

PROGNOZOWANIE KOLMATACJI OTWORU CHŁONNEGO PRZY ZATŁACZANIU SCHŁODZONYCH WÓD TERMALNYCH

THE PROGNOSIS OF CLOGGING PROCESSES IN INJECTION WELLS DURING PUMPING COOLED THERMAL WATERS

BARBARA TOMASZEWSKA¹, LESZEK PAJĄK¹, BOGUSŁAW BIELEC¹

Abstrakt. Ocena dynamiki procesów związanych z powstawaniem, migracją i deponowaniem cząstek stałych, które często powodują kolmatację i uszkodzenia otworów w systemach geotermalnych, jest istotna do identyfikacji warunków ich stabilnej i długotrwałej eksploatacji. Dla dubletu otworów (otwory eksploatacyjny i chłonny) zaproponowano matematyczny opis zmian indeksu chłonności w czasie oraz wymaganego ciśnienia zatłaczania wody w modelowanych warunkach eksploatacji wód, występujących w obrębie piaskowcowych struktur jury dolnej na Nizinie Polskiej. Wykazano, że wskutek kolmatacji strefy czynnej ciśnienie zatłaczania rośnie szczególnie gwałtownie w pierwszej dobie po rozpoczęciu procesu zatłaczania. Wyniki symulacji prognostycznych potwierdzono w trakcie realizacji rzeczywistych badań w otworze chłonnym.

Słowa kluczowe: kolmatacja, skaling, wytrącanie osadów, zatłaczanie wód, wody termalne.

Abstract. When identifying the conditions required for the sustainable and long-term exploitation of geothermal resources, it is very important to assess the dynamics of processes linked to the formation, migration and deposition of particles in geothermal systems. Such particles often cause clogging and damage to the boreholes and source reservoirs. The paper proposes a mathematical model for changes in the absorbance index and the water injection pressure required over time. It was determined from the operating conditions for a model system consisting of a doublet of geothermal wells (extraction and injection well) and the water from Lower Jurassic sandstone structures in the Polish Lowland. It has been demonstrated that clogging of the active zone causes a particularly high surge in injection pressure during the first 24 hours of pumping. These estimated results have been confirmed in practice by real-life investigation of an injection well.

Key words: clogging, scaling, mineral deposition, water injection, geothermal waters.

WSTĘP

Wytrącanie i osadzanie związków mineralnych (*scaling*) są, obok korozji, głównymi procesami, które towarzyszą eksploatacji wód geotermalnych w dublecie geotermalnym. Procesy wytrącania i osadzania związków mineralnych często prowadzą do kolmatacji poszczególnych elementów instalacji, zmniejszając możliwości zatłaczania wód do góro-

tworu (Tomaszewska, Pająk, 2012a, 2013a, b). Efekt ten wpływa na koszty wyposażenia i eksploatacji zakładów geotermalnych, a zatem na koszty pozyskania energii. W skrajnych sytuacjach może spowodować konieczność okresowego wyłączenia instalacji lub jej elementów. Prognozowanie tych zjawisk ma szczególne znaczenie dla efektywnego wy-

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Zakład Odnawialnych Źródeł Energii i Badań Środowiskowych, Pracownia Odnawialnych Źródeł Energii, 31-261 Kraków, ul. Wybickiego 7; e-mail: tomaszewska@meeri.pl, pajak@meeri.pl, bielec@meeri.pl

