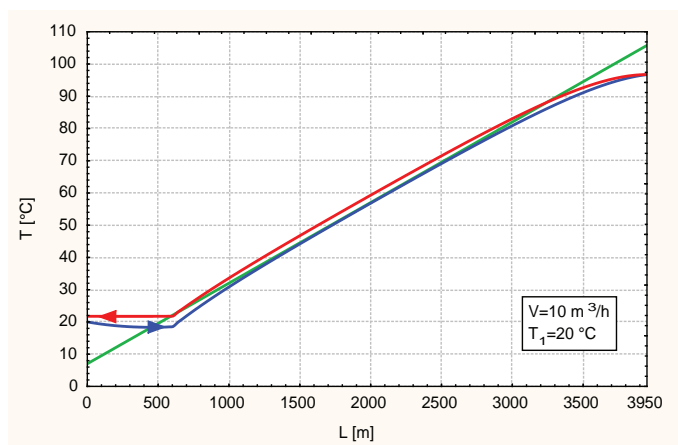
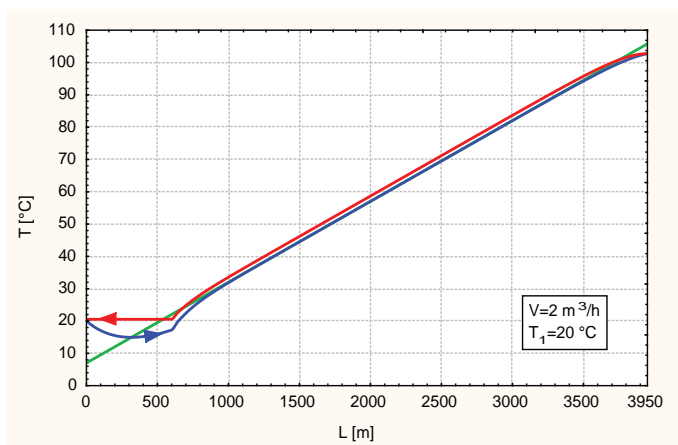
Lp.	\dot{V}	Θ'_1	T_1	K_z	K_w	Θ'_1 <small>$L = 2870$ m</small>	T_2	\dot{Q}	Q	
	m ³ /h	K	°C	W/K	W/K	K	°C	kW	MWh/a	GJ/a
1	2	2,97	10	10,34	246,4	-8,70	74,43	145,4	1225	4409
2	2	7,97	15	10,34	246,4	-8,68	74,44	134,1	1130	4067
3	2	12,97	20	10,34	246,4	-8,66	74,46	122,9	1035	3726
4	2	17,97	25	10,34	246,4	-8,65	74,46	111,6	940	3384
5	10	2,97	10	10,65	773,3	-33,92	53,87	498,3	4198	15112
6	10	7,97	15	10,65	773,3	-32,99	54,60	449,9	3790	13643
7	10	12,9	20	10,65	773,3	-32,10	55,31	401,1	3379	12163
8	10	17,9	25	10,65	773,3	-31,16	56,05	352,7	2971	10697
9	20	2,97	10	10,70	1178,0	-47,04	41,32	716,1	6032	21716
10	20	7,97	15	10,70	1196,4	-44,89	43,07	641,0	5400	19439
11	20	12,9	20	10,70	1196,4	-42,73	44,88	568,1	4786	17228
12	20	17,97	25	10,70	1214,7	-40,58	46,63	493,41	4156	14963
13	30	2,97	10	10,72	1469,0	-53,05	34,61	847,17	7137	25692
14	30	7,97	15	10,72	1497,5	-50,21	37,01	757,32	6380	22967
15	30	12,97	20	10,72	1543,4	-47,36	39,41	666,96	5618	20226
16	30	17,97	25	10,72	1543,4	-44,52	41,87	579,12	4879	17563
$D_{z\text{ zast}} = 0,2263\text{ m}, \quad D_{w\text{ zast}} = 0,2043\text{ m}, \quad d'_z = 0,1143\text{ m}, \quad d'_w = 0,1005\text{ m}, \quad d_z = 0,0603\text{ m},$ $d_w = 0,0507\text{ m}, \quad \lambda_{\text{stali}} = 50,3\text{ W/(m}\cdot\text{K)}, \quad E^* = 27,00^\circ\text{C}, \quad K_{w(L=0+2870\text{ m})} = 0$										



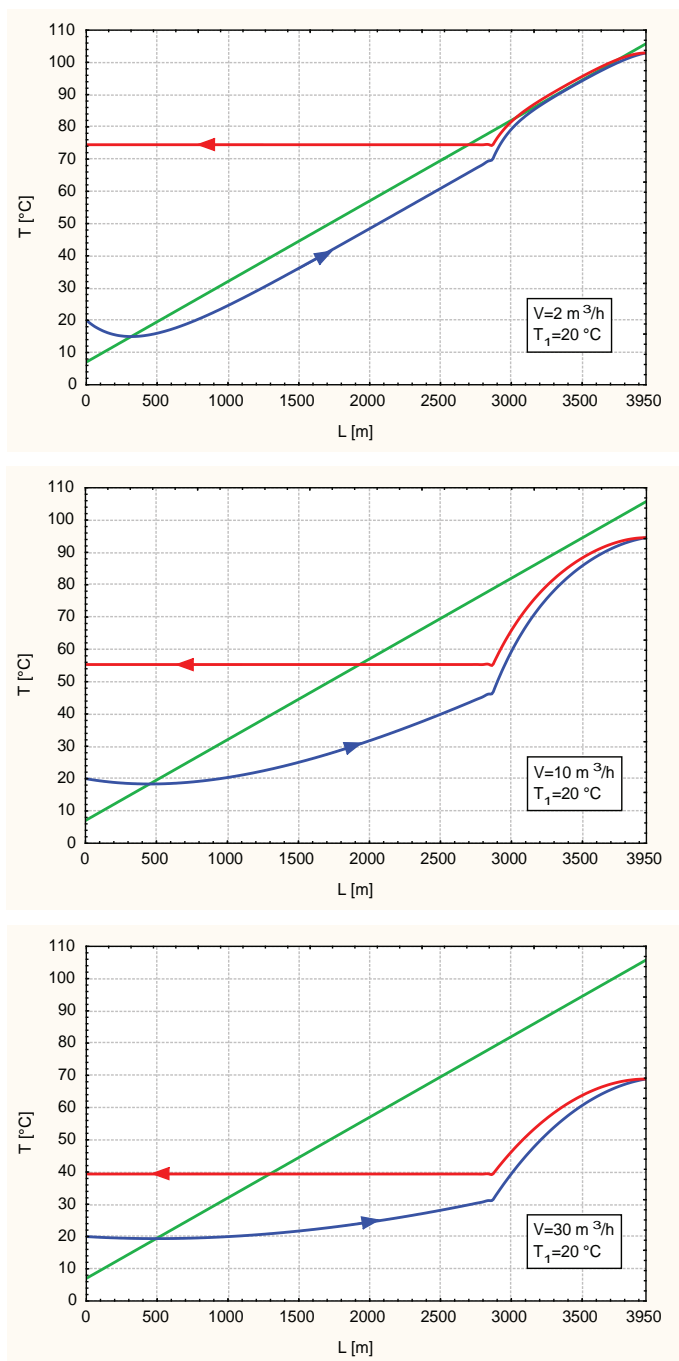
Rys. 4.7. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej



Rys. 4.8. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji w formie szczeliny powietrznej rury wewnętrznej



Rys. 4.9. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na 600 m



Rys. 4.10. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji powietrznej na 2870 m

W tabeli 4.15 – 4.17 zestawiono moce cieplne wymiennika dla różnych czasów eksploatacji: 24 h, 100 h, 225 dni (przyjęty czas trwania sezonu ogrzewczego), rok, 10 i 30 lat.

Tabela 4.15. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego

V	T_1	T_2	Q	T_1	T_2	Q	Czas eksploatacji
m ³ /h	°C	°C	kW	°C	°C	kW	
2	10	99,80	205,50	25	99,81	170,69	24 h
2	10	97,08	199,50	25	97,13	164,72	100 h
2	10	90,56	184,76	25	90,63	150,04	225 dni
2	10	90,23	183,59	25	89,94	148,47	rok
2	10	86,52	175,64	25	86,31	140,30	10 lat
2	10	84,82	171,73	25	84,69	136,61	30 lat
10	10	77,01	759,47	25	77,60	596,14	24 h
10	10	67,97	667,10	25	69,46	510,21	100 h
10	10	51,54	479,81	25	55,67	352,93	225 dni
10	10	50,24	464,73	25	54,66	341,28	rok
10	10	44,61	400,11	25	50,17	289,85	10 lat
10	10	42,56	374,32	25	48,46	270,95	30 lat
20	10	57,92	1095,40	25	60,85	818,73	24 h
20	10	48,54	890,23	25	53,28	650,90	100 h
20	10	34,88	576,47	25	42,74	409,12	225 dni
20	10	33,93	554,44	25	42,02	392,78	rok
20	10	29,96	463,00	25	39,10	325,36	10 lat
20	10	28,55	428,99	25	38,05	300,66	30 lat
30	10	46,62	1269,96	25	51,74	924,00	24 h
30	10	38,63	993,91	25	45,56	710,95	100 h
30	10	27,70	615,87	25	37,44	430,90	225 dni
30	10	26,97	590,82	25	36,74	402,54	rok
30	10	24,01	488,00	25	34,59	332,18	10 lat
30	10	22,94	450,61	25	33,84	306,17	30 lat

Tabela 4.16. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego

V	T_1	T_2	Q	T_1	T_2	Q	Czas eksploatacji
m ³ /h	°C	°C	kW	°C	°C	kW	
2	10	88,40	177,92	25	88,64	144,27	24 h
2	10	86,30	173,35	25	86,63	139,69	100 h
2	10	80,66	160,88	25	81,21	127,71	225 dni
2	10	80,34	160,17	25	80,65	126,44	rok
2	10	77,27	153,33	25	77,72	119,91	10 lat
2	10	75,54	149,39	25	76,43	116,97	30 lat
10	10	75,14	743,78	25	75,91	580,82	24 h
10	10	66,72	649,74	25	68,39	496,02	100 h
10	10	50,95	470,73	25	55,13	345,78	225 dni
10	10	49,66	456,33	25	54,11	334,13	rok
10	10	49,19	451,00	25	49,80	284,88	10 lat
10	10	42,04	369,40	25	48,14	265,98	30 lat
20	10	57,31	1086,75	25	60,38	810,46	24 h
20	10	48,32	881,91	25	53,08	644,48	100 h
20	10	34,79	573,13	25	42,65	406,58	225 dni
20	10	33,85	551,34	25	41,95	390,38	rok
20	10	29,91	460,82	25	39,04	323,73	10 lat
20	10	28,46	427,29	25	37,98	299,32	30 lat
30	10	46,50	1261,35	25	51,64	917,99	24 h
30	10	38,57	989,17	25	45,49	707,42	100 h
30	10	27,67	614,18	25	37,42	429,57	225 dni
30	10	26,95	589,19	25	36,90	411,51	rok
30	10	24,00	486,93	25	34,77	338,16	10 lat
30	10	22,90	448,74	25	34,00	311,67	30 lat

Tabela 4.17. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego na długości 2870 m

V	T_1	T_2	Q	T_1	T_2	Q	Czas eksploatacji
m ³ /h	°C	°C	kW	°C	°C	kW	
2	10	76,54	149,95	25	77,96	119,34	24 h
2	10	74,43	145,37	25	74,46	111,60	100 h
2	10	69,17	133,68	25	69,30	100,09	225 dni
2	10	68,89	133,04	25	68,76	98,86	rok
2	10	65,91	126,45	25	65,99	92,71	10 lat
2	10	64,59	123,46	25	64,77	90,06	30 lat
10	10	60,19	568,90	25	61,25	410,91	24 h
10	10	53,87	498,30	25	56,05	352,74	100 h
10	10	42,64	372,32	25	47,47	256,13	225 dni
10	10	41,78	362,89	25	46,87	249,53	rok
10	10	37,92	319,42	25	44,06	217,63	10 lat
10	10	36,44	302,56	25	42,97	205,20	30 lat
20	10	47,76	860,78	25	51,40	601,00	24 h
20	10	41,32	716,09	25	46,63	493,41	100 h
20	10	31,48	493,55	25	39,64	335,41	225 dni
20	10	30,76	476,82	25	39,13	324,05	rok
20	10	27,69	407,17	25	37,01	275,61	10 lat
20	10	26,56	381,44	25	36,24	258,23	30 lat
30	10	45,41	1220,23	25	46,05	721,11	24 h
30	10	34,61	847,17	25	41,87	579,12	100 h
30	10	26,06	555,57	25	35,94	376,94	225 dni
30	10	25,29	530,81	25	35,52	362,66	rok
30	10	23,86	481,67	25	33,82	304,32	10 lat
30	10	22,88	447,59	25	33,19	282,56	30 lat

W tabeli 4.18–4.20 zestawiono ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania z wymiennika wyrażonej w GJ i t.p.u. przez okres eksploatacji wynoszący 24 h, rok, 10 i 30 lat. Za podstawę obliczeń przyjęto strumień ciepła uzyskanego po 100 h pracy wymiennika.

Tabela 4.18. Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego

T_1	T_2	V	Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania Q							
			24 h	rok	10 lat	30 lat	24 h	rok	10 lat	30 lat
°C	°C	m ³ /h	GJ				t.p.u.			
10	97,08	2	17	6050	60501	181504	$588 \cdot 10^{-3}$	206	206·10	619·10
15	97,10	2	16	5698	56977	170932	$554 \cdot 10^{-3}$	194	194·10	583·10
20	97,12	2	15	5346	53464	160393	$520 \cdot 10^{-3}$	182	182·10	547·10
25	97,13	2	14	4995	49953	149858	$486 \cdot 10^{-3}$	170	170·10	511·10
10	67,97	10	58	20231	202309	606926	$197 \cdot 10^{-2}$	690	690·10	207·10 ²
15	68,48	10	53	18645	186452	559357	$181 \cdot 10^{-2}$	636	636·10	191·10 ²
20	68,93	10	49	17045	170449	511347	$166 \cdot 10^{-2}$	582	582·10	175·10 ²
25	69,46	10	44	15473	154728	464183	$150 \cdot 10^{-2}$	528	528·10	158·10 ²
10	48,54	20	77	26997	269974	809922	$263 \cdot 10^{-2}$	921	921·10	276·10 ²
15	50,11	20	70	24573	245730	737191	$239 \cdot 10^{-2}$	839	839·10	252·10 ²
20	51,70	20	63	22166	221658	664973	$216 \cdot 10^{-2}$	757	757·10	227·10 ²
25	53,28	20	56	19739	197395	592185	$192 \cdot 10^{-2}$	674	674·10	202·10 ²
10	38,63	30	86	30142	301418	904254	$293 \cdot 10^{-2}$	103·10	103·10 ²	309·10 ²
15	40,94	30	78	27281	272807	818422	$265 \cdot 10^{-2}$	931	931·10	279·10 ²
20	43,26	30	70	24417	244171	732513	$237 \cdot 10^{-2}$	833	833·10	250·10 ²
25	45,56	30	61	21561	215606	646819	$210 \cdot 10^{-2}$	736	736·10	221·10 ²

Tabela 4.19. Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego

T_1	T_2	V	Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania Q							
			24 h	rok	10 lat	30 lat	24 h	rok	10 lat	30 lat
°C	°C	m ³ /h	GJ				t.p.u.			
10	86,30	2	15	5257	52570	157709	$511 \cdot 10^{-3}$	179	179·10	538·10
15	86,41	2	14	4915	49145	147436	$478 \cdot 10^{-3}$	168	168·10	503·10
20	86,52	2	13	4578	45782	137345	$445 \cdot 10^{-3}$	156	156·10	469·10
25	86,63	2	12	4236	42364	127093	$412 \cdot 10^{-3}$	145	145·10	434·10
10	66,72	10	56	19704	197043	591130	$192 \cdot 10^{-2}$	673	673·10	202·10 ²
15	67,28	10	52	18142	181424	544271	$176 \cdot 10^{-2}$	619	619·10	186·10 ²
20	67,84	10	47	16584	165836	497507	$161 \cdot 10^{-2}$	566	566·10	170·10 ²
25	68,39	10	43	15042	150424	451271	$146 \cdot 10^{-2}$	513	513·10	154·10 ²
10	48,32	20	76	26745	267451	802353	$260 \cdot 10^{-2}$	913	913·10	274·10 ²
15	49,90	20	69	24338	243383	730150	$237 \cdot 10^{-2}$	831	831·10	249·10 ²
20	51,50	20	63	21948	219483	658450	$213 \cdot 10^{-2}$	749	749·10	225·10 ²
25	53,08	20	56	19545	195449	586346	$190 \cdot 10^{-2}$	667	667·10	200·10 ²
10	38,57	30	85	29998	299981	899943	$292 \cdot 10^{-2}$	102·10	102·10 ²	307·10 ²
15	40,88	30	77	27148	271481	814443	$264 \cdot 10^{-2}$	927	927·10	278·10 ²
20	43,19	30	69	24300	242998	728994	$236 \cdot 10^{-2}$	829	829·10	249·10 ²
25	45,49	30	61	21453	214534	643601	$209 \cdot 10^{-2}$	732	732·10	220·10 ²

Tabela 4.20. Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego na długości 2870 m

T_1	T_2	V	Ilość energii geotermalnej możliwej do uzyskania Q							
			24 h	rok	10 lat	30 lat	24 h	rok	10 lat	30 lat
°C	°C	m ³ /h	GJ				t.p.u.			
10	74,43	2	13	4409	44087	132260	429·10 ⁻³	150	150·10	451·10
15	74,44	2	12	4067	40674	122023	395·10 ⁻³	139	139·10	416·10
20	74,46	2	11	3726	37262	111786	362·10 ⁻³	127	127·10	382·10
25	74,46	2	10	3385	33845	101536	329·10 ⁻³	116	116·10	347·10
10	53,87	10	43	15112	151117	453352	147·10 ⁻²	516	516·10	155·10 ²
15	54,60	10	39	13643	136430	409290	133·10 ⁻²	466	466·10	140·10 ²
20	55,31	10	35	12163	121634	364901	118·10 ⁻²	415	415·10	125·10 ²
25	56,05	10	30	10697	106974	320921	104·10 ⁻²	365	365·10	110·10 ²
10	41,32	20	62	21716	217164	651493	211·10 ⁻²	741	741·10	222·10 ²
15	43,07	20	55	19439	194389	583168	189·10 ⁻²	663	663·10	199·10 ²
20	44,88	20	49	17229	172285	516855	168·10 ⁻²	588	588·10	176·10 ²
25	46,63	20	43	14963	149633	448900	145·10 ⁻²	511	511·10	153·10 ²
10	34,61	30	73	25692	256917	770752	250·10 ⁻²	877	877·10	263·10 ²
15	37,01	30	65	22967	229668	689004	223·10 ⁻²	784	784·10	235·10 ²
20	39,41	30	58	20226	202264	606792	197·10 ⁻²	690	690·10	207·10 ²
25	41,87	30	50	17563	175625	526875	171·10 ⁻²	599	599·10	180·10 ²

4.4. Wnioski

W celu przeprowadzenia oceny teoretycznych możliwości pozyskiwania strumienia ciepła geotermalnego dla obu rozpatrywanych głębokości (2870 m i 3950 m) przeprowadzono obliczenia cieplne przy założeniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej wymiennika.

W przypadku obu głębokości otworów uzyskane wyniki wskazują na możliwość ich praktycznego wykorzystania dla następujących objętościowych strumieni wody: $\dot{V} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ i $\dot{V} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, zarówno z punktu widzenia wysokości temperatury na wypływie z wymiennika, jak i wielkości strumienia pozyskiwanego ciepła. W przypadku głębokości $L = 3950 \text{ m}$ dotyczy to także objętościowego strumienia wody $\dot{V} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$.

Powyższe wnioski potwierdzają obliczenia wykonane dla wymienników z zastosowaniem izo-

lacji rury wewnętrznej (ze szczeliną powietrzną na całej długości).

Przykładowo, dla otworu $L = 2870$ m ze szczeliną powietrzną na całej głębokości i temperatury wody na dopływie do wymiennika ciepła $t = 25^{\circ}\text{C}$:

- dla $\dot{V} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, temperatura wody na wypływie wynosi około 65°C , a strumień pozyskanego ciepła $\dot{Q} \cong 91 \text{ kW}$. Daje to w skali roku ogółem $Q = 770 \text{ MWh/a} = 2760 \text{ GJ/a}$ pozyskiwanego ciepła geotermalnego;
- dla $\dot{V} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, temperatura wody na wypływie wynosi około 47°C , a strumień pozyskanego ciepła $\dot{Q} \cong 255 \text{ kW}$. Daje to w skali roku ogółem $Q = 2150 \text{ MWh/a} = 7730 \text{ GJ/a}$ pozyskiwanego ciepła geotermalnego.

W przypadku izolacji rury wewnętrznej na całej głębokości (ze szczeliną powietrzną) uzyskane wyniki dla $L=3950$ m i temperatury wody na dopływie wymiennika $t = 25^{\circ}\text{C}$ są następujące:

- jeżeli $\dot{V} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$ to temperatura wody na wypływie wynosi $86,6^{\circ}\text{C}$, a strumień pozyskanego ciepła $\dot{Q} = 140 \text{ kW}$. Daje to w skali roku ogółem $Q = 1180 \text{ MWh/a} = 4240 \text{ GJ/a}$ pozyskiwanego ciepła geotermalnego;
- jeżeli $\dot{V} = 10 \text{ m}^3/\text{h}$, to temperatura wody na wypływie wynosi około $68,5^{\circ}\text{C}$, a strumień pozyskanego ciepła $\dot{Q} \cong 496 \text{ kW}$. Daje to w skali roku ogółem $Q = 4180 \text{ MWh/a} = 15040 \text{ GJ/a}$ pozyskiwanego ciepła geotermalnego;
- jeżeli $\dot{V} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ to temperatura wody na wypływie wynosi około $53,0^{\circ}\text{C}$, a strumień pozyskanego ciepła $\dot{Q} \cong 644 \text{ kW}$. Daje to w skali roku ogółem $\dot{Q} = 5430 \text{ MWh/a} = 19540 \text{ GJ/a}$ pozyskiwanego ciepła geotermalnego.

W prawie wszystkich wyżej wymienionych przypadkach wykorzystanie ciepła geotermalnego przy niższych temperaturach otoczenia wiąże się z potrzebą stosowania kotła szczytowego w celu uzyskania wymaganej temperatury wody sieciowej na zasilaniu.

W pozostałych przypadkach (przy zastosowaniu izolacji rury wewnętrznej na całej długości) dla większych objętościowych strumieni wody efekty są mniejsze, mimo że uzyskuje się stosunkowo wysokie strumienie ciepła, ale znacznie niższe temperatury.

Wielkość pozyskiwanego ciepła geotermalnego związana jest z wartością temperatury wody zatłaczanej do wymiennika. W przytoczonych powyżej obliczeniach przyjęto temperaturę wody równą 25°C . W przypadku obniżenia tej temperatury zwiększy się zarówno moc cieplna ujęcia geotermalnego, jak i ilość pozyskiwanej energii. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt,

że wzrost tej temperatury pogorszy parametry eksploatacyjne ujęcia, czego efektem będzie spadek mocy cieplnej i zmniejszenie ilości wyprodukowanej energii. Istotne jest więc takie wykorzystanie ujęcia, aby w maksymalnym stopniu odebrać ciepło od wody obiegowej i maksymalnie obniżyć jej temperaturę powrotną.

Powyższe wnioski sformułowano pod kątem wykorzystania strumienia ciepła dla celów grzewczych.

W przypadku wykorzystania wody na inne cele (np. ciepła woda użytkowa) już inaczej będzie wyglądała nasza analiza wykorzystania tego otworu. Sytuacja będzie bardziej korzystna, gdyż w tym przypadku nie będziemy borykać się ze zmianą pozyskiwanego strumienia ciepła wynikającą ze zmiany temperatury wody na wejściu do wymiennika, jak to ma miejsce w układzie c.o. – wody powracającej z systemów c.o. od odbiorców (świeża woda z sieci wodociągowej ma określoną stałą wartość temperatury).

Zaproponowane wymienniki z izolacją na długości 600 m dla obu głębokości nie dają oczekiwanych efektów ze względu na niskie temperatury wody wypływającej z wymienników.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Zaproponowane analityczne modele matematyczne geotermalnych wymienników ciepła typu Field opisujące wymianę ciepła pomiędzy złożem a wymiennikiem z powodzeniem mogą być wykorzystywane do oceny możliwości zastosowania takich wymienników w nieczynnych otworach wiertniczych. Wyprowadzone zależności opisujące pole temperatury czynnika zatłaczającego do wymiennika w funkcji długości wymiennika (głębokości otworu) oraz zależności na strumień pozyskiwanego ciepła mogą posłużyć nam do scharakteryzowania danego miejsca wykorzystania wymiennika (usytuowania w otworze) – sprzężenia parametrycznego z odwiertem. Obliczenia nie są skomplikowane i w łatwy sposób można je zrealizować na komputerze.

Dodatkową zaletą jest stworzenie nomogramów umożliwiających wstępną ocenę przydatności danego miejsca pod kątem instalacji danego typu geotermalnego wymiennika ciepła (geometria wymiennika, współczynnik przewodzenia ciepła, zastosowana izolacja itp.) przy znajomości wielkości, które są do tego potrzebne (charakterystyka złoża – parametry termiczne).