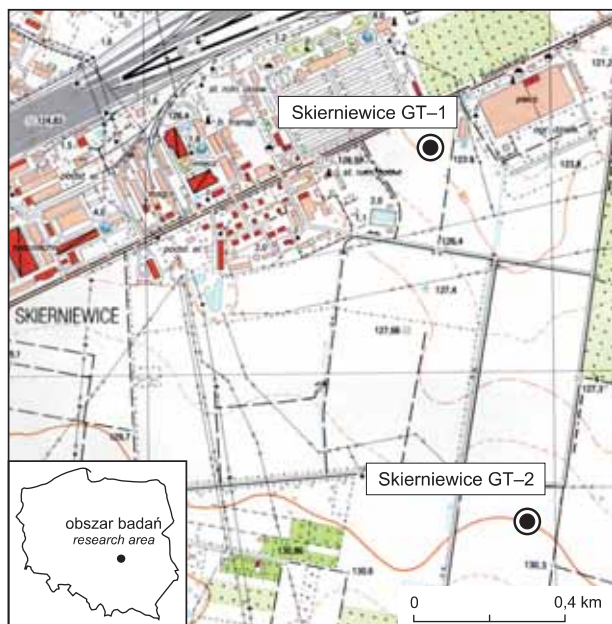


Fig. 1. Lokalizacja rejonu badań

Location of research area

korzystania zasobów energii odnawialnej (Bujakowski i in., 2010; Barbacki, 2010). Jakościowa i ilościowa analiza możliwości wystąpienia procesu wtórnego wytrącania substancji mineralnych, spowodowanego znacznym ochłodzeniem wód termalnych, może być szczególnie istotna ze względu na coraz częstsze stosowanie w zakładach geotermalnych pomp ciepła. Popularność tych urządzeń może wiązać się ze wzrostem udziału energii elektrycznej, pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Energia ta stanowi moc napędową sprężarkowych pomp ciepła (Pająk, Hołojuch, 2010), które pozwalają osiągnąć znacznie niższy poziom ochłodzenia wód termalnych niż wynosi średnioroczna temperatura powietrza. Średnioroczną temperaturę powietrza często stosowano jako poziom odniesienia do szacowania zasobów energii geotermalnej.

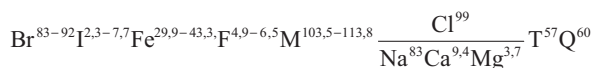
W pracy przedstawiono wyniki badań zmian indeksu chłonności otworu tłocznego w czasie oraz ciśnienia zatłaczania wody, wymaganego w modelowanych warunkach eksploatacji dubletem otworów w Skiermiewicach (fig. 1). Skonfrontowano je następnie z rzeczywistymi wynikami, uzyskanymi w trakcie wykonywania stosownych testów w otworze chłonnym.

CHARAKTERYSTYKA HYDROGEOLOGICZNA I WARUNKI TECHNICZNE OBIEKTU BADAŃ

Głównymi skałami wodonośnymi, budującymi zbiornik geotermalny są warstwy kłodawskie (jura dolna – hetang, synemur), wykształcone w postaci piaskowców poprzedzielanych nieciągłymi seriami osadów słabo przepuszczalnych lub nieprzepuszczalnych (zwięzłych drobnoziarnistych piaskowców i mułowców oraz iłowców). W otworze chłonnym, w przedziale głębokości 2771–2886 m jest umieszczony wielosegmentowy filtr Johnsona (6 5/6") (Tomaszewska, Pająk, 2012b). Szczelina filtra wynosi 0,5 mm, łączna powierzchnia szczelin wynosi 10% całkowitej powierzchni filtra. W górnej części zafiltrowanego interwału o dużej zmienności litologicznej znajdują się pakiety zwięzłych, drobno-

ziarnistych piaskowców o porowatości efektywnej 7–14% i przepuszczalności 1–180 mD. W niższej części zmienność litologiczna jest znaczna, występują pakiety piaskowców gruboziarnistych, słabo zwięzłych o najlepszych właściwościach kolektorskich, jednak o niewielkiej miąższości (3–7 m). Porowatość wynosi 11–18%, natomiast przepuszczalność 38–6800 mD (Bentkowski i in., 1998).

Właściwości fizykochemiczne wody termalnej, wg formuły Kurlowa, przedstawiają się następująco:



PROGNOZA KOLMATAKJI OTWORU CHŁONNEGO W DUBLECIE GEOTERMALNYM

Prognoza wytrącania osadów wtórnych z wody w trakcie jej zatłaczania do górotworu wykazała tendencję do *scalingu* aragonitem, kalcytem i dolomitem (Tomaszewska, Pająk, 2012b). Kalcyt jest fazą bardziej stabilną, która powstaje zwykle w wyniku przekształcenia aragonitu – mniej stabilnej formy węgla wapnia, która jako pierwsza tworzy się wskutek wytrącania z roztworu, zwłaszcza z wód o podwyższonych temperaturach (m.in. geotermalnych). Oszacowano, że w strefie filtra może osadzać się 0,063 mg osadów węgla wapnia z jednego litra wody termalnej zatłaczanej do górotworu. Do oceny spadku chłonności i prognozy zmian ciś-

nienia, wymaganego w procesie wtłaczania wód schłodzonych do górotworu, w modelowaniu matematycznym wykorzystano algorytmy obliczeniowe przedstawione w tabeli 1. Wymagane ciśnienie zatłaczania określono wg zależności:

$$\Delta p = \Delta p_p + \Delta p_w + \Delta p_s - H_z \rho_{sr} g - (H_w - H_z)(\rho_{srz} - \rho_{srn}) g$$

gdzie:

Δp – całkowite nadciśnienie konieczne do wytworzenia przez pompy zatłaczające [Pa],

H_z – poziom statycznego zwierciadła wody liczony względem poziomu terenu [m],

H_w – głębokość otworu [m],
 ρ_{sr} – uśredniona gęstość zatłaczanego płynu w otworze ponad zwierciadłem statycznym [kg/m³],
 ρ_{srz} – uśredniona gęstość płynu zatłaczanego do złoża w interwale głębokości od H_z do H_w [kg/m³],
 ρ_{srn} – uśredniona gęstość płynu, wypełniającego otwór w warunkach naturalnych w interwale głębokości od H_z do H_w [kg/m³],
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s²].

$$q_c = \frac{V}{\Delta p}$$

gdzie:

V – strumień zatłaczanej wody [m³/s],
 Δp – ciśnienie wytwarzane przez pompy zatłaczające [Pa].

Indeks chłonności q_c [m³/s/Pa], wyrażający stosunek strumienia płynu włączanego do złoża i nadciśnienia, które musi zostać wytworzone przez pompy zatłaczające określano następująco:

W obliczeniach uwzględniono konstrukcję otworu chłonnego, strumień wysoko zasolonej wody włączanej do górotworu 40 m³/h, temperaturę wody zasolonej 50°C na głowicy otworu chłonnego, stopień jej zasolenia 11%, współczynnik przewodzenia ciepła przez ośrodek geologiczny (λ_g) 5 W/(mK), gęstość ośrodka skalnego 2,4 Mg/m³,

Tabela 1

Algorytmy obliczeniowe wykorzystane w modelowaniu matematycznym efektów związanych z kolmatacją strefy czynnej

The calculation algorithms used in mathematical modelling of the effects related to clogging of the active zone