Opisane i przedstawione dwa główne modele (z temperaturą wyższą od temperatury złoża na wejściu do wymiennika ciepła oraz z temperaturą niższą od temperatury złoża na wejściu do wymiennika) realizowane zarówno w wariancie umieszczenia wymiennika w jednej warstwie jednorodnej złoża lub w dwóch istotnie różniących się warstwach np. warstwa skalna lub warstwa geotermalna, są zbieżne – realizowane obliczenia dają taki sam rezultat. Ważne oczywiście jest przyjęcie odpowiedniej wartości wynikającej z wykorzystania pierwszego warunku brzegowego (wartość plus lub minus parametru Θ'_1).

W przypadku wymiennika umieszczonego w jednorodnym złożu (np. skalnym) strumień pozyskiwanego ciepła \dot{Q} , a tym samym temperatura czynnika na wypływie T_2 (lub różnica temperatur wyjścia/wejścia $T_2 - T_1$) rośnie ze wzrostem:

- pojemności cieplnej czynnika,
- zastępczego współczynnika przenikania ciepła (strona zewnętrzna wymiennika) k_z ,
- profilu temperaturowego gruntu,
- długości wymiennika ciepła L_0

oraz ze zmniejszaniem się temperatury zatłaczanego czynnika $T'_1 = T_{zatl}$.

W przypadku wymiennika umieszczonego w dwóch różniących się parametrycznie warstwach górotworu (np. w warstwie skalnej i geotermalnej) strumień pozyskiwanego ciepła \dot{Q} oraz temperatura czynnika na wypływie T_2 (lub różnica temperatur wyjścia/wejścia $T_2 - T_1$) rośnie dodatkowo ze wzrostem:

- grubości warstwy geotermalnej L_G ,
- zastępczego współczynnika przenikania ciepła (strona zewnętrzna wymiennika związana z warstwą geotermalną) k_z^G

oraz ze zmniejszaniem się temperatury zatłaczanego czynnika oraz współczynnika przenikania ciepła warstwy skalnej k_z i rury wewnętrznej wymiennika k_w .

Należy zwrócić uwagę, że w niektórych przypadkach wzrost grubości warstwy geotermalnej powoduje zmniejszenie strumienia pozyskiwanego ciepła – przy $k_z^G/k_w < 1$.

Wykonane obliczenia wykazały, że niezależnie od wartości pojemności cieplnej strumienia czynnika występują graniczne wartości $(k_z^G/k_w)_{gr}$, dla których strumień pozyskiwanego ciepła nie zależy od względnej grubości warstwy geotermalnej. Wartość ta maleje ze wzrostem pojemności cieplnej czynnika, i tak dla $(k_z^G/k_w) < (k_z^G/k_w)_{gr}$ wzrost grubości warstwy geotermalnej obniża pozyskany strumień ciepła, a w przeciwnym przypadku, jeżeli $(k_z^G/k_w) > (k_z^G/k_w)_{gr}$, ze wzrostem grubości warstwy geotermalnej wzrasta wielkość strumienia ciepła, przy czym większy przyrost następuje w strefie mniejszych grubości warstwy geotermalnej.

Wykonana analiza wykazała również, że w przypadku zatłaczania do wymiennika czynnika o temperaturze mniejszej od temperatury gruntu w pierwszej fazie przepływu następuje schładzanie czynnika – efekt negatywny w stosunku do postawionego celu, jakim jest pozyskanie energii ze złoża. Wskazane jest wówczas zastosowanie izolacji rury zewnętrznej, dzięki której ograniczymy ten efekt lub wyeliminujemy (zależy to oczywiście od długości zastosowanej izolacji). Długość tę jesteśmy w stanie określić na bazie wyprowadzonych zależności, czy też dokonując symulacji obliczeniowych profilu temperaturowego czynnika przepływającego przez wymiennik. Najlepiej jest stosować taką długość izolacji, aby w części nieadiabtermicznej wymiennika czynnik jedynie pozyskiwał ciepło z warstw skalnych/geotermalnych. W wielu przypadkach występuje wyraźne ekstremum strumienia pozyskiwanego ciepła określające celowość stosowania danej długości izolacji. Im wyższa wartość pojemności cieplnej

czynnika i im mniejsza wartość stosunku k_z^G/k_w , tym występowanie ekstremum jest wyraźniejsze.

W pracy podano również rozwiązania modelowanej wymiany ciepła dla przypadku wymiennika z adiatermiczną rurą wewnętrzną (przy obu rozwiązaniach wymiennika ciepła, tj. temperatury większej lub mniejszej od temperatury gruntu na powierzchni ziemi). Wykonane obliczenia i przedstawione nomogramy pozwalają wstępnie dokonać oceny możliwości wykorzystania danego odwiertu przy znanych wielkościach charakterystycznych, jakimi są w tym przypadku Θ'/E^* , \dot{W} oraz K_z/\dot{W} , określając tym samym strumień pozyskiwanego ciepła \dot{Q} . Należy jednak pamiętać, że przy rzeczywistym niespełnieniu warunku doskonałej izolacji rury wewnętrznej wymiennika odczytane z nomogramów wartości strumienia będą większe od rzeczywistych, które będziemy mogli uzyskać podczas pracy urządzenia (warunki nieadiatermiczne).

W pracy dokonano również analizy wykorzystania opracowanych modeli wymiany ciepła pomiędzy złożem a wymiennikiem dla wybranych rzeczywistych parametrów złoża, jego profilu temperaturowego, geometrii wymiennika (otwór Jachówka K2). Obliczenia potwierdziły wcześniej podane wnioski, że ilość pozyskiwanego ciepła zależy od objętościowego strumienia wody. Dla otworu Jachówka K2 praktyczne wykorzystanie otworu występuje w przedziale $\dot{V} = 2 - 10 \text{ m}^3/\text{h}$ dla wariantu I ($L = 2870 \text{ m}$) oraz $\dot{V} = 2 - 20 \text{ m}^3/\text{h}$ w przypadku wariantu II ($L = 3950 \text{ m}$). Mamy tu do czynienia zarówno z wysokimi wartościami temperatury na wypływie z wymiennika, jak również wielkościami strumienia pozyskiwanego ciepła.

W pozostałych przypadkach (przy zastosowaniu izolacji rury wewnętrznej na całej długości) dla większych objętościowych strumieni wody efekty są mniejsze, pomimo że uzyskuje się relatywnie wysokie wartości strumienia pozyskiwanego ciepła, ale niestety znacznie niższe wartości temperatury.

Analiza wykazała również, że dla danych parametrów wymiennika geotermicznego zasilającego grupę odbiorców ciepła należy dostosować właściwy rodzaj regulacji sieci ciepłej, który zapewni najlepsze wykorzystanie wymiennika geotermicznego.

Eksploatując geotermalny wymiennik ciepła, należy pamiętać, że czas eksploatacji (ciągłość pracy wymiennika) skutkuje obniżeniem jego mocy ciepłej.

Wykonane obliczenia własne korelują z wartościami uzyskanymi na drodze obliczeń numerycznych wykonanych przez Moritę [19], potwierdzając, że opracowane modele analityczne nie odbiegają od obliczeń numerycznych.

Kierunki dalszych badań powinny być prowadzone pod kątem wykorzystania geotermalnych wymienników ciepła poprzez wykorzystanie innych substancji skutkujących zwiększeniem ilości pozyskanego ciepła i/lub efektywnym jego wykorzystaniem. Prowadzone prace i badania nie wyczerpują jeszcze wolnych przestrzeni możliwych do zagospodarowania np. w obszarze układów ORC.

Literatura

- [1] Nowak W., Sobański R., Kabat M., Kujawa T., Systemy pozyskiwania i wykorzystania energii geotermicznej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2000
- [2] Wiśniewski G., Odnawialne źródła energii, [w]: Wybrane zagadnienia polityki energetycznej Polski, Polski Klub Ekologiczny, Warszawa 1997
- [3] Templeton J.D., Abandoned petroleum wells as sustainable/renewable sources of geothermal energy, Master thesis in Department of Mining and Materials Engineering, McGill University 2013
- [4] Templeton J.D., Ghoreishi-Madiseh S.A., Hassani F., Abandoned petroleum wells as sustainable sources of geothermal energy, *Energy* 70: 366–373, 2014
- [5] Sayigh A., Renewable energy-the way forward, *Applied Energy* 64: 15–30, 1999
- [6] Michaelides E.E., *Alternative energy sources*, Springer 2012
- [7] Bu X., Ma W., Li H., Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells, *Renewable Energy* 41: 80–85, 2012
- [8] Barbier E., Geothermal energy technology and current status: an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6: 3–65, 2002
- [9] <http://www.geo-energy.org/basic.s.aspx>
- [10] Davis A.P., Michaelides E.E., Geothermal power production from abandoned oil wells, *Energy* 34: 866–872, 2009
- [11] Kuo G., *Geothermal energy*, World Future Society 2012
- [12] Bertani R., Geothermal power generation in the World 2005–2010 update report, *Geothermics* 41: 1–29, 2012
- [13] Barbier E., Geothermal energy technology and current status: an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6: 3–65, 2002
- [14] Lukawska M.Z., Silverman R.L., Tester J.W., Uncertainty analysis of geothermal well drilling and completion costs, *Geothermics* 64: 382–391, 2016
- [15] Yost K., Valentin A., Einstein H.H., Estimating cost and time of wellbore drilling for Engineered Geothermal Systems (EGS) – Considering uncertainties, *Geothermics* 53: 85–99, 2015
- [16] Petty S., Bour D., Livesay B., Baria R., Adair R., Synergies and opportunities between EGS development and oilfield drilling operations and producers, SPE 121165, 2009
- [17] Kotler S., Abandoned oil and gas wells are leaking, <<http://www.zcommunications.org/abandoned-oil-and-gas-wells-are-leaking-by-stevenkotler>>; 2011
- [18] Bojarski L., Programm reconstruction of abandoned wells for geothermal use, *Technika Poszukiwań* 3-4:19–21, 1996

- [19] Morita K., One possible way to utilize abandoned deep wells – the application of the DCHE, *Technika Poszukiwań* 5: 129–148, 2001
- [20] Sapinska-Śliwa A., Rosen M.A., Gonet A., et al., Deep borehole heat exchangers – A conceptual and comparative review, *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration* 24: 1–15, 2016
- [21] Sui D., Wiktorski E., Rokslund M., Basmoen T.A., Revie and investigations on geothermal Energy extraction from abandoned petroleum wells, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, <https://doi.org/10.1007/s13202-018-0535-3>
- [22] Cheng W.L., Li T.T., Nian Y.L., Xie K., Evaluation of working fluids for geothermal power generation from abandoned oil wells, *Applied Energy* 118: 238–245, 2014
- [23] Bu X., Ma W., Li H., Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells, *Renewable Energy* 41: 80–85, 2012
- [24] Wight N.M., Bennett N.S., Geothermal energy from abandoned oil and gas wells using water in combination with a closed wellbore, *Applied Thermal Energy* 89: 908–915, 2015
- [25] Cheng W.L., Li T.T., Nian Y.L., Wang C.L., Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells, *Energy* 59: 248–254, 2013
- [26] Kohl T., Salton M., Rybach L., Data analysis of the deep borehole heat exchanger plant Weissbad (Switzerland), in: *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu - Tohoku, Japan, 2000
- [27] Noorollahi Y., Pourarshad M., Jalilinasrabady S., Yousefi H., Numerical simulation of power production from abandoned oil wells in Ahwaz oil field in southern Iran, *Geothermics* 55: 16–23, 2015
- [28] Noorollahi Y., Yousefi H., Pourarshad M., Three dimensional modeling of heat extraction from abandoned oil well for application in Sugarcane industry in Ahvaze southern Iran, in: *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 2015
- [29] Alimonti C., Soldo E., Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger, *Renewable Energy* 86: 292–301, 2016
- [30] Sliwa T., Gonet A., Sapinska-Sliwa A., Knez D., Jezuit Z., Applicability of borehole R-1 as BHE for heating of a gas well, in: *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 2015
- [31] Alimonti C., Berardi D., Bocchetti D., Soldo E., Coupling of energy conversion systems and wellbore heat exchanger in a depleted oil well, *Geothermal Energy* 4: 11, 2016, <https://doi.org/10.1186/s40517-016-0053-9>
- [32] Nalla G., Shook G.M., Mines G.L., Bloomfield K.K., Parametric sensitivity study of operating and design variables in wellbore heat exchangers, *Geothermics* 34: 330–346, 2005
- [33] Kohl T., Brenni R., Eugster W., System performance of a deep borehole heat exchanger, *Geothermics* 31: 687–708, 2002
- [34] Galoppi G., Biliotti D., Ferrara G., Carnevale E.A., Ferrari L., Feasibility study of a geothermal power plant with a double-pipe heat exchanger, *Energy Procedia* 81: 193–204, 2015

- [35] Cei M., Bertani R., Fiorentini A., Romagnoli P., Evaluation of heat exchange in a geothermal well, in: *Proceedings of European Geothermal Congress 2013*, Pisa, Italy, 2013
- [36] Alimonti C., Soldo E., Bocchetti D., Berardi D., Evaluation of geothermal energy production using a wellbore heat exchanger in the reservoirs of Campi Flegrei and Ischia Island, in: *European Geothermal Congress 2016*, Strasbourg, 19–23, 2016
- [37] Imran M., Usman M., Park B.S., Yang Y., Comparative assessment of Organic Rankine Cycle integration for low temperature geothermal heat source applications, *Energy* 102: 473–490, 2016
- [38] Borsukiewicz-Gozdur A., Dual-fluid-hybrid power plant co-powered by low-temperature geothermal water, *Geothermics* 39: 170–176, 2010
- [39] Baik Y.J., Kim M., Chang K.C., Lee Y.S., Yoon H.K., Power enhancement potential of a mixture transcritical cycle for a low-temperature geothermal power generation, *Energy* 47: 70–76, 2012
- [40] Kanoglu M., Bolatturk A., Performance and parametric investigation of a binary geothermal power plant by exergy, *Renewable Energy* 33: 2366–2374, 2008
- [41] Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak W., Stachel A.A., Ocena możliwości wykorzystania energii geotermalnej i geotermicznej do zasilania elektrowni, *Konferencja Naukowa: Problemy Jakościowe, Energetyczne i Eksploatacyjne w Maszynach Ciepłych*, ATR Bydgoszcz, Duszynki, Materiały konferencyjne, 21–28, 2004
- [42] Franco A., Villani M., Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, medium-temperature geothermal fields, *Geothermics* 38: 379–391, 2009
- [43] Nowak W., Stachel A.A., Borsukiewicz-Gozdur A., Possibilities of implementation of absorption heat pump In realization of the Clausius-Rankine's cycle In geothermal Power station, *Applied Thermal Engineering* 28: 335–340, 2008
- [44] Guo T., Wang H.X., Zheng J., Comparative analysis of CO₂-based transcritical Rankine cycle and HFC245fa-based subcritical organic Rankine cycle using low-temperature geothermal source, *Science China Technological Sciences* 53: 1638–1946, 2010
- [45] Imran M., Usman M., Park B.S., Kim H., Lee D.B., Multi-objective optimization of evaporator of organic Rankine cycle (ORC) for low temperature geothermal heat source, *Applied Thermal Engineering* 80: 1–9, 2015
- [46] Wang J., Wang J., Dai Y., Zhao P., Thermodynamic analysis and optimization of a flash-binary geothermal power generation system, *Geothermics* 55: 69–77, 2015
- [47] Nowak W., Stachel A.A., Borsukiewicz-Gozdur A., Proposals of small scale binary geothermal power plant working in the polish lowland conditions, *International Geothermal Days, Poland-2004, Zakopane*, Materiały konferencyjne, 268–272, 2004
- [48] Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak W., Feasibility Study and Energy Efficiency Estimation of a Geothermal Power Station Based on Medium Enthalpy Water, *Thermal Science* 11 (3): 135–142, 2007
- [49] Borsukiewicz-Gozdur A. Nowak W., Maximizing the working fluid flow as a way of increasing power output of geothermal power plant, *Applied Thermal Engineering* 27: 2074–2078, 2007

- [50] Wiśniewski S., Borsukiewicz-Gozdur A., Improvement of effectiveness of geothermal energy utilization as a result of conversion from one to a multi loop power cycle, *Archives of Thermodynamics* 29 (4): 205–214, 2008
- [51] Wiśniewski S., Borsukiewicz-Gozdur A., Porównanie efektywności pracy elektrowni geotermalnych przy zastosowaniu siłowni organicznych jedno i wieloobiegowych, *Energetyka, Zeszyt tematyczny nr XVIII*, 137–140, 2008
- [52] Nowak W., Borsukiewicz-Gozdur A., Wiśniewski S., Improvement of Ecological Effects of Geothermal Plant Operation due to Substitution of a Single-Cycle with Three-Cycles, *Polish Journal of Environmental Studies* 17 (3A): 427–431, 2008
- [53] Bianchi M., Branchini L., De Pascale A., Melino F., Ottaviano S., Peretto A., Torricelli N., Zampieri G., Performance and operation of micro-ORC energy system using geothermal heat source, *Energy Procedia* 148, 384–391, 2018
- [54] Hettiarachchi M., Golubovic M., Worek W.M., Ikegami Y., Optimum design criteria for an Organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources, *Energy* 32: 1698–1706, 2007
- [55] Baik Y.J., Kim M., K.C., Lee Y.S., Yoon H.K., A comparative study of power optimization in low-temperature geothermal heat source driven R125 transcritical cycle and HFC organic Rankine cycles, *Renewable Energy* 54: 78–84, 2013
- [56] Borsukiewicz-Gozdur A., Nowak W., Geothermal Power Station with Supercritical Organic Cycle, *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia*, 2010
- [57] Zhang S., Wang H., Guo T., Performance comparison and parametric optimization of subcritical Organic Rankine Cycle (ORC) and transcritical power cycle system for low-temperature geothermal power generation, *Applied Energy* 88: 2740–2754, 2011
- [58] Gu Z., Sato H., Performance of supercritical cycles for geothermal binary design, *Energy Conversion and Management* 43: 961–971, 2002
- [59] Guo T., Wang H., Zhang S., Comparative analysis of natural and conventional working fluids for use in transcritical Rankine cycle using low-temperature geothermal source, *International Journal of Energy Research* 35: 530–544, 2011
- [60] Mokhtari H., Hadiannasab H., Mostafavi M., Ahmadibeni A., Determination of optimum geothermal Rankine cycle parameters utilizing coaxial heat exchanger, *Energy* 102: 260–275, 2016
- [61] Patankar S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, USA, 1980
- [62] Lee J., Well testing, *SPE Monogr. Ser.*, 106–107, 1982
- [63] O’Sullivan M.J., Pruess K., Lippmann M.J., State of the art of geothermal reservoir simulation, *Geothermics* 30: 395–429, 2011
- [64] Pritchett J.W., STAR: a geothermal reservoir simulation system, in: *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, 2959–2963, 1995
- [65] Vinsome P.K.W., Shook G.M., Multi-purpose simulation, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 9 (1): 29–38, 1991
- [66] Garcia-Gutierrez A., Espinosa-Paredes G., Hernandez-Ramirez I., Study on the flow production characteristics of deep geothermal wells, *Geothermics* 31: 141–167, 2002

- [67] Kutasov I.M., Dimensionless temperature at the wall of an infinite long cylindrical source with a constant heat flow rate, *Geothermics* 32: 63–68, 2003
- [68] Kutasov I.M., Dimensionless temperature at the wall of an infinite long, variable rate, cylindrical heat source, *Geothermics* 36: 223–229, 2007
- [69] Pruess K., Oldenburg C., Moridis G., An overview of TOUGH2, Version 2.0, in: *Proceedings of the TOUGH Workshop '98*, Berkeley, California, 307–314, 1998
- [70] Kohl T., Hopkirk R.J., “FRACTure” a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock, *Geothermics* 24 (3): 345–359, 1995
- [71] Mondy L.A., Duda L.E., *Advanced Wellbore Thermal Simulator GEOTEMP2 User Manual*, Sandia report, 1984
- [72] O'Sullivan M.J., *AUTOUGH2 Notes*, Department of Engineering Science, University of Auckland, 2000
- [73] Ramey H. Jr., Wellbore heat transmission, *Journal of Petroleum Technology* 14: 427–435, 1962
- [74] Pruess K., Oldenburg G., Moridis G., *TOUGH2 User's Guide*, Version 2.0, Earth
- [75] Haaland S.E., Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow, *Journal of Fluids Engineering* 105: 89–90, 1983
- [76] Feng Y., Tyagi M., White C.D., A downhole heat exchanger for horizontal wells in low-enthalpy geopressured geothermal brine reservoirs. *Geothermics* 53: 368–378, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.007>
- [77] Mokhtari H., Hadiannasab H., Mostafavi M., Ahmadiben A.I., Determination of optimum geothermal Rankine cycle parameters utilizing coaxial heat exchanger, *Energy* 102: 260–275, 2016
- [78] Kujawa T., Nowak W., Lower source of heat pumps - shallow and deep vertical geothermal heat exchanger, *Acta Mechanica Slovaca* 3: 111–118, 1999
- [79] Kujawa T., Nowak W., Thermal calculation of geothermal heat utilizing one-well systems with both injection and production, in: *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, 3483–3488, 2000
- [80] Kujawa T., Nowak W., Evaluation of the length of insulated inside pipe effect on heat efficiency of a downhole geothermal coaxial heat exchanger (DGCHE), *Acta Mechanica Slovaca* 6 (2): 183–190, 2001
- [81] Kujawa T., Nowak W., Modified thermal calculations of a geothermal double-pipe heat exchanger insulation immersed into geothermal deposit, *International Conference Advanced Computational Methods in Heat Transfer VI*, 467–476, Madrid 2000
- [82] Kujawa T., Nowak W., Shallow and deep vertical geothermal heat exchangers as low temperature sources for heat pumps, in: *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, 3477–3482, 2000
- [83] Kujawa T., Nowak W., Szaflik W., Mathematical model of a geothermal field exchanger. *Modeling and Design in Fluid-Flow Machinery: proceedings of the IMP'97 Conference*, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk: IMP PAN, 481–488, 1997

- [84] Kujawa T., Nowak W., Szaflik W., Wpływ sposobu rozwiązania geotermalnej sondy pionowej na jej wydajność cieplną, Wymiany ciepła i masy: 10 Sympozjum: Cz.2, 551–558, Wrocław, 1998
- [85] Kujawa T., Nowak W., Warmeleistung von geothermalen Vertikalsonden in Ein- und Zweibohrungssystemen, Forschung, Didaktik und Praxis im modernen Maschinenbau: 4 Internationale Tagung der Fachhochschule Stralsund und der Technischen Universität Gdańsk, 21–31, 1998
- [86] Kujawa T., Nowak W., One-hole systems with injection and production well thermal calculations of heat utilization, Renewable Energy: Energy Efficiency, Policy and the Environment: World Renewable Energy Congress V, Pergamon, Part IV: 2469–2472, 1998
- [87] Kujawa T., Nowak W., Szaflik W., Thermal calculations of a geothermal field exchanger, Heat Exchangers for Sustainable Development: International Conference and Exhibit EXPO'98, Proceedings, 583–592, 1998
- [88] Kujawa T., Nowak W., Szaflik W., Mathematical model of a geothermal field exchanger, Mathematics of Heat Transfer, Conference Oxford, Clarendon Press, 205–212, 1998
- [89] Kujawa T., Nowak W., Szaflik W., Geometry of a deposit and heat exchange conditions influence on work of geothermal vertical probe, Thermodynamics, heat and mass transfer of refrigeration machines and heat pumps: Seminar EUROTHERM '59, 275–281, 1998
- [90] Kujawa T., Nowak W., Vertical geothermal probes as influence on work of geothermal vertical probe, Thermodynamics, heat and mass transfer of refrigeration machines and heat pumps: Seminar EUROTHERM '59, 385–392, 1998
- [91] Kujawa T., Nowak W., Mathematische Modellierung von Systemen zur Nutzung der geothermalen, Energie mit einer integrierten Förder- und Verpressbohrung. Geothermie: Forschung Entwicklung Markt: 5. Geothermische Fachutung, 332–339, 1999
- [92] Kujawa T., Nowak W., Szaflik W., Mathematical model of a geothermal field exchanger, Archives of Thermodynamics 20 (1–2): 39–50, 1999
- [93] Kujawa T., Nowak W., Mathematical Modellierung von Systemen zur Nutzung der geothermalen Energie mit einer integrierten Förder-und Verpreßbohrung. Geothermische Fachtagung, Geothermie: Forschung Entwicklung Markt, 332–339, 1998
- [94] Kujawa T., Nowak W., Shallow and deep vertical geothermal heat exchanger as lower source of heat pumps. Progress in engineering heat transfer: Proceedings of the Third Baltic Heat Transfer Conference, Gdańsk, 551–559, 1999
- [95] Kujawa T., Nowak W., Lower source of heat pumps-shallow and deep vertical geothermal heat exchanger, Acta Mechanica Slovaca 3 (3): 111–118, 1999
- [96] Nowak W., Stachel A., Kujawa T., Ocena możliwości pozyskiwania ciepła geotermicznego z otworu Jachówka 2K, Metodyka i technologia uzyskiwania użytecznej energii geotermicznej z pojedynczego otworu wiertniczego: 8 Kurs Polskiej Szkoły Geotermalnej, 27–38, 2000
- [97] Nowak W., Stachel A., Kujawa T., Analiza możliwości wykorzystania istniejącego odwiertu geologicznego Jachówka 2K do pozyskania energii geotermicznej. Ogólno-

polskie Forum Odnawialnych Źródeł Energii 2000, 7 Konferencja Naukowo-Techniczna Kielce: Stowarzyszenie Wykorzystywania Odnawialnych Źródeł Energii, 2000