Parametr	Algorytm obliczeniowy
Opory przepływu w otworze, chłonnym (Recknagel i in., 2008)	$\Delta p_p = \lambda \frac{L \rho}{d} w^2$ <p>λ – współczynnik tarcia [-], L – długość otworu [m], d – średnica wewnętrzna otworu [m], ρ – gęstość wody [kg/m³], w – prędkość przepływu wody w otworze [m/s].</p>
Opory związane z włoczeniem wody w złożo (Kapuściński i in., 1997)	$\Delta p_w = \frac{V \mu}{4 \Pi k_h h} \ln \left(\frac{2,25 k_h \tau}{\phi \mu c_t r_w^2} \right)$ <p>τ – czas ustalenia represji (Δp_w) [s], ϕ – porowatość efektywna warstwy wodonośnej [-], c_t – współczynnik ściśliwości [1/Pa].</p>
Opory wywołane przez warstwę wodonośną w strefie sąsiadującej z filtrem (tzw. <i>skin</i> efekt), (Kapuściński i in., 1997)	$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_{wa}}{r_w} \right) + \left(\frac{h}{h_p} - 1 \right) \left[\ln \left(\frac{h}{r_w} \sqrt{\frac{k_h}{k_v}} \right) - 2 \right] + \left[\frac{\mu_{r1} \rho_{r0}}{\mu_{r0} \rho_{r1}} \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) + \ln \left(\frac{r_d}{r_s} \right) \right]$ <p>k – przepuszczalność warstwy wodonośnej [m²], k_s – przepuszczalność strefy przyotworowej [m²], r_{wa} – zasięg strefy uszkodzonej [m], h_p – miąższość warstwy ujętej [m], k_v – przepuszczalność pionowa warstwy wodonośnej [m²], μ_{r1} – lepkość dynamiczna wody w temperaturze zatłaczania [Pa·s], μ_{r0} – lepkość dynamiczna wody w naturalnej temperaturze złożowej [Pa·s], ρ_{r1} – gęstość wody w temperaturze zatłaczania [kg/m³], ρ_{r0} – gęstość wody w naturalnej temperaturze złożowej [kg/m³], r_s – promień zasięgu frontu chłodnego [m], r_d – promień zasięgu zmian ciśnienia spowodowany zatłaczaniem [m].</p>
Wpływ zmiany właściwości zatłaczanej wody na ciśnienie represji (McCain, 1991)	$\rho_0 = 16,018 \cdot (62,368 + 0,438603 S + 1,60074 \cdot 10^{-3} S^2)$ <p>ρ_0 – gęstość wody w warunkach standardowych [kg/m³], S – zasolenie (% masowy) [%].</p>
Wpływ wymiany ciepła między wodą a ośrodkiem skalnym (Carslaw, Jaeger, 1948)	$q_{str} = \frac{-4 \Pi \lambda_g (t_s - t_\infty)}{\ln \left(\frac{4 a_g \tau}{r_w^2} - 2 \gamma \right)}$ <p>λ_g – współczynnik przewodzenia ciepła przez ośrodek skalny [W/mK], t_s – temperatura wody [°C], t_∞ – temperatura ośrodka skalnego [°C], a_g – współczynnik wyrównania temperatury dla ośrodka skalnego [m²/s], τ – czas ustalenia ciepła [s], γ – stała Eulera [-].</p>

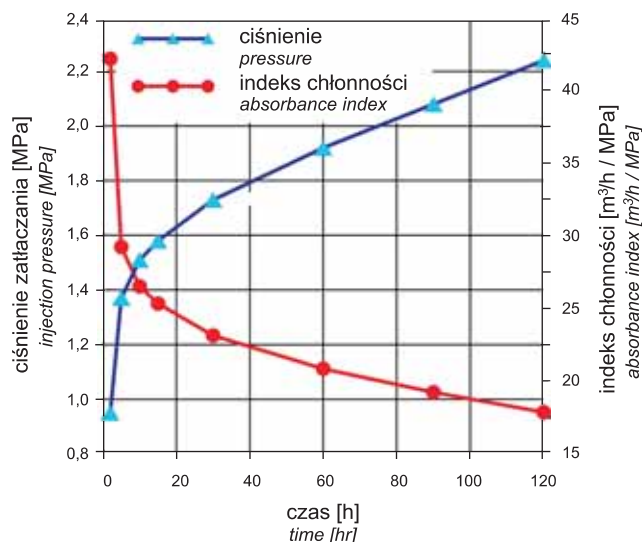


Fig. 2. Prognostic changes in required injection pressure and absorbance index with time, assuming a constant flow of brine, amounting to 40 m³/h

Forecasted changes in required injection pressure and absorbance index with time, assuming a 40 m³/h constant flow

ciepło właściwe ośrodka skalnego 0,8 kJ/(kgK), zmianę temperatury w otoczeniu otworu zgodnie z gradientem geotermicznym od temperatury złożowej 70°C do temperatury powierzchni 8°C, porowatość efektywną warstwy wodonośnej 15%, miąższość poziomu wodonośnego 64 m, miąższość czynną 19 m, przepuszczalność warstwy wodonośnej – poziomą 210 mD i pionową 21 mD, poziom zwierciadła statycznego 125 m p.p.t., zasięg strefy objętej *skin* efektem 1,25 m i jej przepuszczalność 10 D (Kępińska i in., 2011), prognozowany czas zatłaczania wód liczony od uruchomienia oczyszczonego z produktów kolmatacji otworu (po zabiegu kwasowania). Założono, że produkty wtórnej kolmatacji osadzają się na wewnętrznej części filtra oraz obsypki i mają przepuszczalność 7 mD (Tomaszewska, Pająk, 2012b).

Wyniki obliczeń modelowych przedstawiono na figurze 2, natomiast na figurze 3 zaprezentowano wyniki faktycznego testu przeprowadzonego na otworze chłonnym, przy takim samym natężeniu przepływu i tej samej temperaturze wody termalnej włączanej do górotworu. Przewidziano, że ciśnienie zatłaczania wzrośnie szczególnie gwałtownie w pierwszej dobie (fig. 2), a w kolejnych godzinach przyrost ciśnienia będzie miał charakter zbliżony do liniowego i będzie sukcesywnie wzrastać, po 120 godzinach osiągając war-

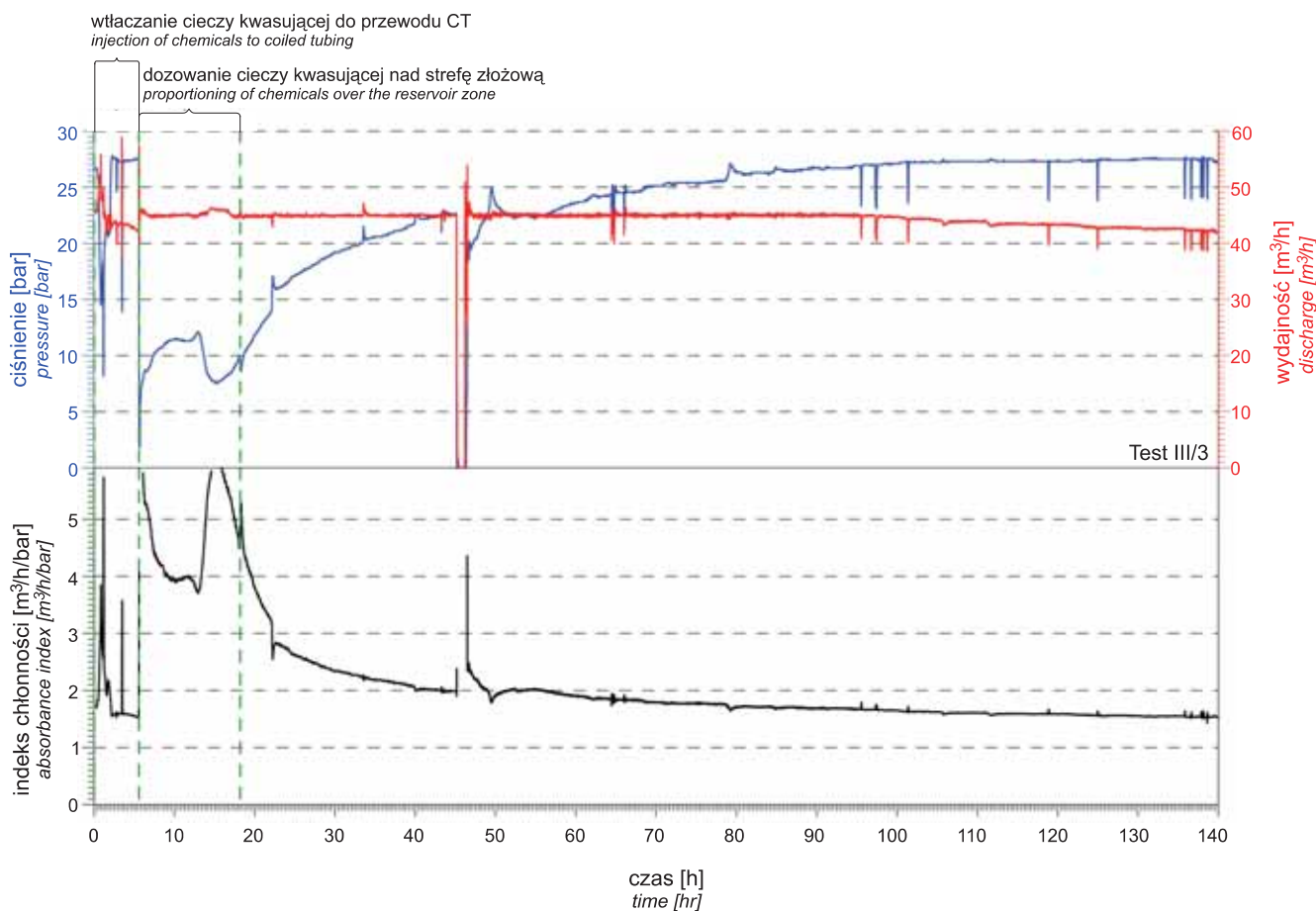


Fig. 3. Changes of injection pressure and absorbance index with time, during brine injection