- [98] Kujawa T., Nowak W., Modified thermal calculations of a geothermal double-pipe heat exchanger immersed into geothermal deposit, *Renewable energy: World Renewable Energy Congress VI* ed. by A.A.M. Sayigh, Amsterdam: Pergamon, P.1., 314–317, 2000
- [99] Kujawa T., Nowak W., Modified thermal calculations of a geothermal double-pipe heat exchanger (with insulation and no insulation) immersed into geothermal deposit, *New and renewable technologies for sustainable development: Euro Conference*, Lisabon, 2000
- [100] Kujawa T., Nowak W., Numerical simulation of thermal capacity in the geothermal part of the exchanger in one-hole system, *Acta Mechanica Slovaca* 4 (3): 395–400, 2000
- [101] Kujawa T., Nowak W., Modelowanie systemów pozyskiwania energii geotermalnej. Techniczne, ekologiczne i ekonomiczne aspekty energetyki odnawialnej red. Andrzej Chochowski Warszawa: Wydawnictwo SGGW, 145–154, 2001
- [102] Kujawa T., Nowak W., Analysis of impact of depth of a geothermal exchanger located in deposit and temperature of the water in a heat distribution network returning to the surface on heat extraction rate, *Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia* 5: 175–181, 2001
- [103] Kujawa T., Nowak W., Numerical simulation of heat extraction in the geothermal part of the exchanger in one-hole system, *Technika Poszukiwań Geologicznych Geosynoptyka i Geotermia* 5: 183–191, 2001
- [104] Kujawa T., Nowak W., The boundary conditions of Field exchanger located in a production well of geothermal water, *Acta Mechanica Slovaca* 3: 261–266, 2001
- [105] Nowak W., Kujawa T., Modeling systems of gaining geothermal heat, *Forschung, Praxis und Didaktik im modernen Maschinenbau: 11. Internationale Tagung*, 83–90, 2001
- [106] Kujawa T., Nowak W., Ocena porównawcza różnych rozwiązań systemów pozyskiwania energii geotermalnej, *Rola energii geotermalnej w zrównoważonym rozwoju regionów: 4 Seminarium: Energia geotermalna w Małopolsce – dziś i jutro* Kraków: IGSMiE PAN, 247–264, 2001
- [107] Kujawa T., Nowak W., Systemy pozyskiwania energii geotermicznej, *Prace Naukowe. Mechanika/Politechnika Warszawska*, Z. 190 (2001), 229–237, 2001
- [108] Kujawa T., Nowak W., Winning the geothermal heat energy. *Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik* 2002, 9. Symposium Stralsund: Fachhochschule, 83–88, 2001
- [109] Kujawa T., Nowak W., One-hole systems of winning geothermal (shallow and deep) heat energy, *20 Jahre Tiefe Geothermie in Deutschland*, 7. Geothermische Fachtagung: Tagungsband Geeste, Geothermische Vereinigung e.V., 214–221, 2002
- [110] Kujawa T., Nowak W., The efficiency of winning the geothermal heat energy in one-hole and two-hole systems. *Renewable energy: renewables, world's best energy op-*

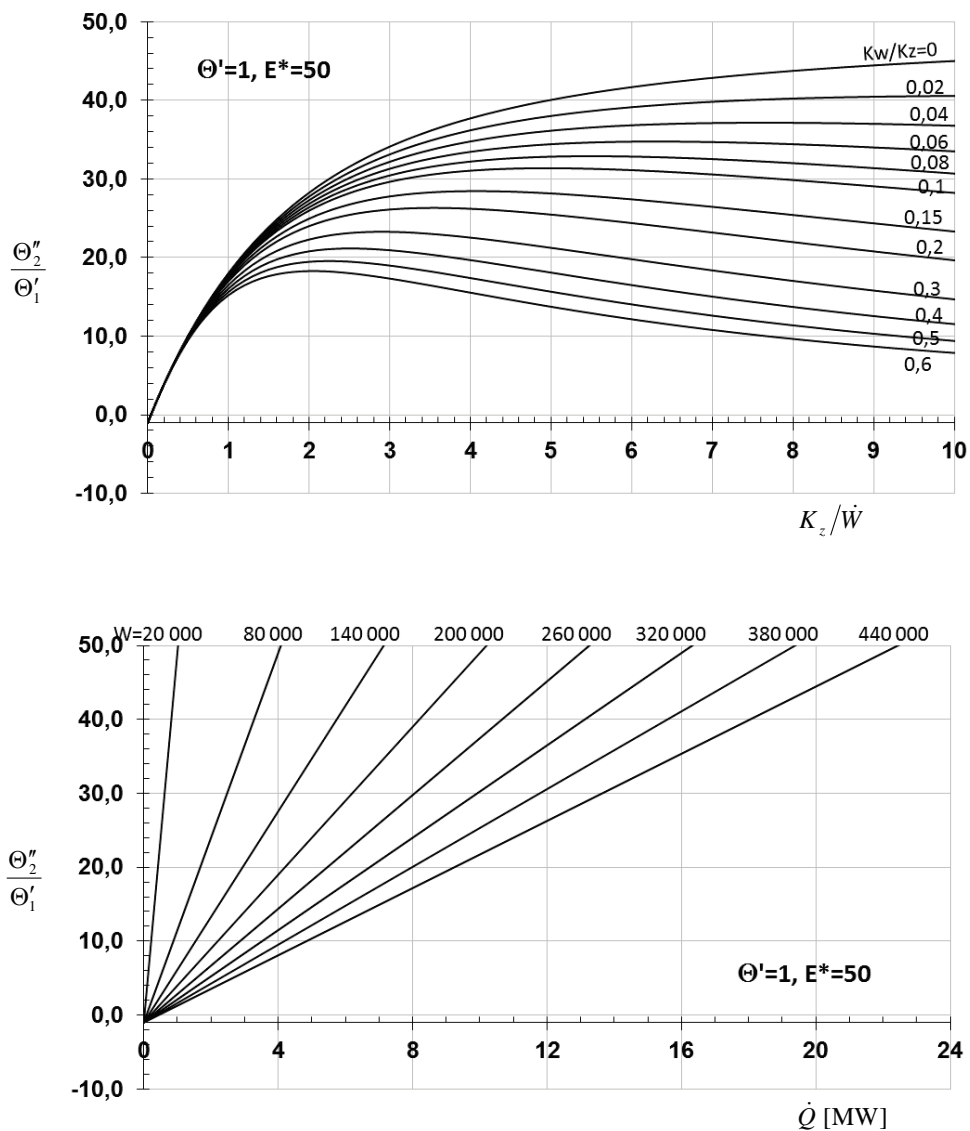
tion: World Renewable Energy Congress VII: full proceedings ed. by A.A.M. Sayigh, Amsterdam: Pergamon, 2002

- [111] Kujawa T., Nowak W., Evaluation of the length of insulated inside and outside pipe effect on heat efficiency of a downhole geothermal coaxial heat exchanger (DGCHE), New and renewable energy technologies for sustainable development: International Conference on Lisbon, 2002
- [112] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., Heat-flow characteristics of one-hole and two-hole systems of winning geothermal heat. Energex'2002: energy sustainable development a challenge for the new century: 9th International Energy Conference & Exhibition: abstracts Cracow: MEERI PAS, 2002
- [113] Kujawa T., Nowak W., Winning the geothermal heat energy in one hole and two-hole systems, Multiple integrated uses of geothermal resources: International Geothermal Conference IGC 2003, proceedings S13 Paper 036, 2003
- [114] Kujawa T., Nowak W., The impact of the depth of a one-hole geothermal heat exchanger on its characteristics, Advances in heat transfer engineering: proceedings of the 4th Baltic Heat Transfer Conference, New York, Begell House, Kaunas, Lithuanian Energy Institute, 549–556, 2003
- [115] Kujawa T., Nowak W., Characteristics of a geothermal heat exchanger in order to evaluate its co-operation with the heat receivers, European Geothermal Conference 2003, book of abstracts, 155–156, 2003
- [116] Kujawa T., Nowak W., Modified thermal calculations of a geothermal double-pipe heat exchanger (with insulation and no insulation) immersed into geothermal deposit, New and renewable technologies for sustainable development ed. by Naim Hamdia Afgan and Maria da Graça Carvalho Boston [et al.]: Kluwer Academic Publishers, 645–654, 2003
- [117] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., Heat-flow characteristics of one-hole and two-hole systems for winning geothermal heat, Applied Energy 74 (1–2): 21–31, 2003
- [118] Kujawa T., Nowak W., Jedno- i dwuotworowe systemy pozyskiwania energii geotermalnej. Nowe spojrzenie na osady ściekowe - odnawialne źródła energii: 2 Międzynarodowa i 13 Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Cz. 2, Częstochowa: Wydaw. Polit. Częstochowskiej, 395–409, 2003
- [119] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., Systemy pozyskiwania energii geotermalnej. Eco-Euro-Energia: międzynarodowa konferencja procesorów energii, z.1 Bydgoszcz: Międzynarodowe Bydgoskie Targi SAWO, 341–351, 2004
- [120] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., The analysis of exploitation of existing deep production wells for winning the geothermal energy, 5th Mińsk International Heat and Mass Transfer Forum CD , Nr 8–9, 2004
- [121] Nowak W., Kujawa T., Ocena możliwości wykorzystania istniejących odwiertów geologicznych na terenie województwa zachodniopomorskiego od pozyskania energii geotermicznej, Rozwój energii odnawialnej na Pomorzu Zachodnim: 2 Międzynarodowa Konferencja] pod red. Lewandowski P., Nowak W., 341–348, Szczecin 2004
- [122] Kujawa T., Nowak W., The Estimation of Impact of the Depth and an Overall Heat Transfer Coefficient in a Deposit on the Heat-Flow Characteristic of a Geothermal

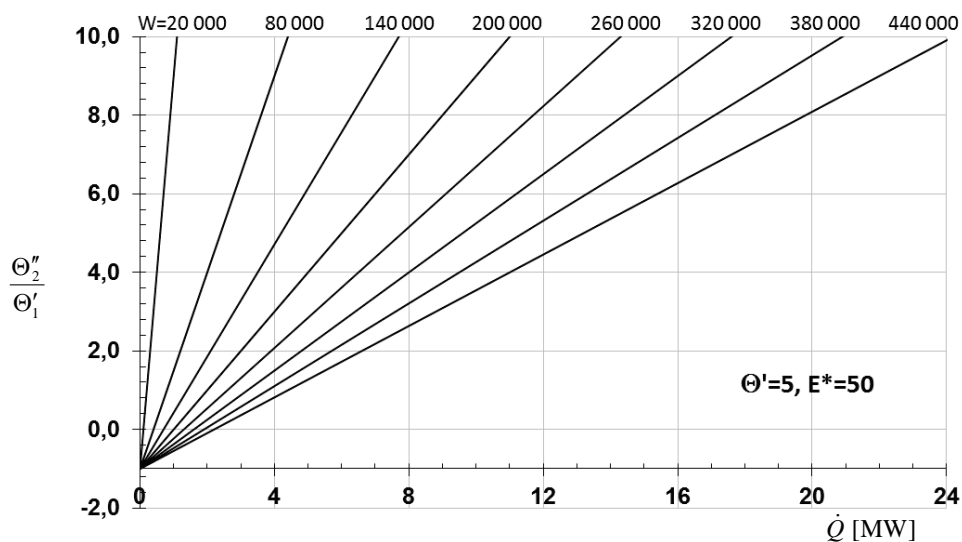
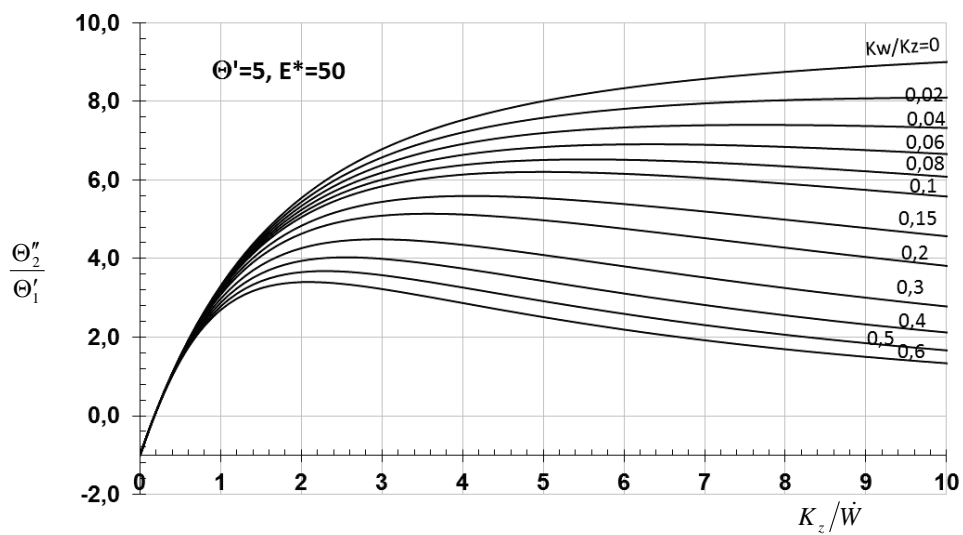
- Heat Exchanger, Energy & Society – Energex 2004: Book of Proceedings of the 10th International Conference Lisbon: Universidade Nova de Lisboa, 83–88, 2004
- [123] Kujawa T., Nowak W., Systemy pozyskiwania energii geotermalnej – systemy jednootworowe, *Inżynieria Chemiczna i Procesowa* (25): 2239–2248, 2004
 - [124] Kujawa T., Nowak W., The Impact of the Depth of One-Hole DGHE on its Characteristics, Heat transfer and renewable sources of energy: proceedings of the 10th International Symposium HTRSE 2004, 213–220, Szczecin 2004
 - [125] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., Utilisation of existing deep geological weels for acquisitions of geothermal energy, Thermal sciences 2004: proceedings of the ASME-ZSITS International Thermal Science Seminar ed. Arthur E. Bergles, Izток Golobič Ljubljana: ZSITS, 557–564, 2004
 - [126] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., The analysis of exploitation of existing deep production wells for winning the geothermal energy, *Inżynieria-fizyczny żurnal* 78 (1): 123–130, 2005
 - [127] Kujawa T., Nowak W., Influence of the geothermal heat exchanger length (in single bore-hole acquisition system) on its characteristics, *Archives of Thermodynamics* 26 (2): 17–27, 2005
 - [128] Kujawa T., Nowak W., Influence of the overall heat transfer coefficient in a deposit and down hole geothermal coaxial heat exchanger (DGCHE) length on its characteristic, *Acta Metallurgica Slovaca* 11 (1): 170–175, 2005
 - [129] Kujawa T., Nowak W., Extracting the geothermal heat energy – one-and two-hole systems, Sustainable development of energy, water and environment systems, 3rd Dubrovnik Conference, 2005
 - [130] Kujawa T., Nowak W., Stachel A., Utilization of existing deep geological wells for acquisitions of geothermal energy, *Energy* 31: 650–664, 2006
 - [131] Nowak W., Kujawa T., Modeling Systems of Gaining Geothermal Heat, XI. Internationale Tegung Forschung Praxis und Didaktik Im Modernen Maschinenbau,anlässlich des 10-jährigen Bestehens der Fachhochschule Stralsund, 83–90, Stralsund 2001
 - [132] Kujawa T., Stachel A.A., Ocena pracy pionowego geotermicznego wymiennika ciepła, *Instal* 12 (346): 35–38, 2013
 - [133] Kujawa T., Impact of insulation on heat flow characteristics of geothermal heat exchanger, *Polski Mix Energetyczny* 2014
 - [134] Borsukiewicz-Gozdur A., Kaczmarek R., Kujawa T., Mazurek R., Nowak W., Stachel A.A., Wiśniewski S. i inni: Prospective area the combined production of electricity and heat in binary systems in Poland, w: Atlas of the possible use of geothermal waters for combiner production of electricity and heat using binary systems in Poland, red. naukowa: Bujakowski W., Tomaszewska B., Wyd. JAK, 139–283, Kraków 2014
 - [135] Nowak W., Stachel A.A., Kujawa T., Assessment of operation of ORC power plant cooperating with deep underground closed geothermal heat exchanger, XXIII International Symposium, Research-Education-Technology, Wyd. HOST- FH Stralsund, 145–152, 2017

- [136] Lykov A.V., Michajlov J.A.: Teorija tieplo i masopierenosa, Gosenergoizdat 1963
- [137] Nowak W.: Teoria rekuperatorów, Wyd. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1995
- [138] Čarnyj I.A.: O prodivženii granicy izmieneniâ agregatnovo sostojanâ pri ochla-
ždenii ili nagrevanii tel, Izv. OTN AN SSSR, No 2, 1948
- [139] Čarnyj I.A.: Nagrevane prizabojnoj zony pri zakačke gorâčej vody v skvažinu, NH,
No 3, 1953
- [140] Čekaljuk E.B.: Termodinamika neftjanovo plasta, M., NEDRA, 1965
- [141] Čeremenskij G.A.: Geotermia, Izdatelstvo NEDRA, Leningradskoie otделение, Le-
ningrad 1972
- [142] Dâdkin J.D., Szuvalov J.B., Gendler C.G.: Teplovye procesy v gornych vyrabotkach,
Leningrad, Izd. LGI, 1978
- [143] Dâdkin J.D., Gendler C.G.: Processy teplomassoperenosa pri izvlečenii geotermalnoj
energii, Leningrad, Izd. LGI, 1985
- [144] Pudovkin M.A., Salamatın A.I., Čugunov V.A.: Temperaturnye processy v dejstvu-
juših skvažinah, Kazań, Izd. KGU, 1977
- [145] Šerban A.N., Babinec A.E., Cyrylnikov A.C. Dâdkin J.D.: Teplo Zemli i jeho
izvlečenje, Kiev, Naukova Dumka, 1974
- [146] Sokołowski J. (red.), Metodyka i technologia uzyskiwania użytecznej energii geo-
termicznej z pojedynczego otworu, Praca badawczo–rozwojowa, Kraków 1999
- [147] Raznievic K.: Tablice cieplne z wykresami, WNT, Warszawa 1966

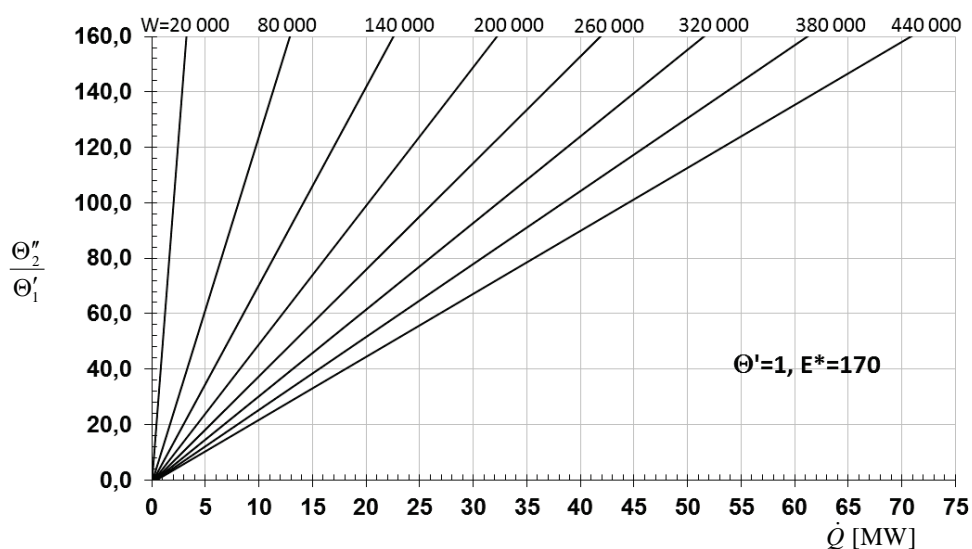
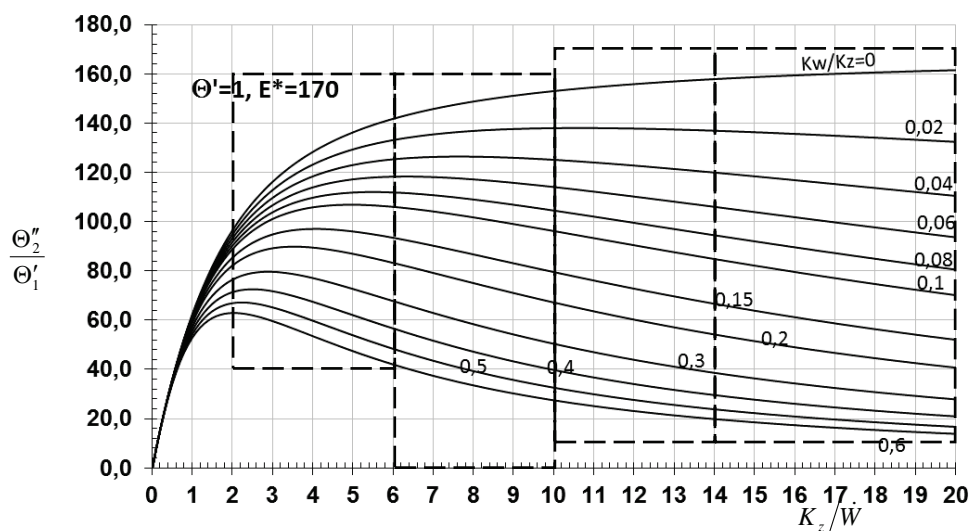
ZAŁĄCZNIK Z1



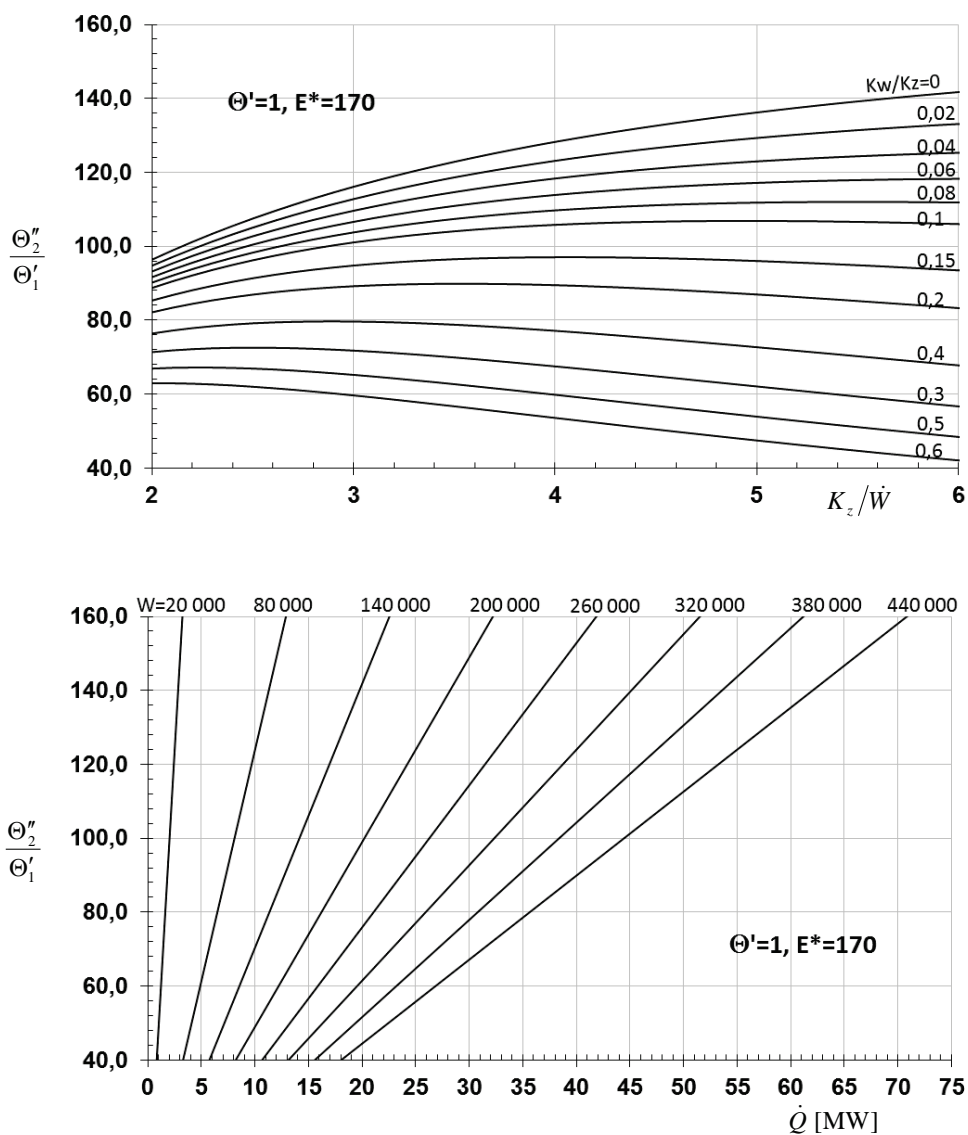
Rys. Z1.1. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 50$ °C (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



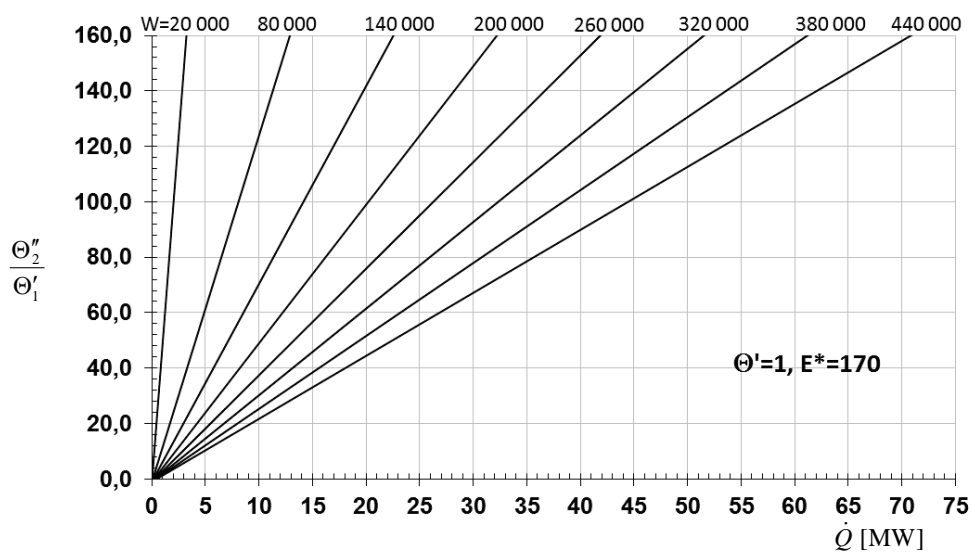
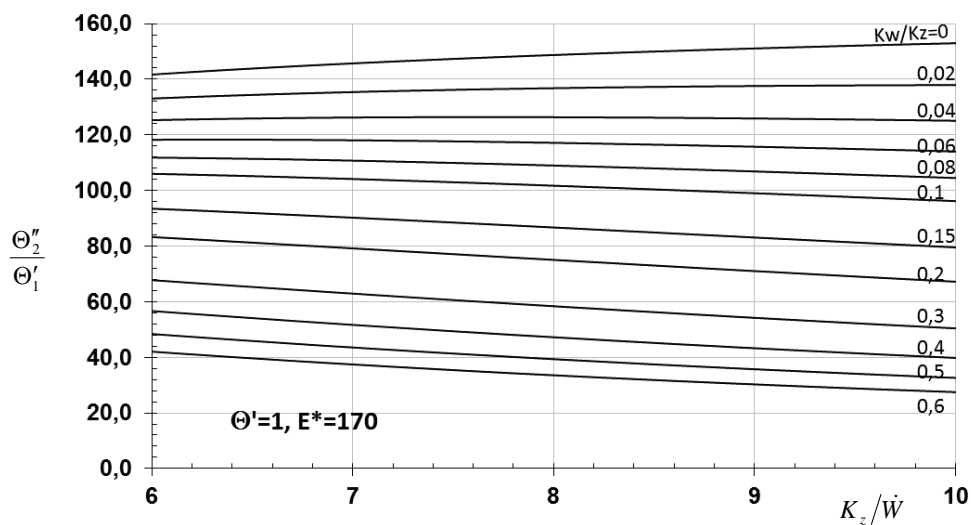
Rys. Z1.2. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $E^* = 50^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



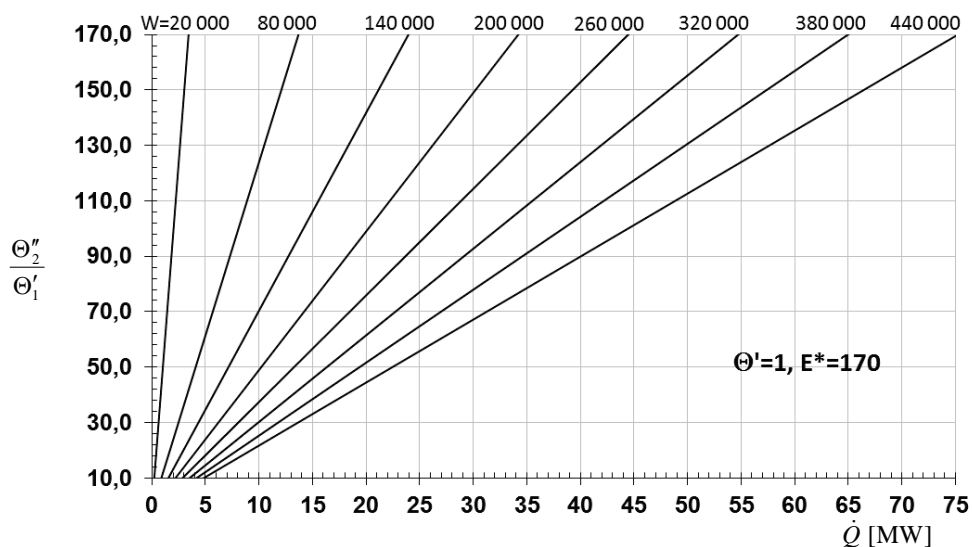
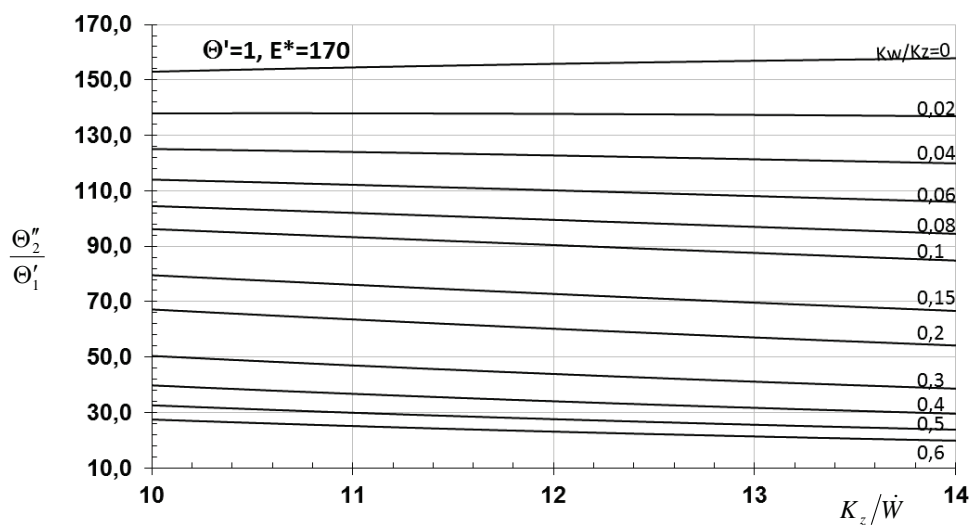
Rys. Z1.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



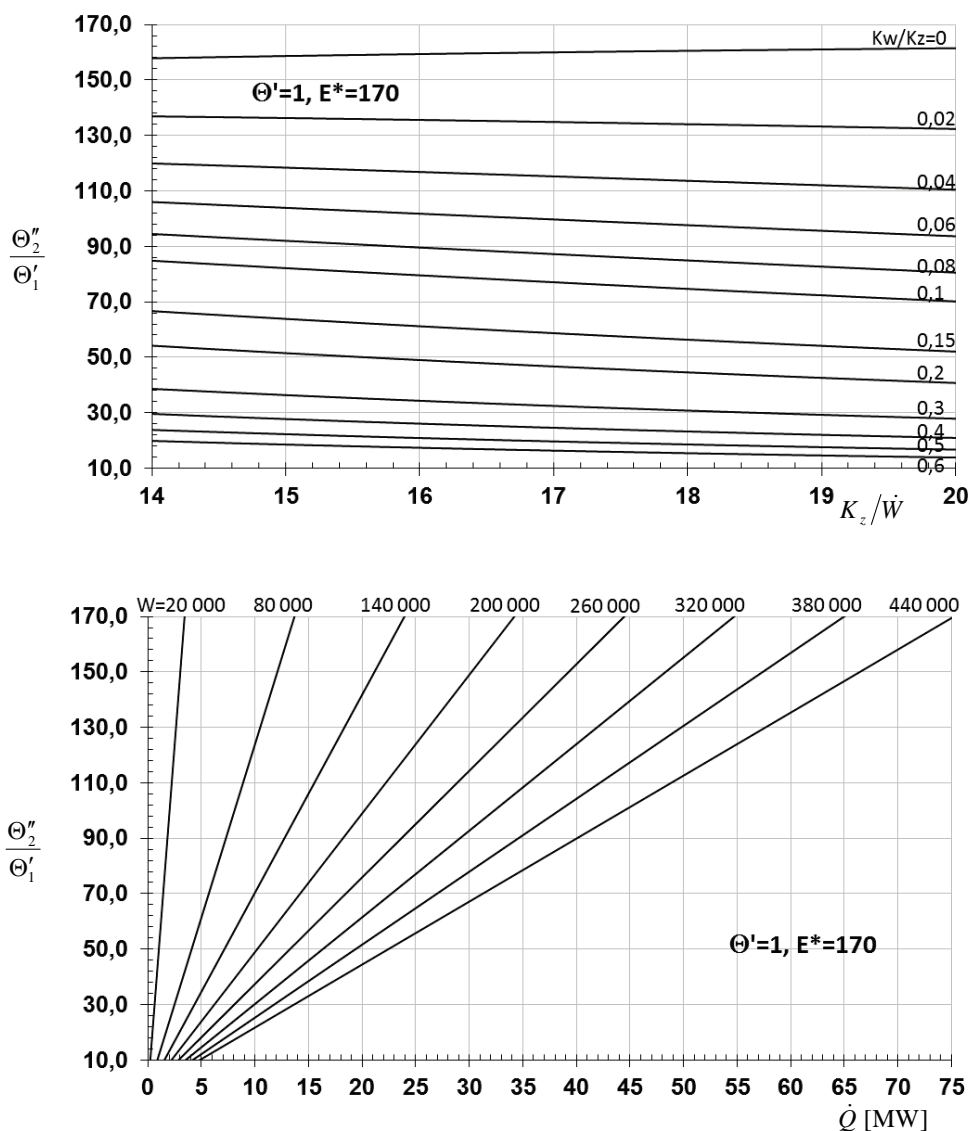
Rys. Z1.4. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta_1' = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170$ °C (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



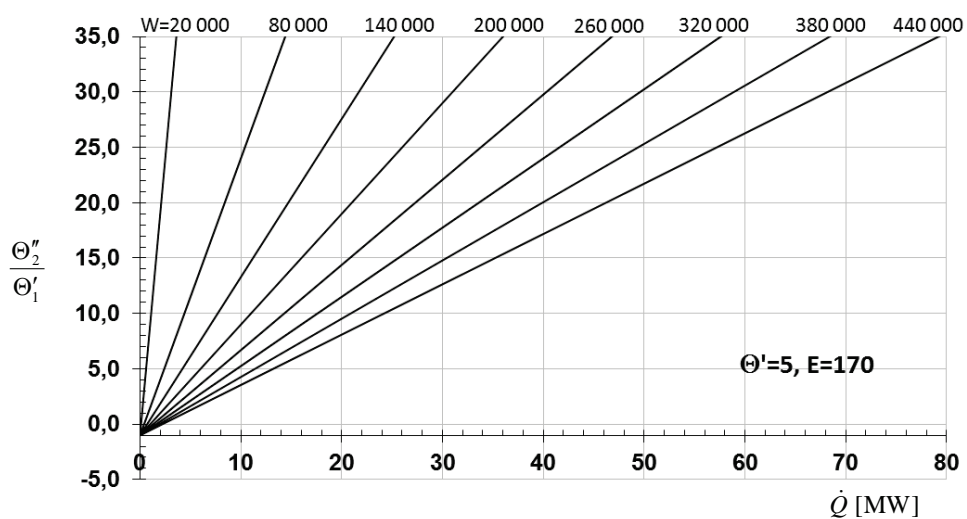
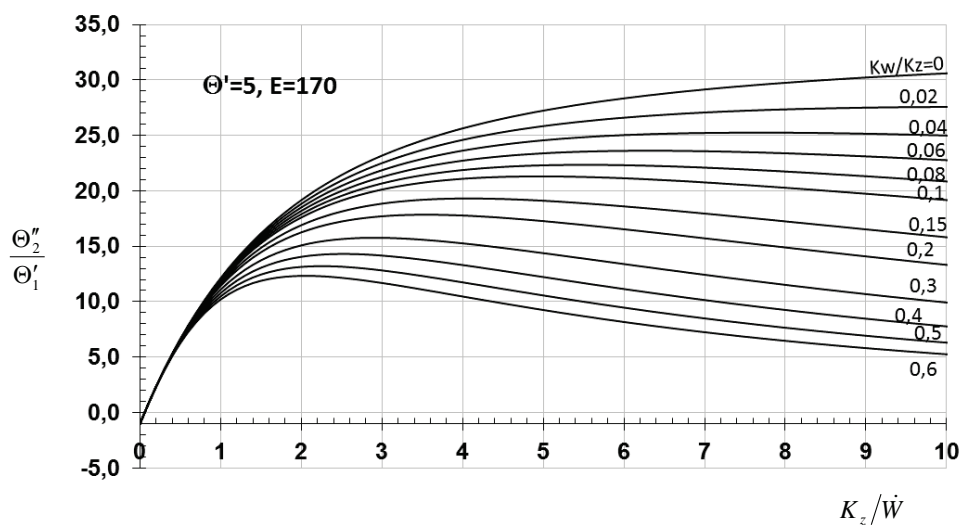
Rys. Z1.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



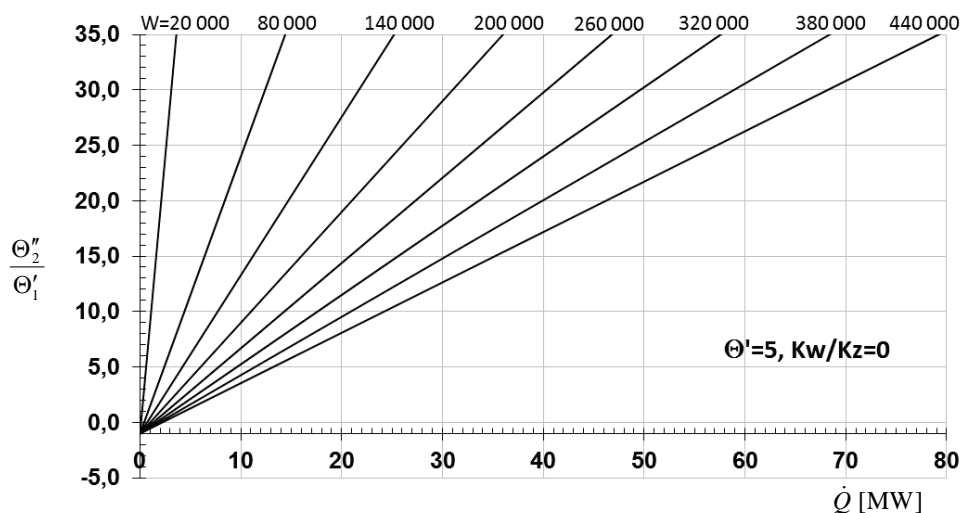
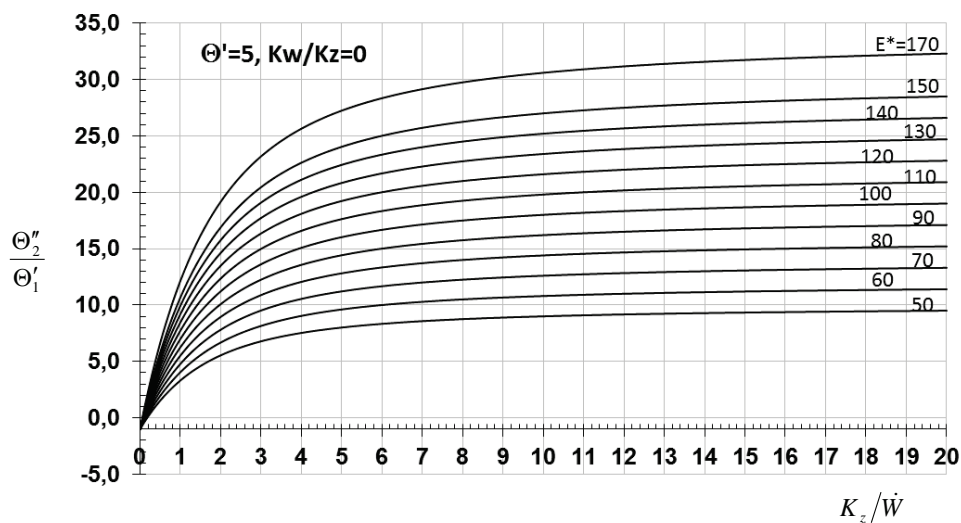
Rys. Z1.6. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



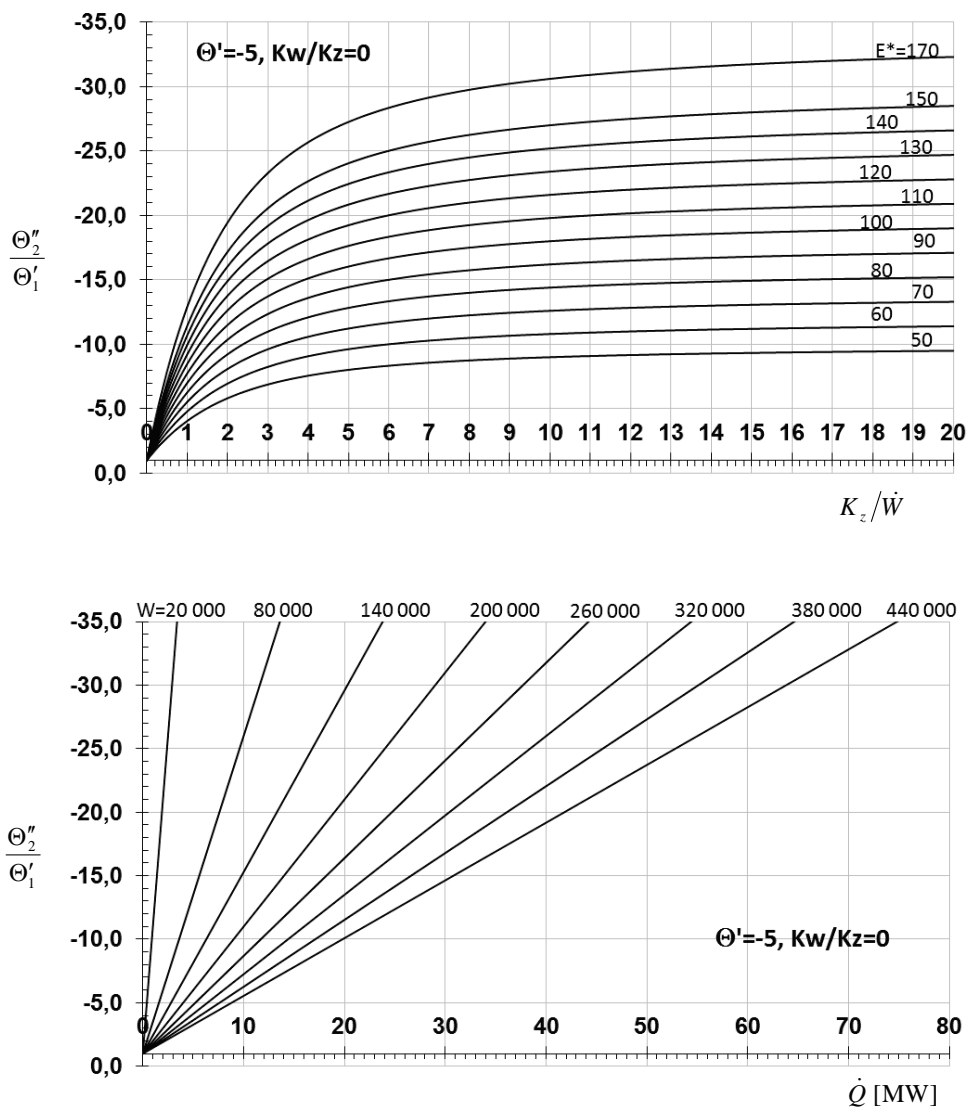
Rys. Z1.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



Rys. Z1.8. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)

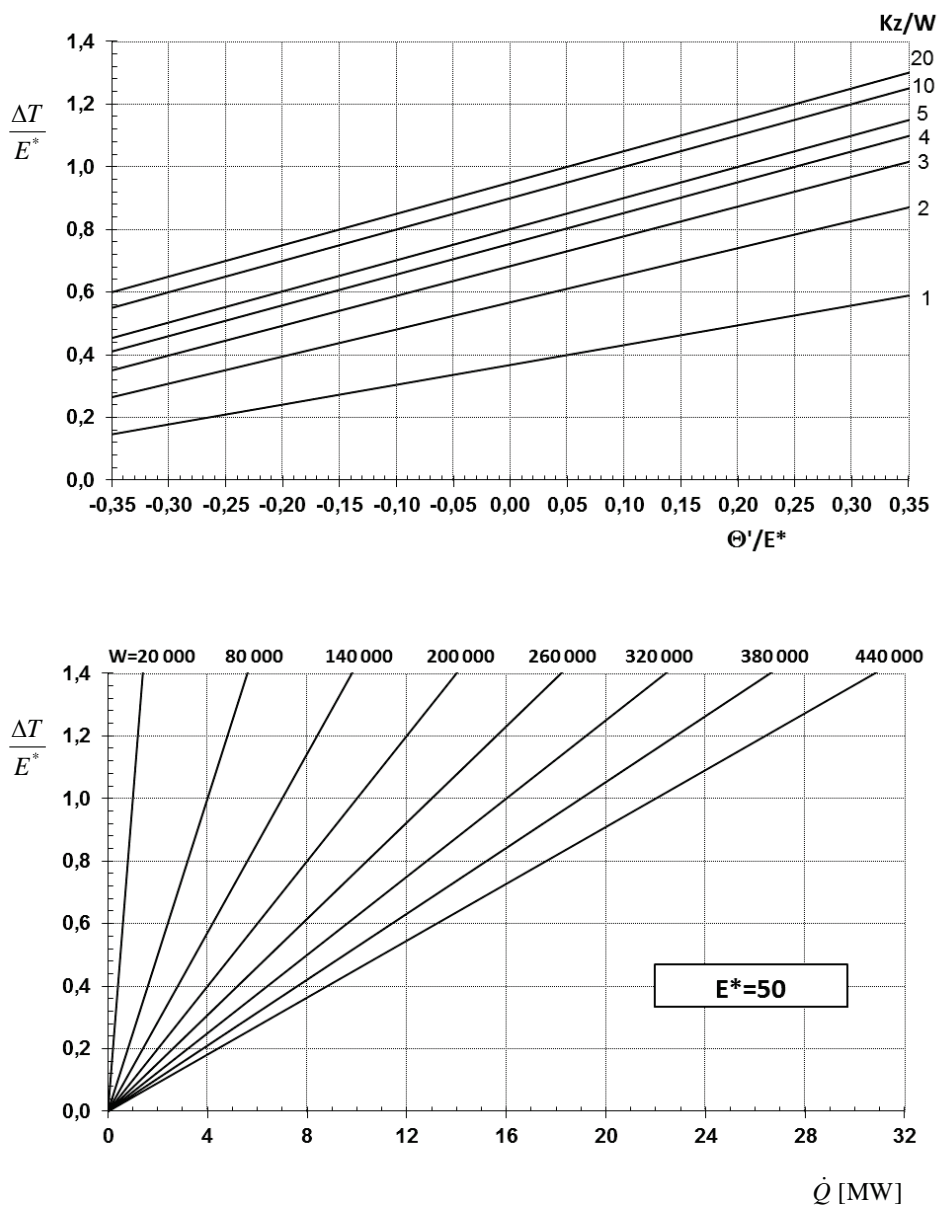


Rys. Z1.9. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)

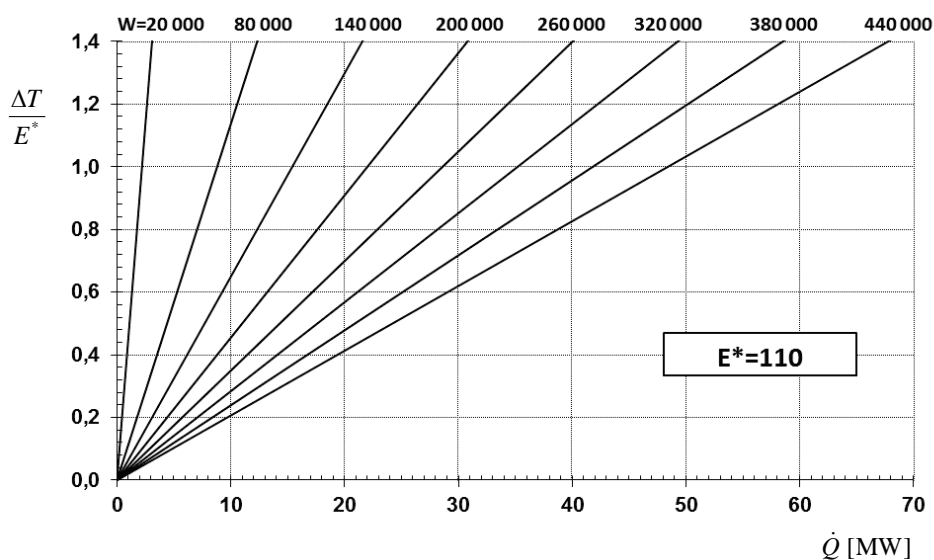
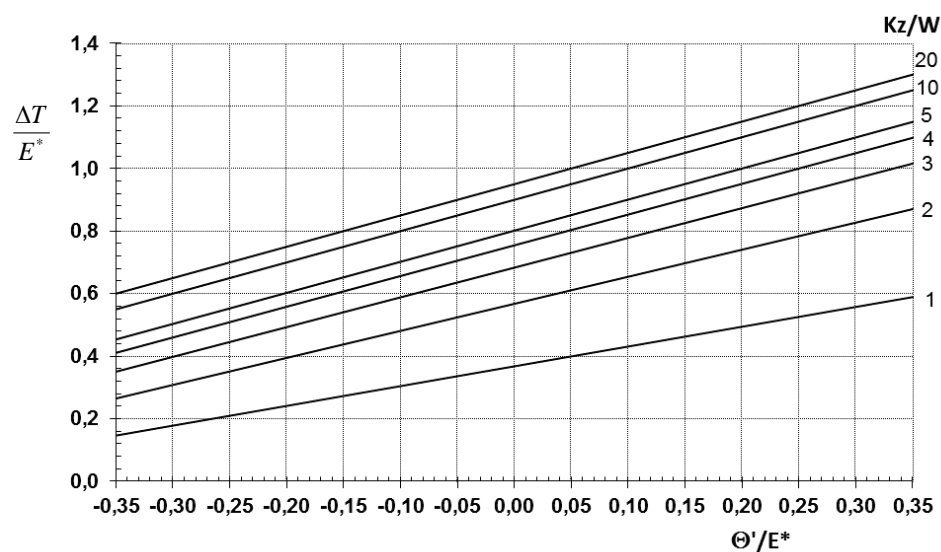


Rys. Z1.10. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = -5$ K, $K_w/K_z = 0$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)

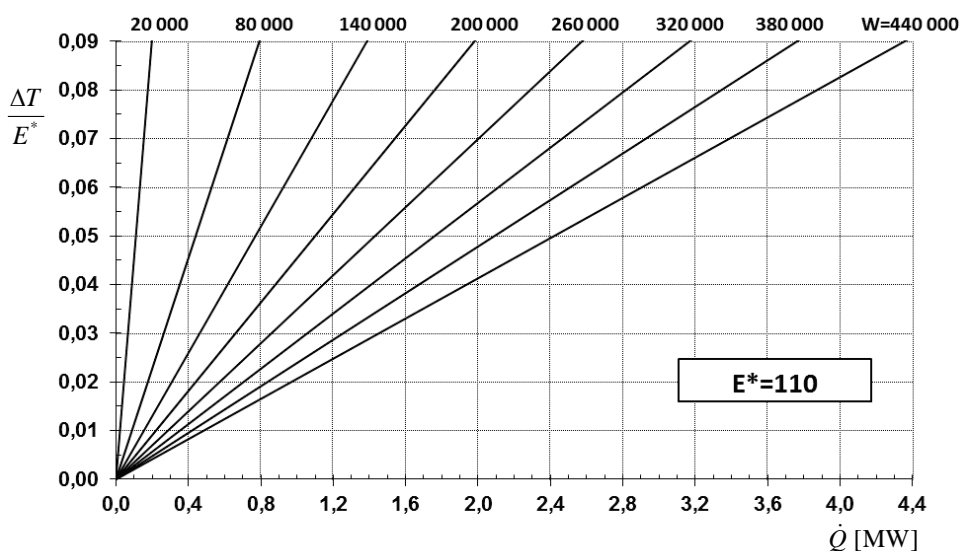
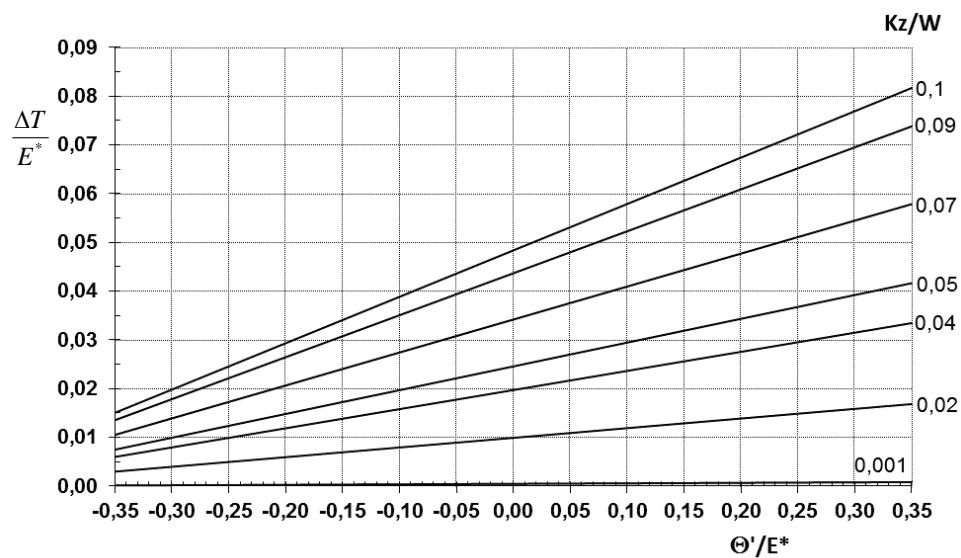
ZAŁĄCZNIK Z2



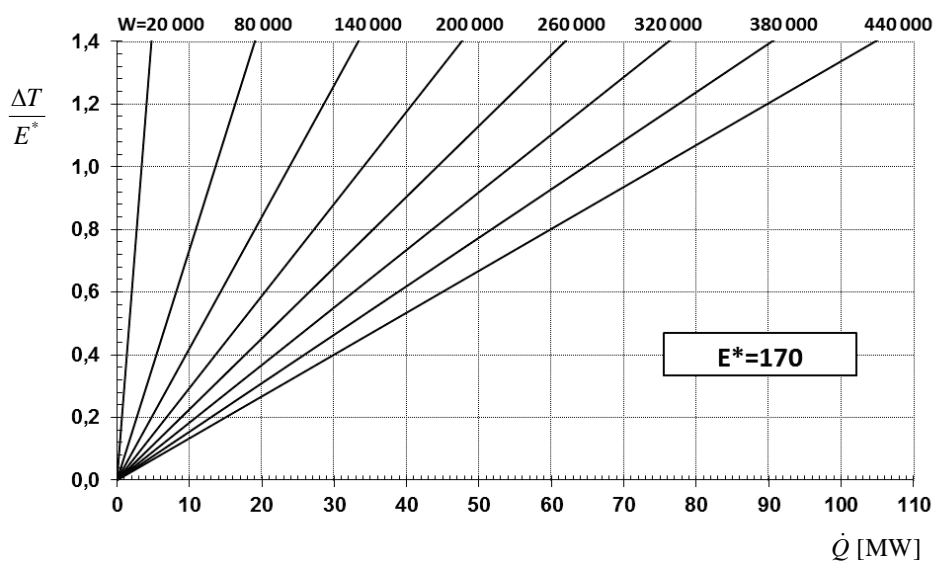
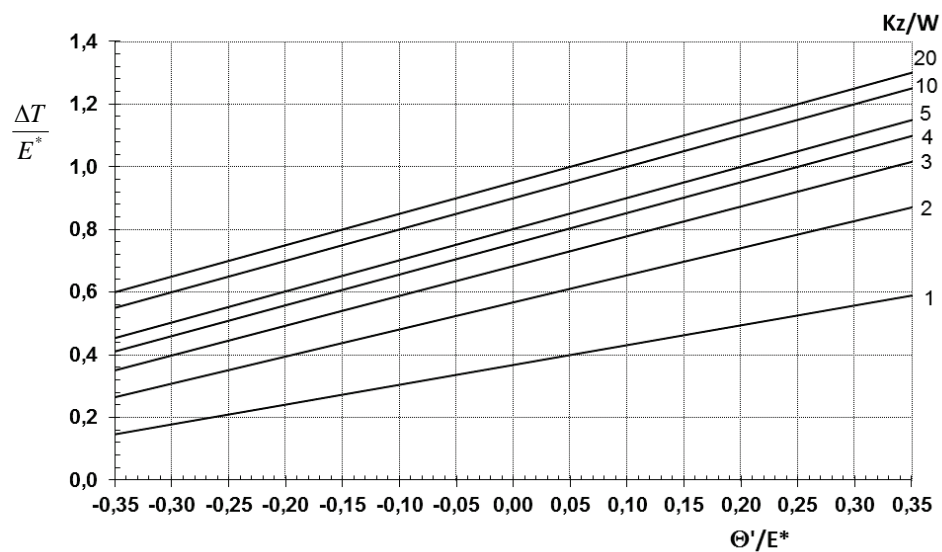
Rys. Z2.1. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z / \dot{W} – dla $E^* = 50^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



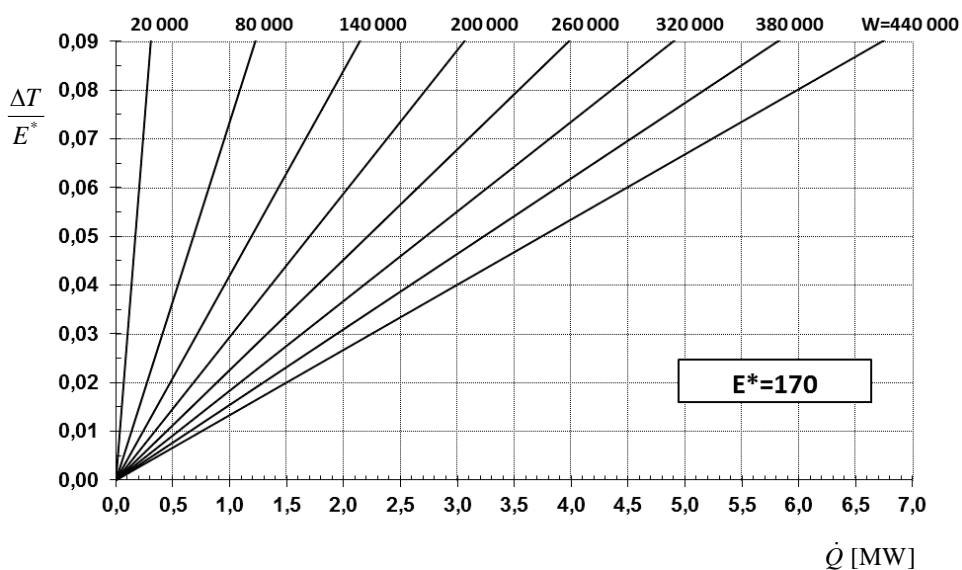
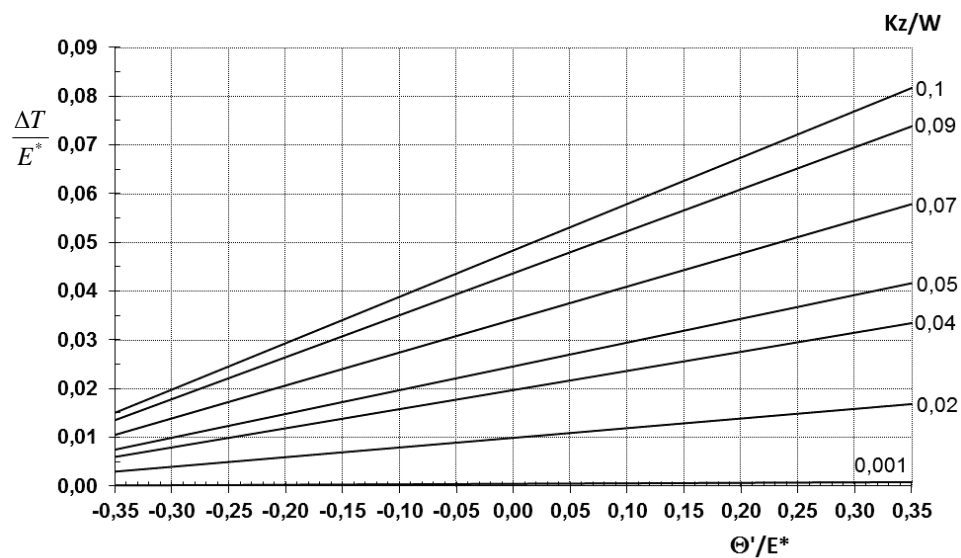
Rys. Z2.2. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 110^\circ\text{C}$ (doskona-
le zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



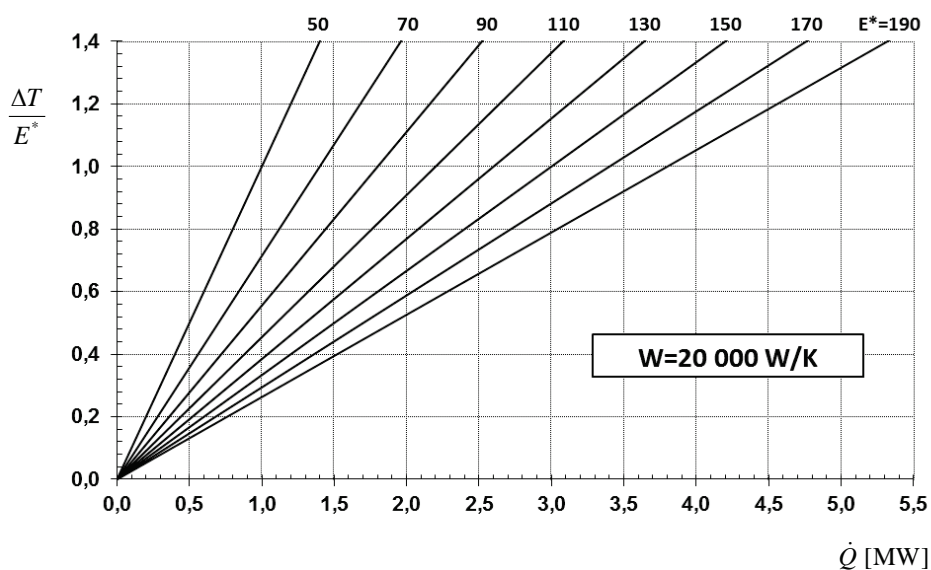
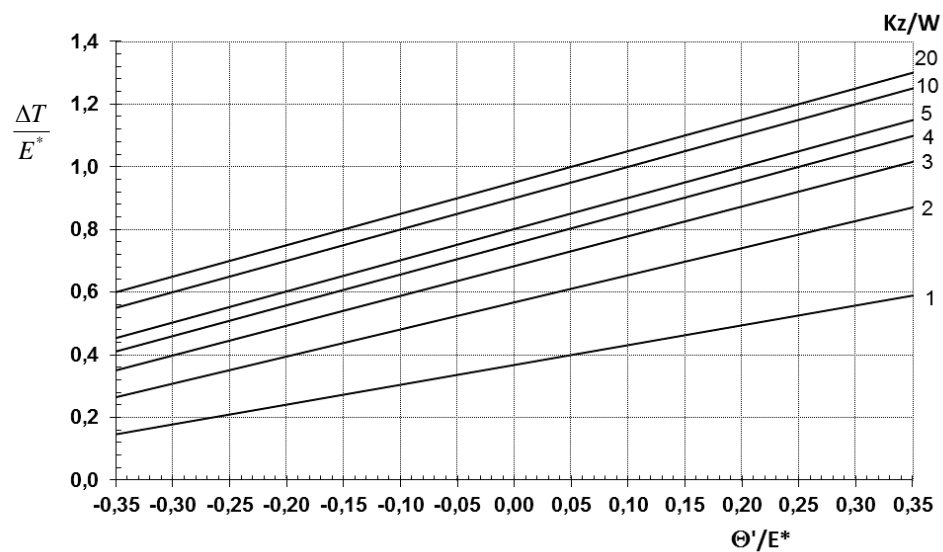
Rys. Z2.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 110^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



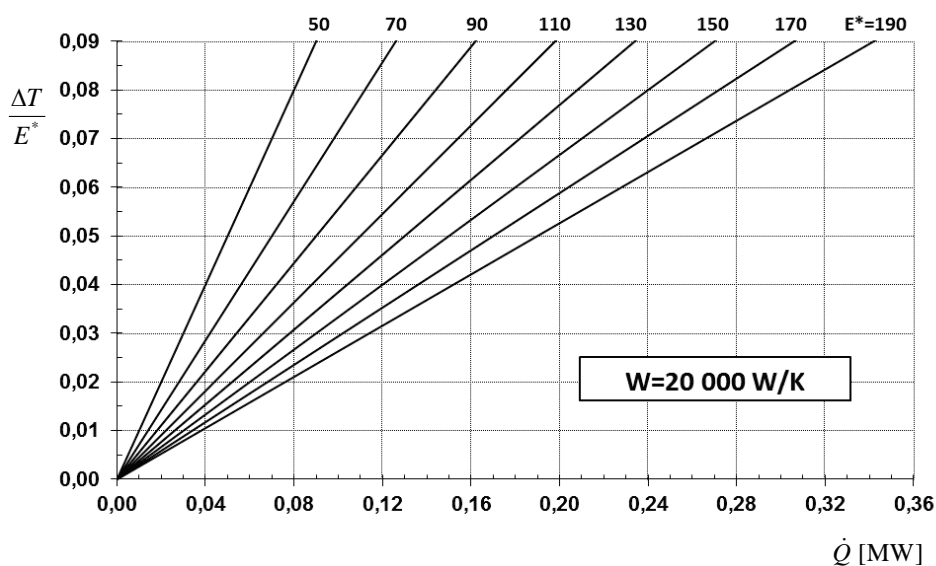
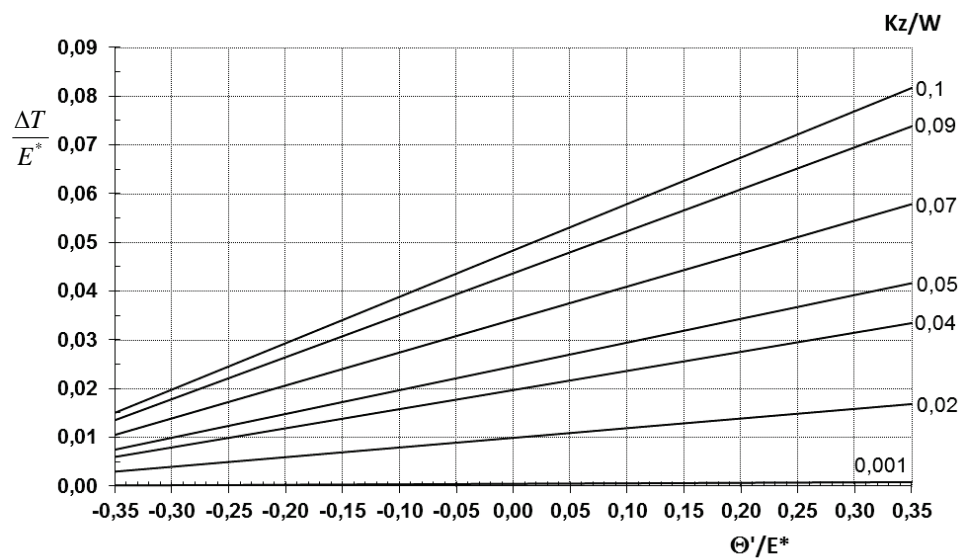
Rys. Z2.4. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



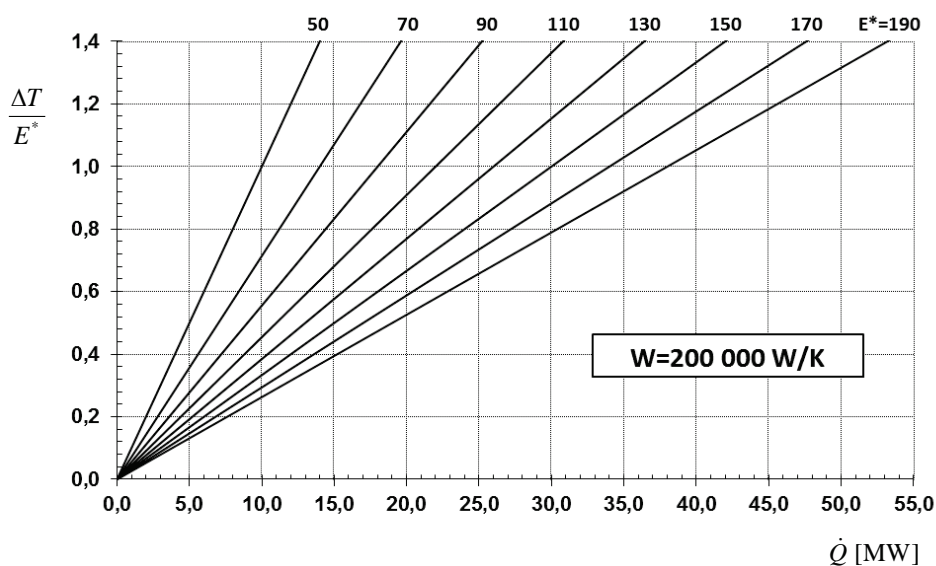
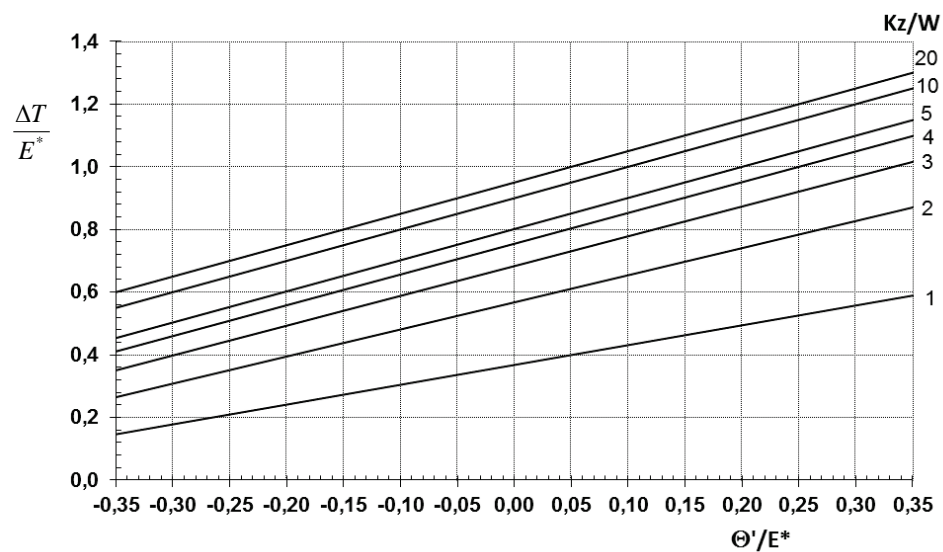
Rys. Z2.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



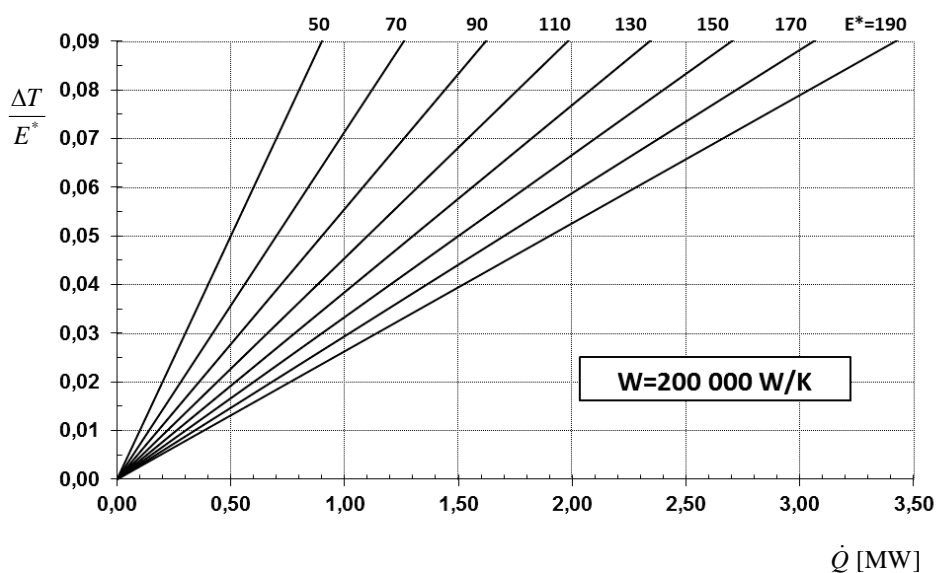
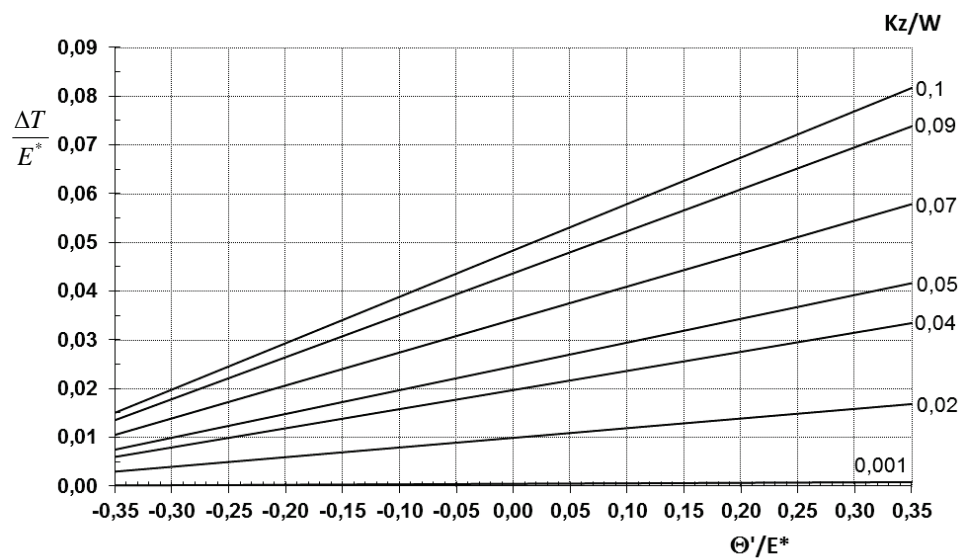
Rys. Z2.6. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 20\,000\text{ W/K}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



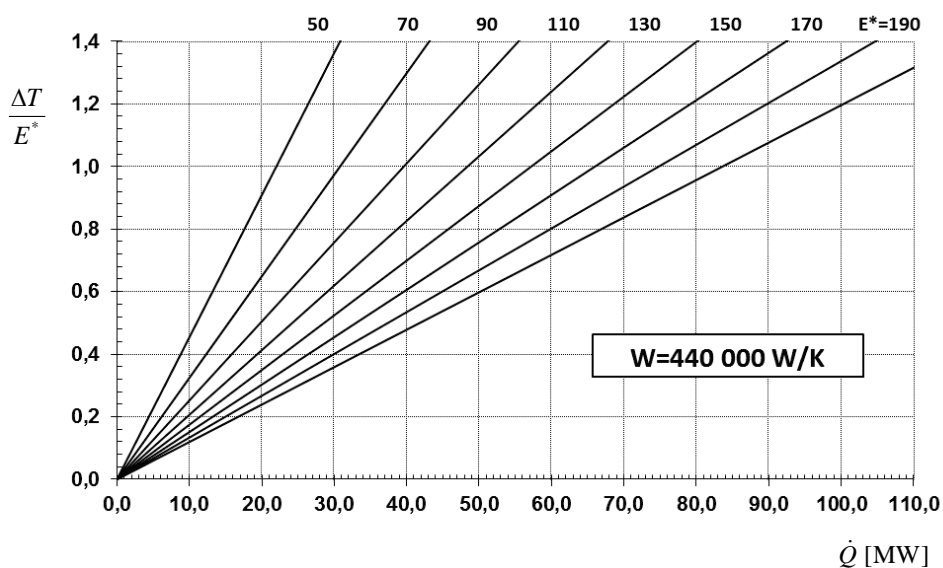
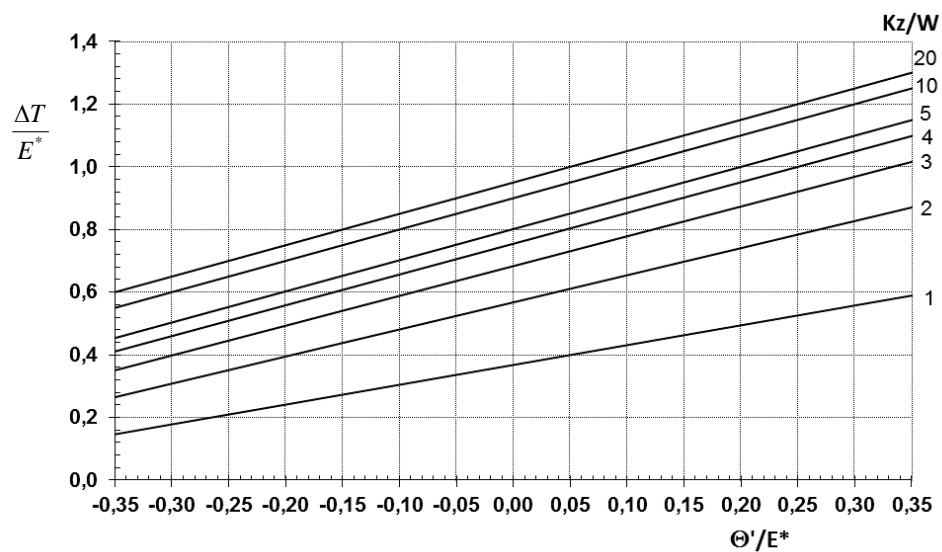
Rys. Z2.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 20\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



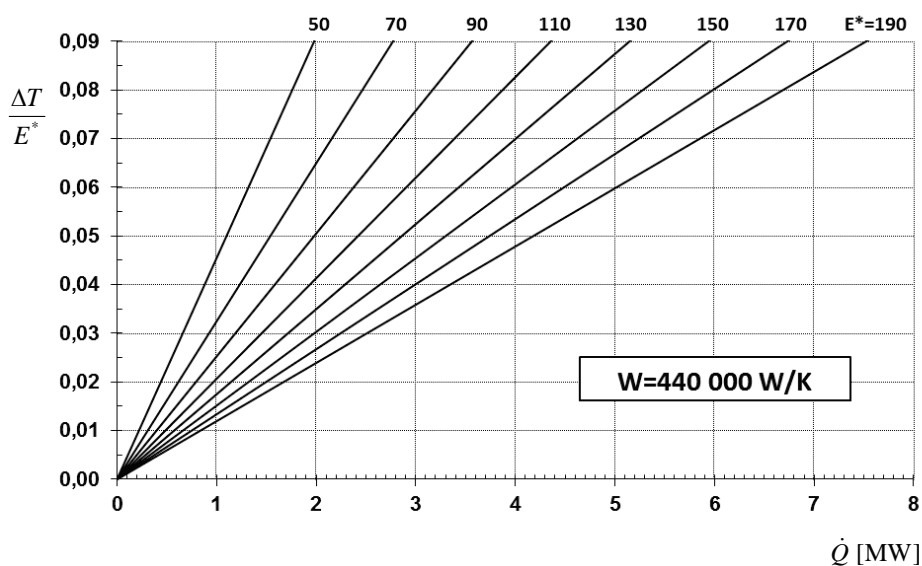
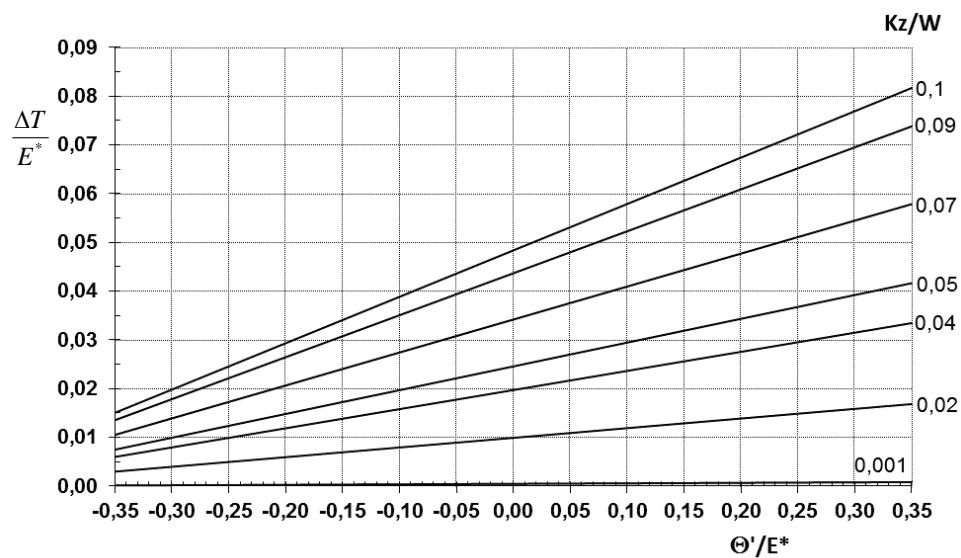
Rys. Z2.8. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 200\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



Rys. Z2.9. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 200\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)

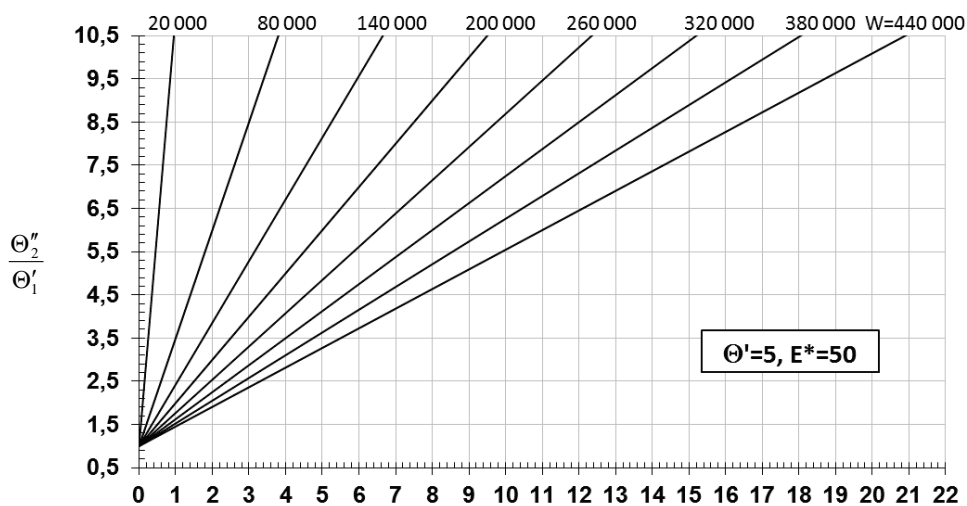
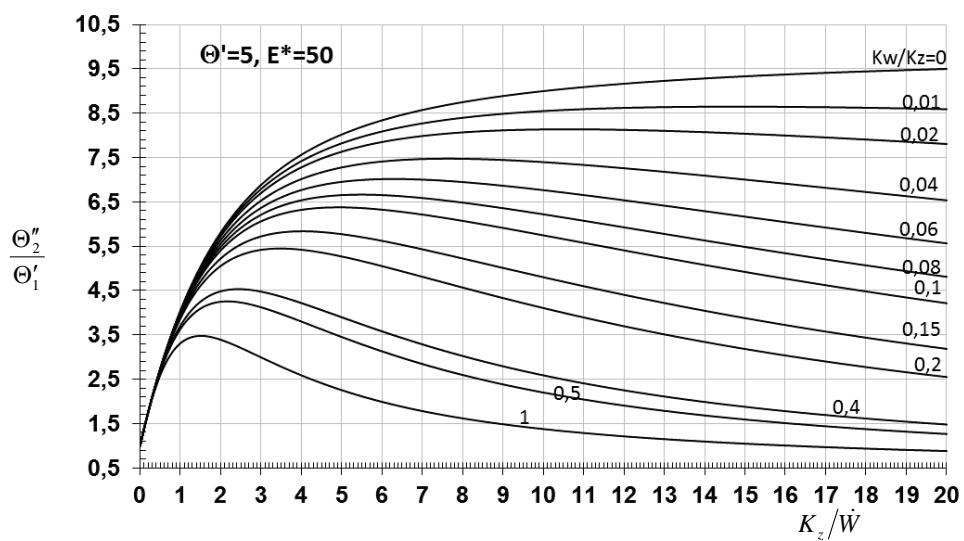


Rys. Z2.10. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 440\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)



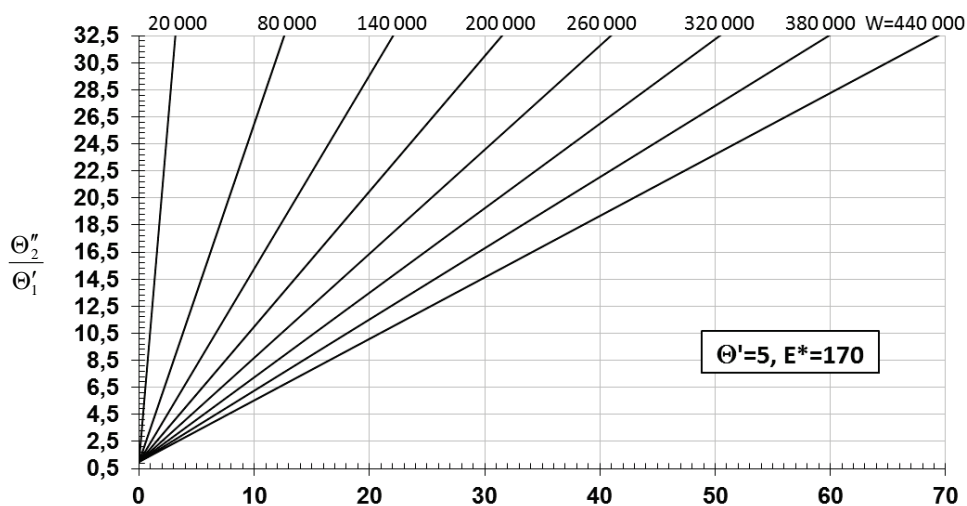
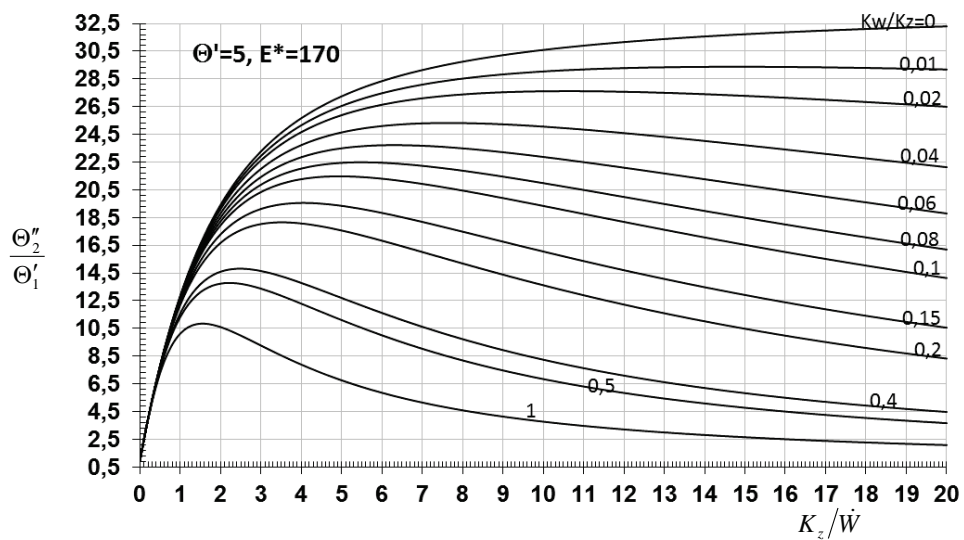
Rys. Z2.11. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 440\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)

ZAŁĄCZNIK Z3



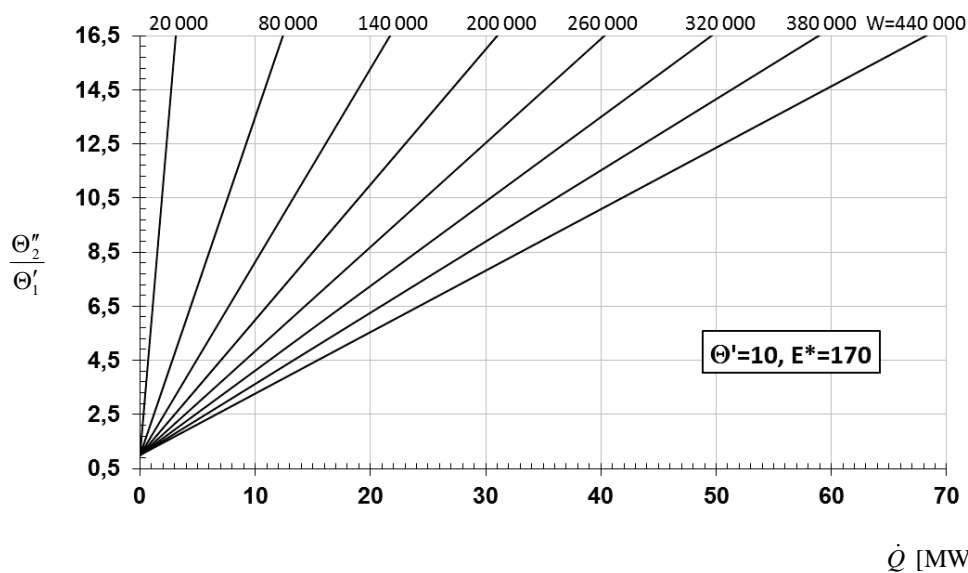
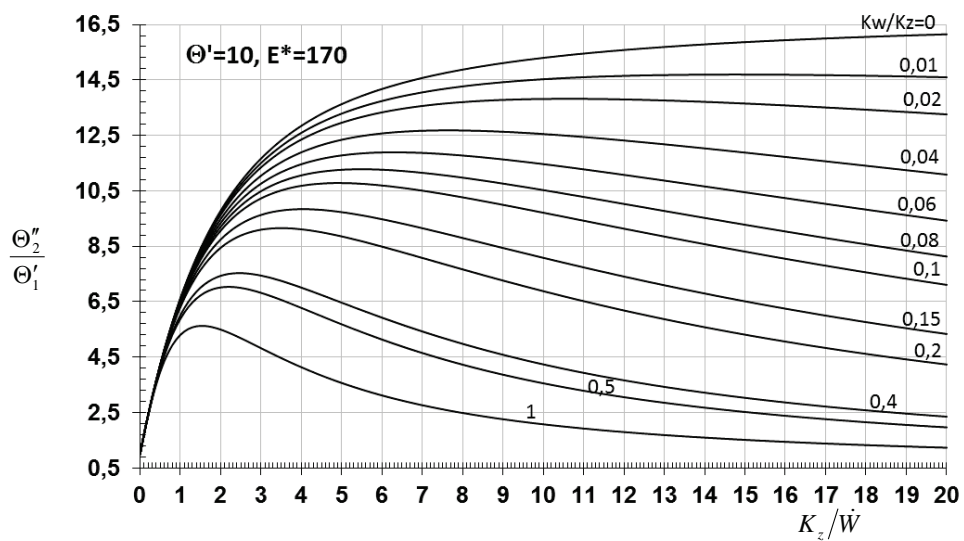
\dot{Q} [MW]

Rys. Z3.1. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $E^* = 50^\circ\text{C}$, $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)

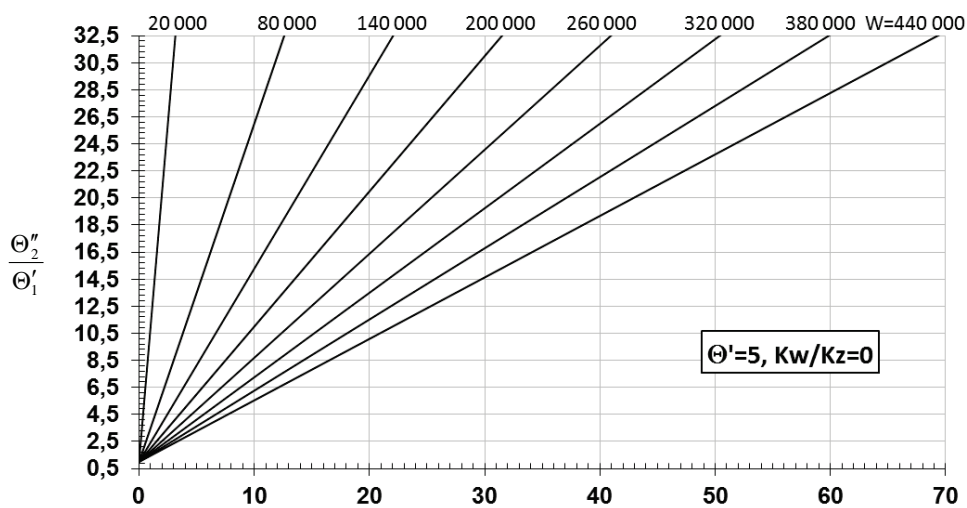
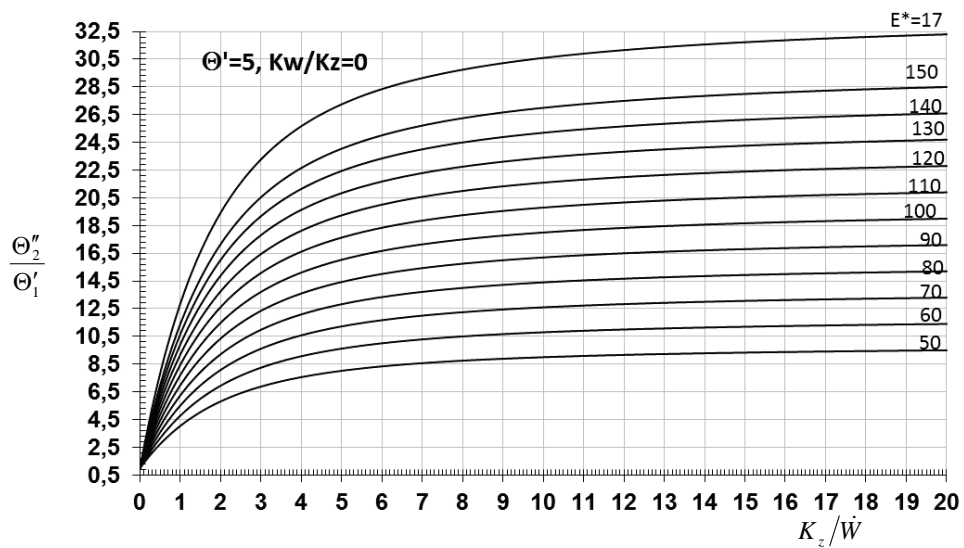


\dot{Q} [MW]

Rys. Z3.2. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$, $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)

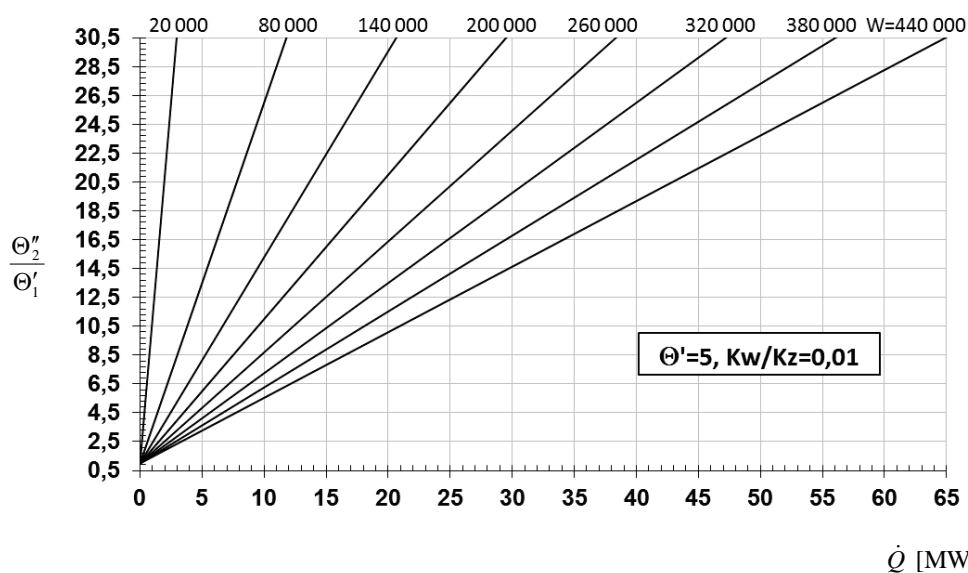
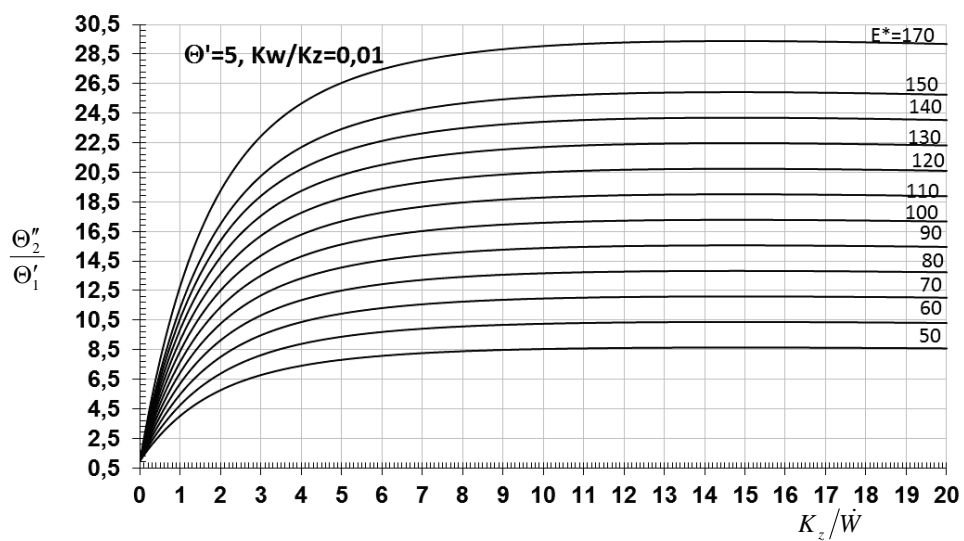


Rys. Z3.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$, $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)

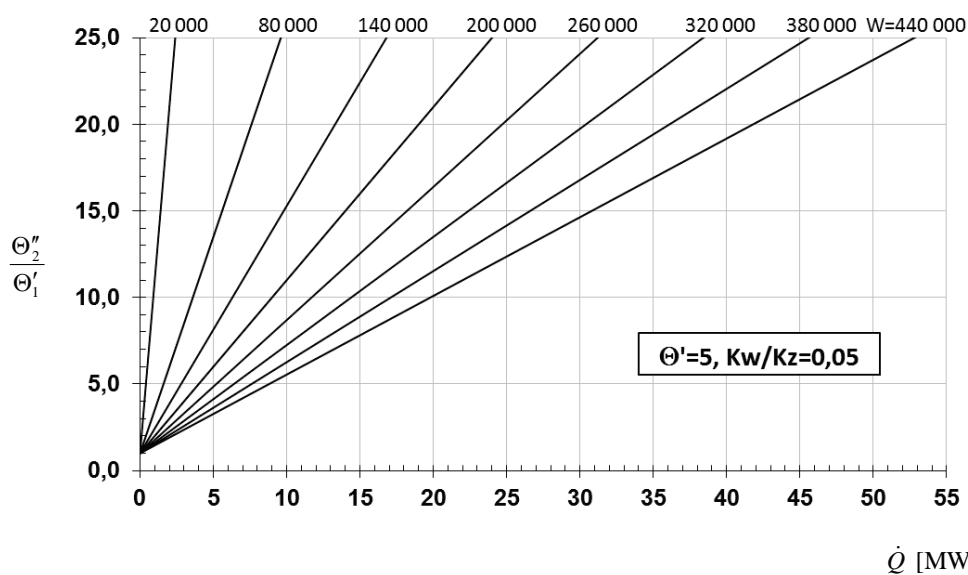
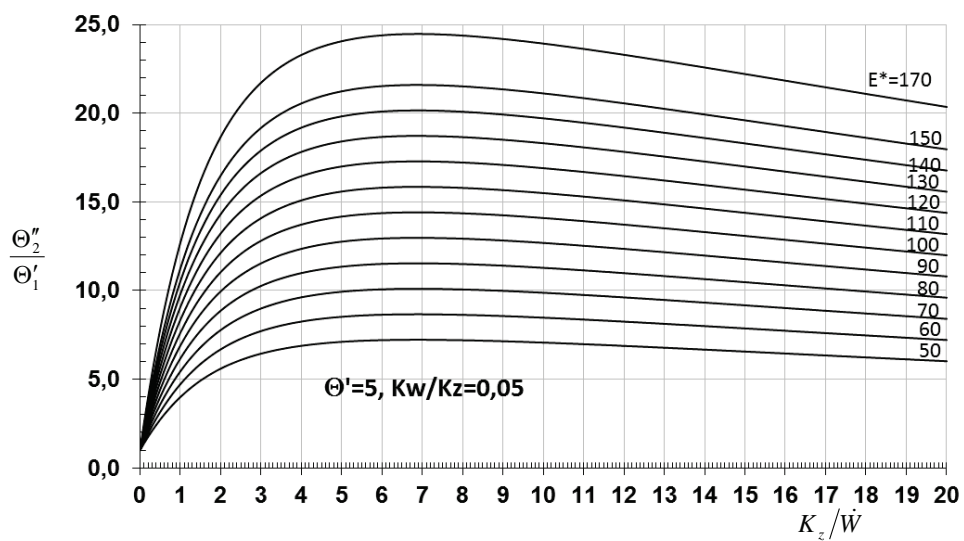


\dot{Q} [MW]

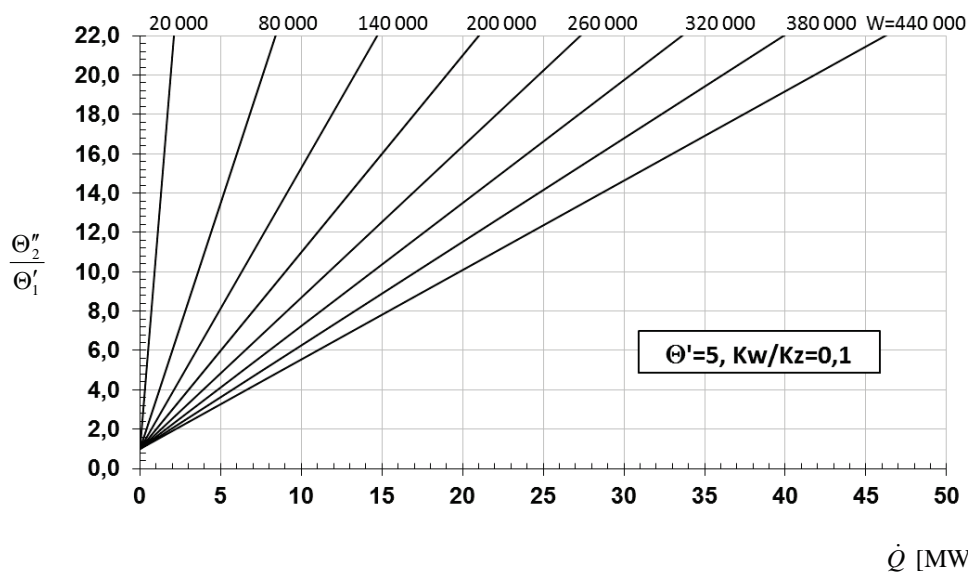
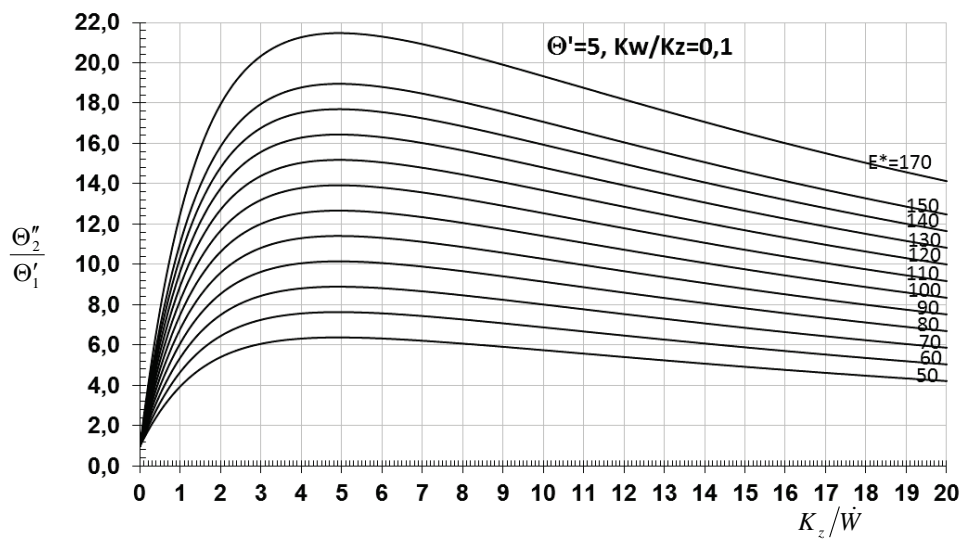
Rys. Z3.4. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)



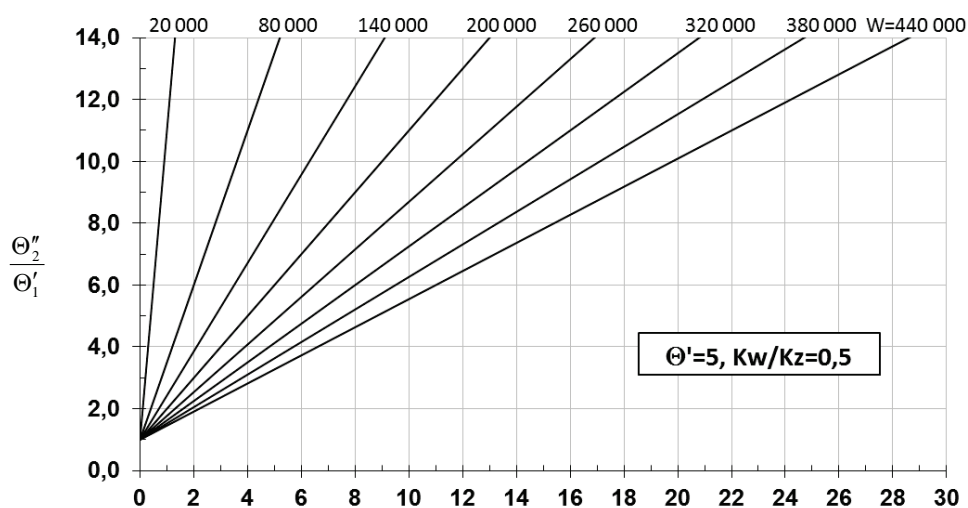
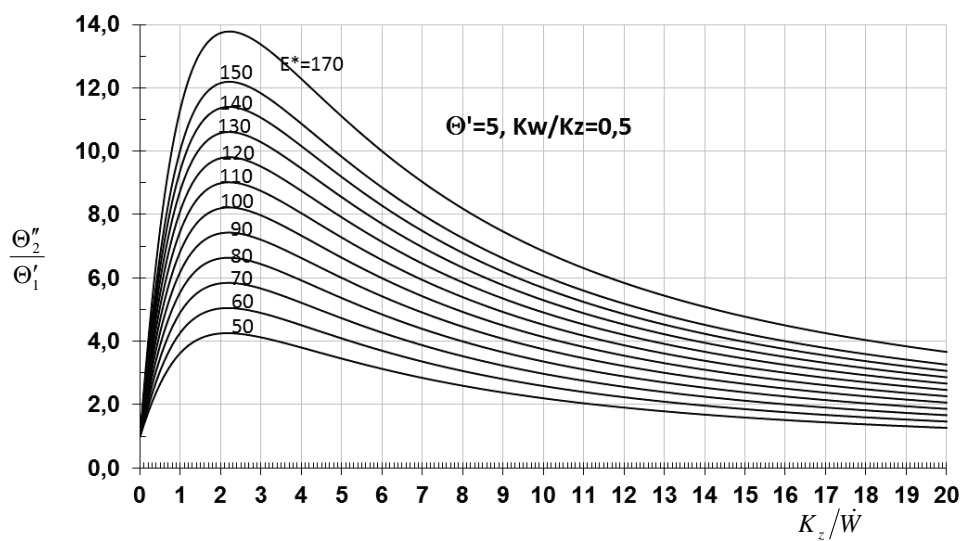
Rys. Z3.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0,01$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)



Rys. Z3.6. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0,5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)

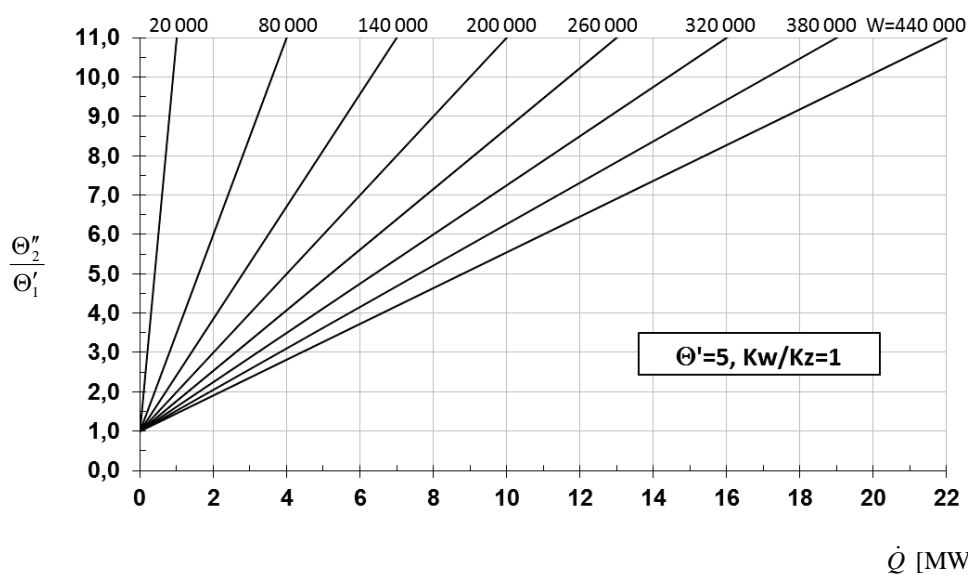
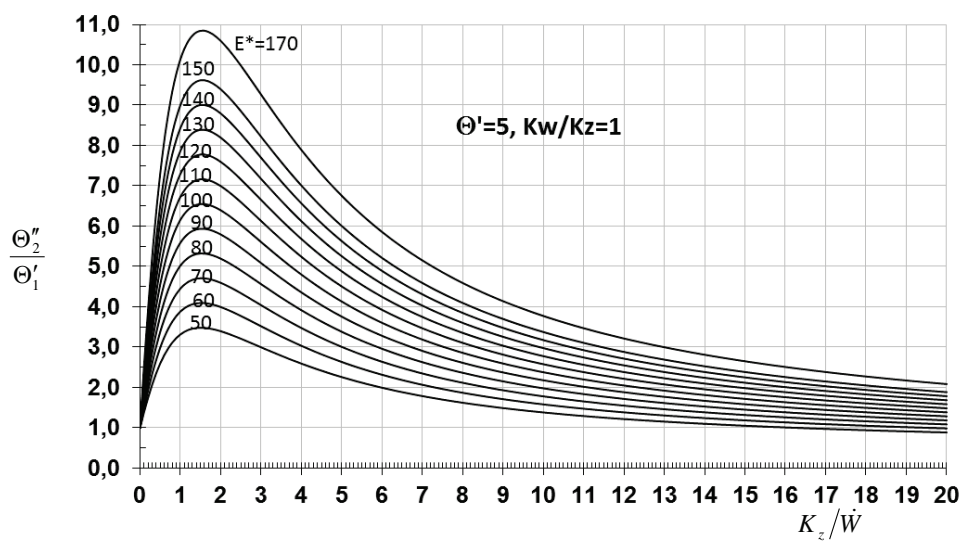


Rys. Z3.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0,1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)



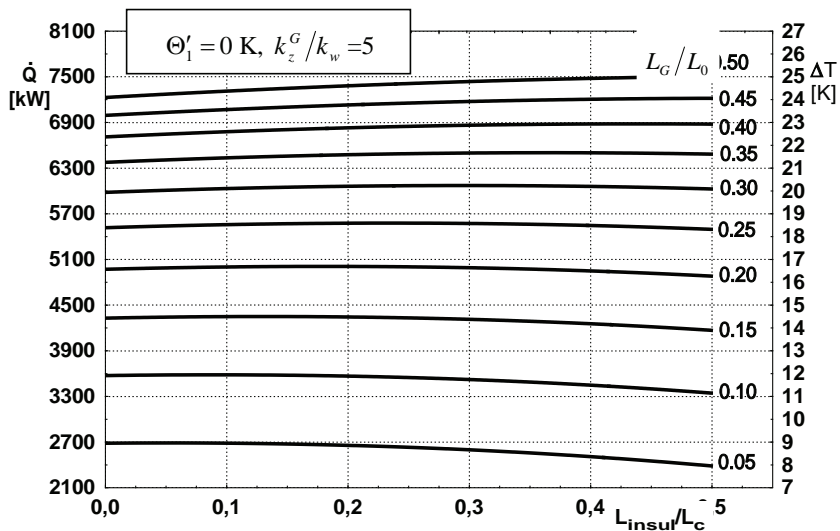
\dot{Q} [MW]

Rys. Z3.8. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0.5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)

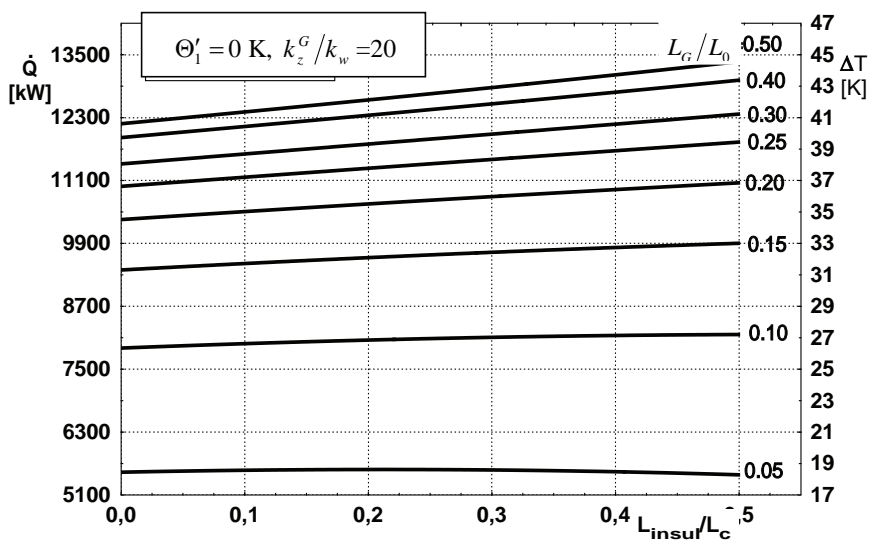


Rys. Z3.9. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)

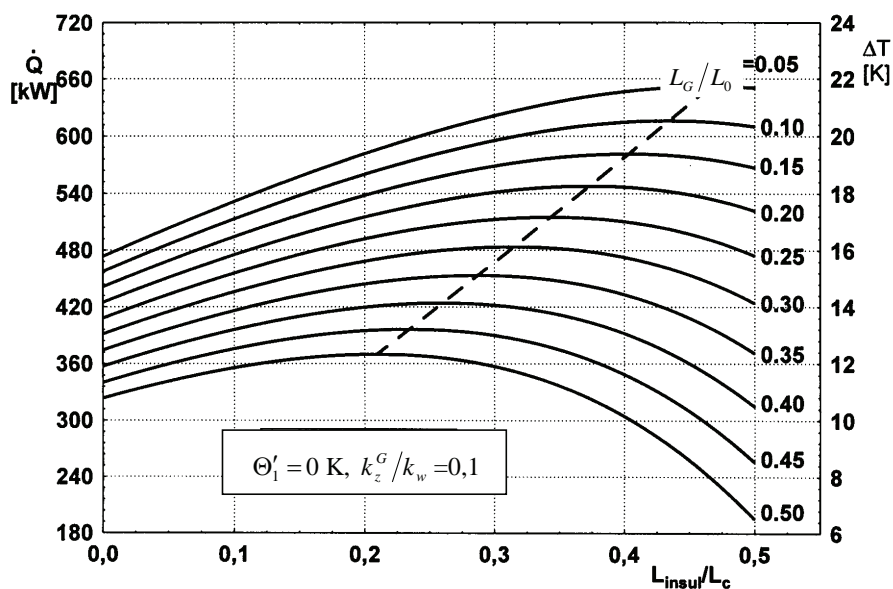
ZAŁĄCZNIK Z4



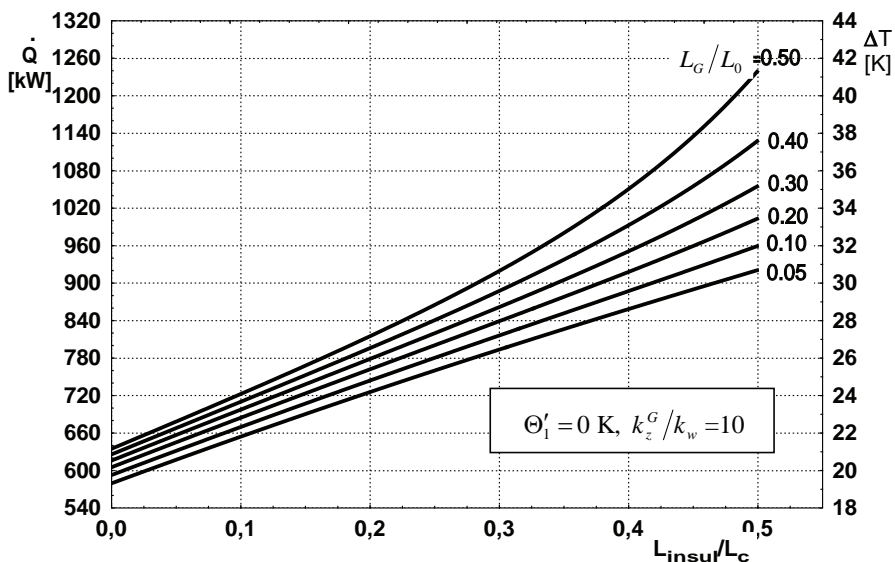
Rys. Z4.1. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\dot{W} = 300\,000$ W/K, $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



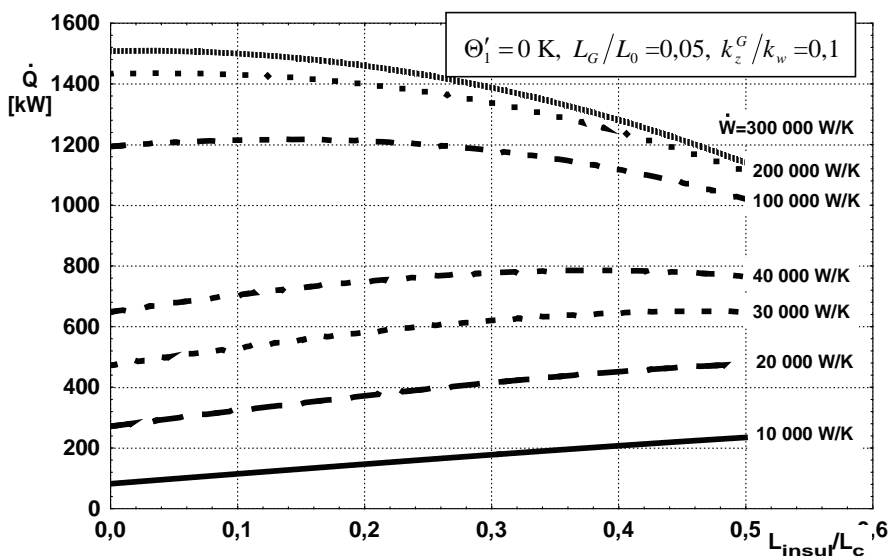
Rys. Z4.2. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\dot{W} = 300\,000$ W/K, $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 20$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



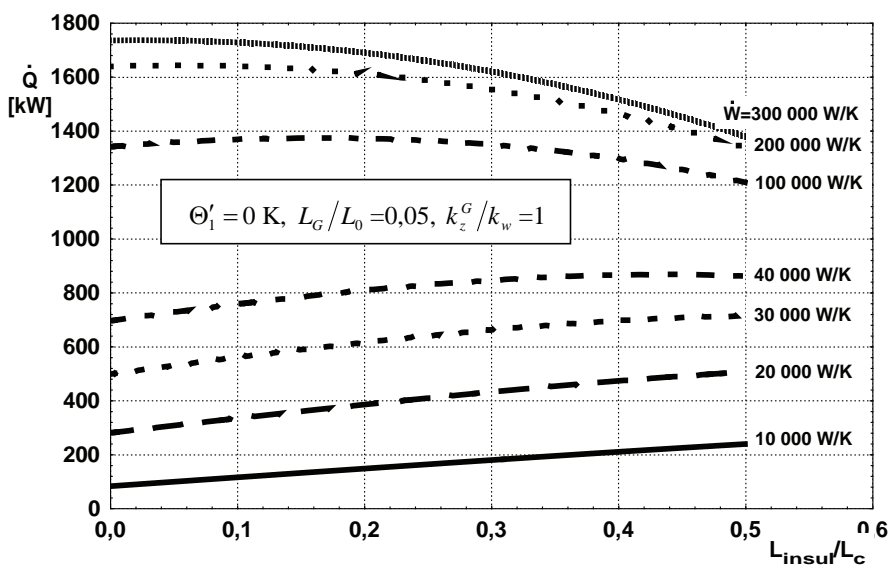
Rys. Z4.3. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\dot{W} = 30\,000 \text{ W/K}$, $\Theta'_1 = 0 \text{ K}$, $k_z^G/k_w = 0.1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



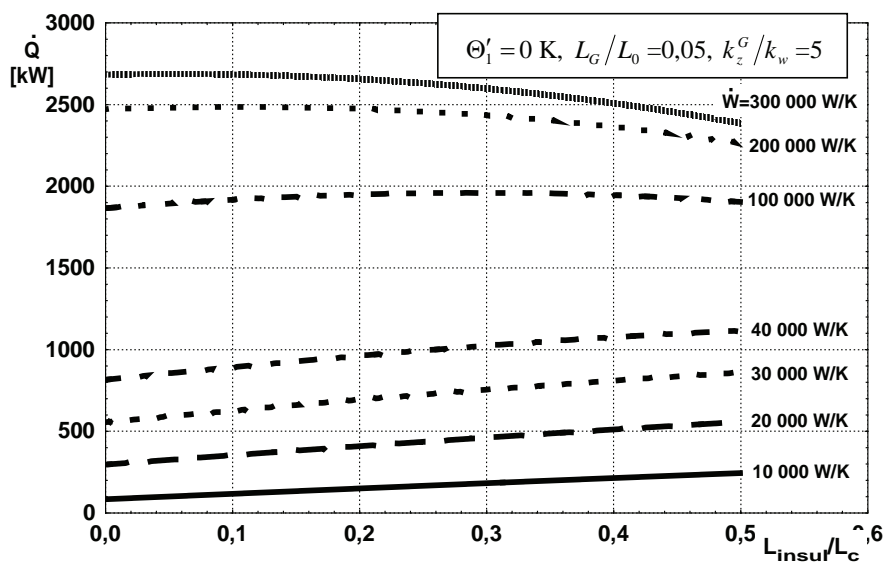
Rys. Z4.4. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\dot{W} = 30\,000 \text{ W/K}$, $\Theta'_1 = 0 \text{ K}$, $k_z^G/k_w = 10$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



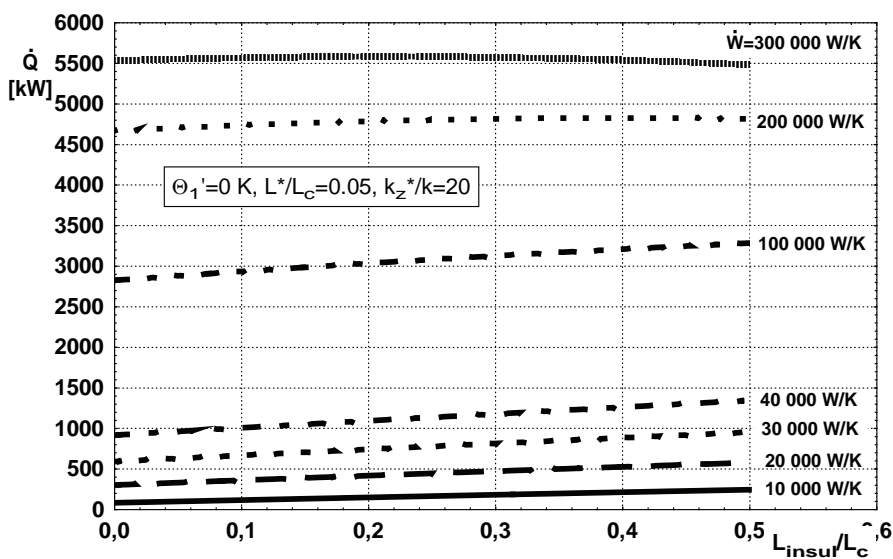
Rys. Z4.5. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta'_1 = 0$ K, $L_G/L_0 = 0.05$, $k_z^G/k_w = 0.1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



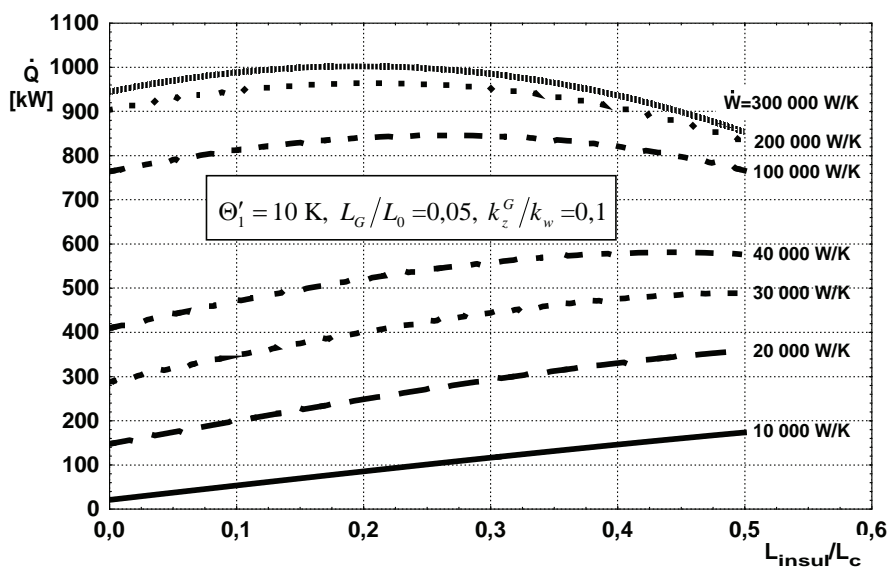
Rys. Z4.6. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta'_1 = 0$ K, $L_G/L_0 = 0.05$, $k_z^G/k_w = 1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



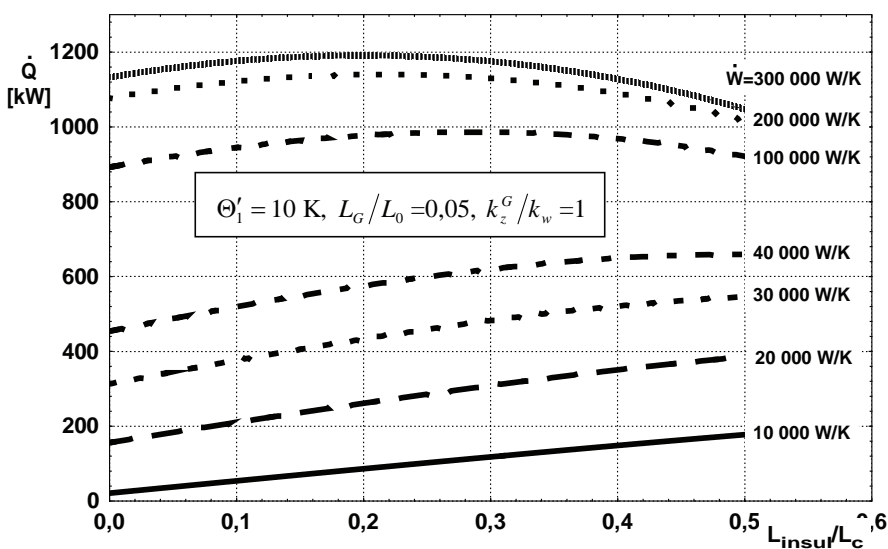
Rys. Z4.7. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta_1' = 0$ K, $L_G/L_0 = 0.05$, $k_z^G/k_w = 5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



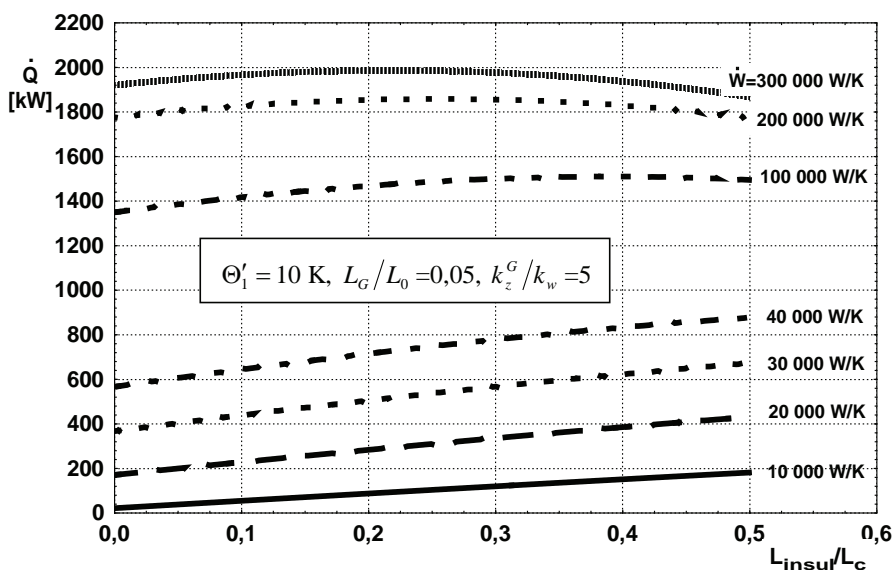
Rys. Z4.8. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta_1' = 0$ K, $L_G/L_0 = 0.05$, $k_z^G/k_w = 20$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



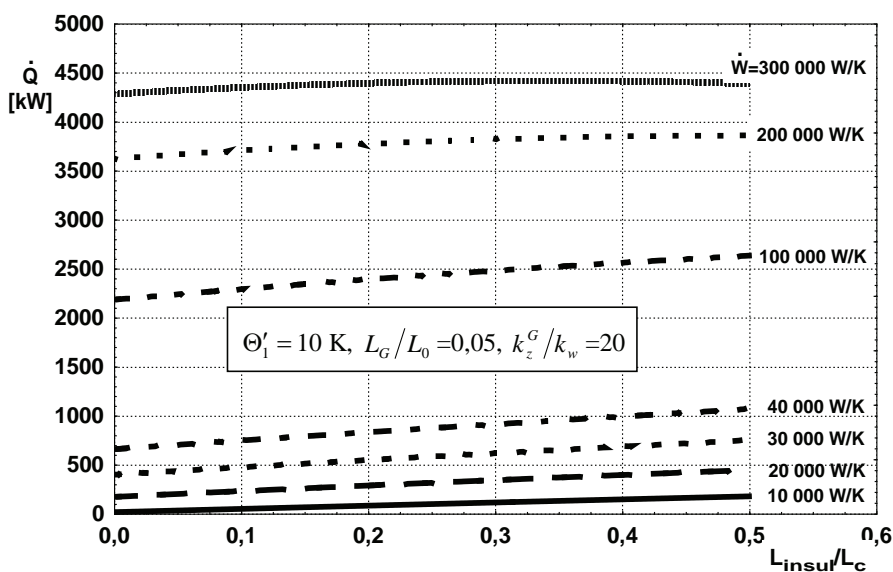
Rys. Z4.9. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 0,1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



Rys. Z4.10. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



Rys. Z4.11. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)



Rys. Z4.12. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika ciepła typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 20$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy zmiennej temperaturze gruntu	20
Rys. 2.2. Schemat fragmentu kanału pierścieniowego (a) i wewnętrznego (b) wymiennika geotermicznego typu Field z przeprowadzoną osłoną bilansową	21
Rys. 2.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K, $E^* = 50$ °C	30
Rys. 2.3a. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K, $E^* = 50$ °C	31
Rys. 2.4. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy doskonale zaizolowanej rurze wewnętrznej	32
Rys. 2.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 50$ °C (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika)	33
Rys. 2.6. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy zmiennej temperaturze gruntu (temperatura zatłaczania jest większa od temperatury gruntu)	35
Rys. 2.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K, $E^* = 50$ °C	38
Rys. 2.8. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy doskonale zaizolowanej rurze wewnętrznej (temperatura na zatłaczaniu jest większa od temperatury gruntu)	39
Rys. 2.9. Profile temperaturowe w wymienniku typu Field z zaznaczeniem punktu x_o , przy którym temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu oraz punktu x_o^* , przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość, co przy $x = 0$	40
Rys. 2.10. Wpływ parametru E^* na wydajność cieplną geotermalnego wymiennika typu Field (dla $\dot{W} = 30\,000$ W/K) dla różnic temperatur $\Theta'_1 = 5$ K oraz $\Theta'_1 = 10$ K	42
Rys. 2.11. Wpływ parametru E^* na wydajność cieplną geotermalnego wymiennika typu Field (dla $\dot{W} = 30\,000$ W/K) dla różnic temperatur $\Theta'_1 = 15$ K oraz $\Theta'_1 = 20$ K	43
Rys. 2.12. Wpływ parametru k_{z1}^* na wydajność cieplną geotermalnego wymiennika typu Field dla wybranych wartości Θ' ($\dot{W} = 30\,000$ W/K, $E^* = 54$ °C)	44

Rys. 2.13. Wpływ parametru k_{z1}^* na odległość x_o^* , przy której temperatura czynnika osiąga tę samą wartość co przy $x = 0$	44
Rys. 2.14. Wpływ parametru k_{z1}^* na odległość x_o , przy której temperatura czynnika jest równa temperaturze gruntu (do osiągnięcia wartości x_o zatłaczany czynnik oddaje ciepło do gruntu; po przekroczeniu punktu x_o następuje pobieranie ciepła z gruntu)	45
Rys. 2.15. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła: a) wariant bez izolacji, b) wariant z izolacją ($\Theta'_{2\text{ ins}} > \Theta'_{2\text{ ins}}, \Theta''_{2\text{ ins}} > \Theta''_{2\text{ ins}}, \Theta'_1 = 0$)	46
Rys. 2.16. Możliwości pozyskiwania energii z wymiennika geotermalnego o długości 4000 m z zaznaczonymi wydzielonymi obszarami współpracy wymiennik geotermalny – sieć ciepłownicza w przypadku przyrostu temperatury: (a) $\Delta T = 0\text{--}50\text{ K}$, (b) $\Delta T = 4\text{--}20\text{ K}$	48
Rys. 2.16b. Możliwości pozyskiwania energii z wymiennika geotermalnego o długości 4000 m (obszar współpracy wymiennik geotermalny – sieć ciepłownicza) w przypadku przyrostu temperatury $\Delta T = 4\text{--}20\text{ K}$	49
Rys. 2.17. Wpływ zastosowania izolacji na kształtowanie się wartości pozyskiwanego strumienia ciepła geotermalnego \dot{Q} (długość wymiennika $L = 4000\text{ m}$)	49
Rys. 2.18. Wpływ zastosowania izolacji na kształtowanie się wartości pozyskiwanego strumienia ciepła geotermalnego \dot{Q} (długość wymiennika $L = 3000\text{ m}$)	50
Rys. 2.19. Wpływ zastosowania izolacji na kształtowanie się wartości pozyskiwanego strumienia ciepła geotermalnego \dot{Q} (długość wymiennika $L = 2000\text{ m}$)	50
Rys. 2.20. Wpływ strumienia objętościowego wody geotermalnej \dot{V} , długości wymiennika geotermalnego L oraz różnicy temperatur ΔT pomiędzy wodą wydobywczą a zatłaczającą na pozyskiwany strumień ciepła geotermalnego \dot{Q} (wariant bez izolacji)	51
Rys. 2.21. Wpływ strumienia zatłaczającej wody \dot{V} , ciągłej pracy wymiennika τ oraz różnicy temperatur wyjścia–wejścia wody ΔT na pozyskiwany strumień ciepła \dot{Q} (temperatura zatłaczania wody $T_1 = T_{inj} = 22^\circ\text{C}$, długość wymiennika $L = 3000\text{ m}$)	51
Rys. 2.22. Schemat pionowego geotermalnego wymiennika ciepła typu Field oraz pole temperatury nośnika ciepła przy doskonale zaizolowanej rurze wewnętrznej (temperatura na zatłaczaniu jest większa od temperatury gruntu)	55
Rys. 2.23. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field przy $\dot{W} = 300\,000\text{ W/K}$, $\Theta'_1 = 0\text{ K}$, $k_z^G/k_w = 0,1$	58
Rys. 2.24. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field przy $\dot{W} = 300\,000\text{ W/K}$, $\Theta'_1 = 0\text{ K}$, $k_z^G/k_w = 1$	59
Rys. 2.25. Schemat geotermalnego wymiennika ciepła (a) wraz z profilem temperaturowym (b)	60

Rys. 2.26. Wpływ przewodności cieplnej wewnętrznej rury wymiennika typu Field na profile temperatury w wymienniku po 90 dniach ciągłej pracy	63
Rys. 2.27. Wpływ przewodności cieplnej wewnętrznej rury wymiennika typu Field na profile temperatury w wymienniku po 180 dniach ciągłej pracy	64
Rys. 2.28. Profile temperatury w geotermalnym wymienniku ciepła w 180. dniu pracy przy różnym udziale izolowanego odcinka rury wg obliczeń numerycznych Mority [19]	64
Rys. 2.29. Zależność między udziałem izolowanego odcinka rury wewnętrznej i temperaturą na wypływie oraz mocą cieplną przy natężeniu przepływu czynnika w wymienniku 300 dm ³ /min (18 m ³ /h), przy ciągłej pracy wymiennika wynoszącej 180 dni: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]	65
Rys. 2.30. Zależność między udziałem izolowanego odcinka rury wewnętrznej i temperaturą na wypływie oraz mocą cieplną przy natężeniu przepływu czynnika w wymienniku 400 dm ³ /min (24 m ³ /h), przy ciągłej pracy wymiennika wynoszącej 180 dni: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]	66
Rys. 2.31. Zależność między udziałem izolowanego odcinka rury wewnętrznej i temperaturą na wypływie oraz mocą cieplną przy natężeniu przepływu czynnika w wymienniku 500 dm ³ /min (30 m ³ /h), przy ciągłej pracy wymiennika wynoszącej 180 dni: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]	67
Rys. 2.32. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a pozyskiwanym strumieniem ciepła z wymiennika w 180. dniu pracy: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]	68
Rys. 2.33. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a temperaturą na wypływie z wymiennika w 180. dniu pracy: (a) obliczenia własne, (b) obliczenia numeryczne Mority [19]	69
Rys. 2.34. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a strumieniem pozyskiwanego ciepła w 90. dniu pracy ciągłej – obliczenia własne	71
Rys. 2.35. Zależność pomiędzy natężeniem przepływu wody a temperaturą na wypływie z wymiennika w 90. dniu pracy ciągłej – obliczenia własne	71
Rys. 3.1. Schemat przegrody cylindrycznej z zaznaczonym polem temperatur	74
Rys. 3.2. Zmienność wartości zastępczego współczynnika przekazywania ciepła dla piaskowca i granitu w funkcji ciągłej eksploatacji geotermalnego wymiennika ciepła	78
Rys. 4.1. Schemat otworu kierunkowego JACHÓWKA 2K – wymiarowanie	80
Rys. 4.2. Schemat wymiennika geotermalnego w otworze kierunkowym JACHÓWKA 2K (wariant I – długość wymiennika $L = 2870$ m)	83
Rys. 4.3. Schemat wymiennika geotermalnego w otworze kierunkowym JACHÓWKA 2K (wariant II – długość wymiennika $L = 3950$ m)	85
Rys. 4.4. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej	95
Rys. 4.5. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji w formie szczeliny powietrznej rury wewnętrznej	96

Rys. 4.6. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na 600 m	97
Rys. 4.7. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej	111
Rys. 4.8. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji w formie szczeliny powietrznej rury wewnętrznej	112
Rys. 4.9. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na 600 m	113
Rys. 4.10. Profile temperatury czynnika w wymienniku dla wybranych wydajności przy zastosowaniu izolacji powietrznej na 2870 m	114
Rys. Z1.1. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 50^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	137
Rys. Z1.2. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $E^* = 50^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	138
Rys. Z1.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	139
Rys. Z1.4. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	140
Rys. Z1.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	141
Rys. Z1.6. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	142
Rys. Z1.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 1$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	143
Rys. Z1.8. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $E^* = 170^\circ\text{C}$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1) ..	144

Rys. Z1.9. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	145
Rys. Z1.10. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = -5$ K, $K_w/K_z = 0$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	146
Rys. Z2.1. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 50^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	147
Rys. Z2.2. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 110^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	148
Rys. Z2.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 110^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	149
Rys. Z2.4. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	150
Rys. Z2.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$ (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	151
Rys. Z2.6. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 20\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	152
Rys. Z2.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W} = 20\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	153

Rys. Z2.8. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W}=200\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	154
Rys. Z2.9. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W}=200\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	155
Rys. Z2.10. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W}=440\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	156
Rys. Z2.11. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości E^* , K_z/\dot{W} – dla $\dot{W}=440\,000$ W/K (doskonale zaizolowana rura wewnętrzna wymiennika – dotyczy modelu z rozdziału 2.1)	157
Rys. Z3.1. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $E^* = 50^\circ\text{C}$, $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K (dotyczy modelu z rozdziału 2.2) ...	158
Rys. Z3.2. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$, $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K (dotyczy modelu z rozdziału 2.2) ..	159
Rys. Z3.3. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], K_w/K_z , K_z/\dot{W} – dla $E^* = 170^\circ\text{C}$, $\Theta'_1 = \Theta' = 10$ K (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)	160
Rys. Z3.4. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)	161
Rys. Z3.5. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0,01$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)	162
Rys. Z3.6. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0,5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)	163

Rys. Z3.7. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0,1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)	164
Rys. Z3.8. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 0,5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)	165
Rys. Z3.9. Nomogram do określenia strumienia pozyskiwanego ciepła \dot{Q} [MW] przez geotermalny wymiennik ciepła typu Field dla wybranych wielkości \dot{W} [W/K], E^* , K_z/\dot{W} – dla $\Theta'_1 = \Theta' = 5$ K, $K_w/K_z = 1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.2)	166
Rys. Z4.1. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\dot{W} = 300\ 000$ W/K, $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	167
Rys. Z4.2. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\dot{W} = 300\ 000$ W/K, $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 20$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	167
Rys. Z4.3. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\dot{W} = 30\ 000$ W/K, $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 0,1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	168
Rys. Z4.4. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\dot{W} = 30\ 000$ W/K, $\Theta'_1 = 0$ K, $k_z^G/k_w = 10$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	168
Rys. Z4.5. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 0$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 0,1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	169
Rys. Z4.6. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 0$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	169
Rys. Z4.7. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 0$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	170
Rys. Z4.8. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 0$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 20$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	170
Rys. Z4.9. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 0,1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	171

Rys. Z4.10. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 1$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	171
Rys. Z4.11. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 5$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	172
Rys. Z4.12. Wpływ długości izolacji na strumień wydobywanego ciepła dla wymiennika typu Field dla $\Theta'_1 = 10$ K, $L_G/L_0 = 0,05$, $k_z^G/k_w = 20$ (dotyczy modelu z rozdziału 2.3)	172

SPIS TABEL

Tabela 2.2. Stałe całkowania wraz z wielkościami pomocniczymi	55
Tabela 2.1. Stałe całkowania wraz z wielkościami pomocniczymi	62
Tabela 4.1. Dane dotyczące odwiertu Jachówka 2K	79
Tabela 4.2. Zestawienie własności cieplno-fizycznych warstw geologicznych dla wymiennika typu Field – wariant I (długość 2870 m)	88
Tabela 4.3. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 2870$ m przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej	91
Tabela 4.4. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 2870$ m przy zastosowaniu izolacji rury wewnętrznej w postaci szczeliny powietrznej	92
Tabela 4.5. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 2870$ m przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na rurze wewnętrznej na długości 600 m	94
Tabela 4.6. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego	98
Tabela 4.7. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego	99
Tabela 4.8. Ilość energii geotermicznej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego	100
Tabela 4.9. Ilość energii geotermicznej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 2870 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego	101
Tabela 4.10. Zestawienie własności cieplno-fizycznych warstw geologicznych dla wymiennika typu Field – wariant II (długość 3950m)	103
Tabela 4.11. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu doskonałej izolacji rury wewnętrznej	105
Tabela 4.12. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu izolacji rury wewnętrznej w postaci szczeliny powietrznej	106
Tabela 4.13. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu izolacji z pianki poliuretanowej na rurze wewnętrznej na długości 600 m	107
Tabela 4.14. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń dla wymiennika o długości $L = 3950$ m przy zastosowaniu izolacji na rurze wewnętrznej w postaci szczeliny powietrznej na długości 2870 m	110
Tabela 4.15. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego	115

Tabela 4.16. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego	116
Tabela 4.17. Moc cieplna w trakcie eksploatacji wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego na długości 2870 m	117
Tabela 4.18. Ilość energii geotermicznej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji doskonałej kanału wewnętrznego	118
Tabela 4.19. Ilość energii geotermicznej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego	119
Tabela 4.20. Ilość energii geotermicznej możliwej do uzyskania z wymiennika o długości 3950 m przy zastosowaniu izolacji powietrznej kanału wewnętrznego na długości 2870 m	120

MODELOWANIE GEOTERMALNYCH WYMIENNIKÓW CIEPŁA TYPU FIELD – POZYSKIWANIE CIEPŁA GEOTERMALNEGO

Streszczenie

W pracy przedstawiono i zaproponowano rozwiązania analityczne modeli matematycznych geotermalnych wymienników ciepła typu Field opisujące wymianę ciepła pomiędzy złożem a wymiennikiem, które z powodzeniem mogą być wykorzystywane do oceny możliwości zastosowania takich wymienników w nieczynnych otworach wiertniczych.

W porównaniu do spotykanych metod numerycznych modele są mniej skomplikowane, a wyprowadzone równania, zależności matematyczne mogą być obliczone przy pomocy zwykłych programów (arkuszy kalkulacyjnych).

Dodatkową zaletą pracy jest stworzenie nomogramów umożliwiających wstępną ocenę przydatności danego miejsca pod kątem instalacji danego typu geotermalnego wymiennika ciepła (geometria wymiennika, współczynnik przewodzenia ciepła, zastosowana izolacja itp.), przy znajomości wielkości, które są do tego potrzebne (charakterystyka złoża – parametry termiczne).

Opisano i przedstawiono cztery modele geotermalnych wymienników ciepła (z temperaturą wyższą od temperatury złoża na wejściu do wymiennika ciepła oraz z temperaturą niższą od temperatury złoża na wejściu do wymiennika) osadzonych w jednej warstwie jednorodnej złoża oraz w dwóch istotnie różniących się warstwach np. warstwie skalnej lub warstwie geotermalnej. Przedstawiono również rozwiązania tych modeli dla szczególnego przypadku, jakim jest adiatermiczność rury wewnętrznej wymiennika ciepła.

Przeprowadzono analizę wyników obliczeń na wielkościach uogólnionych oraz dla rzeczywistych projektowanych wielkości związanych z charakterystyką warstwy skalnej (gruntu) oraz geometrii wymiennika.

Dokonano analizy ilościowej i jakościowej z dostępnymi danymi źródłowymi, które stosowane były w obliczeniach numerycznych wykonanych przez Moritę [19]. Uzyskane wyniki korelują między sobą, potwierdzając celowość i zalety opracowania analitycznego.

MODELING OF GEOTHERMAL HEAT EXCHANGERS OF FIELD TYPE – GEOTHERMAL HEAT RECOVERY

Summary

The work presents and proposes analytical solutions for mathematical models of geothermal Field's heat exchangers which describe heat transfer between the bed and the exchanger. The models can be successfully used to assess the applicability of such exchangers in inactive borholes. In comparison to the numerical methods used, the models are less complicated, and derived equations, mathematical relationships can be calculated using ordinary programs (spreadsheets).

An additional advantage of the work is the creation of nomograms which enable preliminary assessment of the suitability of a given place for the installation of a given type of geothermal heat exchanger (geometry of the exchanger, heat conduction coefficient, insulation used, etc.) when knowing the needed size (deposit characteristics – thermal parameters).

Four models of geothermal heat exchangers have been described and presented (with a temperature higher than the bed temperature at the entrance to the heat exchanger and with temperature lower than the bed temperature at the entrance to the exchanger) embedded in one layer of a homogeneous deposit as well as in two significantly different layers, eg a rock layer or a geothermal layer. Solutions of these models are also presented for a special case of the adiatermicity of an internal heat exchanger pipe.

An analysis of the results of calculations performed on the generalized quantities and for the actual designed quantities related to the rock layer (soil) and exchanger geometry has been carried out.

Quantitative and qualitative analysis was performed with available source data, which were used in numerical calculations made by Morita [19]. The obtained results correlate with each other, confirming the desirability and advantages of the analytical study.