Changes of injection pressure and absorbance index with time, during brine injection

tość około 2,2 MPa. W konsekwencji indeks chłonności zmniejszy się, zwłaszcza w ciągu pierwszych sześciu godzin (fig. 2). W rozpatrywanym przedziale czasu, po 120 godzinach od rozpoczęcia zatłaczania, jego wartość zmaleje od ponad 42 do około 18 m³/h/MPa. Wyniki symulacji progno-

stycznej i wyniki badań w otworze są porównywalne. Indeks chłonności w trakcie wykonywania testów hydrodynamicznych po 120 godzinach zmniejszył się do około 20 m³/h/MPa.

PODSUMOWANIE

Podstawowym produktem wytrącania wtórnych substancji mineralnych z wody geotermalnej badanego systemu jest węglan wapnia w formie aragonitu i kalcytu. Tendencję do wytrącania tych krystalicznych form CaCO₃ wykazały przeprowadzone modelowania geochemiczne. Obecność tych minerałów wykazano w próbkach materiału wyniesionego z otworów, mających na celu oczyszczenie strefy złożowej, co potwierdziło słuszność przyjętych założeń i potwierdził

wynik przeprowadzonych badań modelowych. Produkty wtórnego wytrącania odkładają się na elementach instalacji, powodując wzrost oporów przepływu. Ich wnikanie do złoża powoduje spadek przepuszczalności skał zbiornikowych w strefie przyotworowej, co w efekcie obniża chłonność otworów. Wykazano to na podstawie przeprowadzonych badań modelowych i potwierdzono przy zatłaczaniu wód do górotworu.

LITERATURA

- BARBACKI A., 2010 — Geological and technical aspects of geothermal energy utilization in South-East Poland. *Environment Protection Engineering*, **36**, 1: 25–34.
- BENTKOWSKI A., BIERNAT H., BUJAKOWSKA K., KAPUŚCIŃSKI J., 1998 — Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów eksploatacyjnych wód termalnych z utworów jury dolnej w Skierniewicach. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- BUJAKOWSKI W., BARBACKI A., CZERWIŃSKA B., PAJĄK L., PUSSAK M., STEFANIUK M., TRZEŚNIEWSKI Z., 2010 — Integrated seismic and magnetotelluric exploration of the Skierniewice, Poland, geothermal test site. *Geothermics* **39**, 78–93.
- CARSLAW H.S., JAEGER J. C., 1948 — *Conduction of Heat in Solids*. Oxford at the Calderon Press.
- KAPUŚCIŃSKI J., NAGY S., DŁUGOSZ P., BIERNAT H., BENTKOWSKI A., ZAWISZA L., MACUDA J., BUJAKOWSKA K., 1997 — *Zasady i metodyka dokumentowania zasobów wód termalnych i energii geotermalnej oraz sposoby odprowadzania wód zużytych, poradnik metodyczny*. Ministerstwo Ochrony Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Warszawa.
- KĘPIŃSKA B., BUJAKOWSKI W., BIELEC B., TOMASZEWSKA B., BANAŚ J., SOLARSKI W., MAZURKIEWICZ B., PAWLIKOWSKI M., PAJĄK L., MIECZNIK M., BALCER M., HOŁOJUCH G., 2011 — Wytyczne projektowe poprawy chłonności skał zbiornikowych w związku z zatłaczaniem wód termalnych w polskich zakładach geotermalnych. Wyd. Patria, Kraków.
- McCAIN W.D., 1991 — Reservoir-Fluid Property Correlations-State of the Art. *SPE Reservoir Engineering*, **6**, 2: 266–272.
- PAJĄK L., HOŁOJUCH G., 2010 — Ograniczenia i efektywność wykorzystania sprężarkowych pomp ciepła w polskich ciepłowniach geotermalnych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **439**, 1: 155–158.
- RECKNAGEL H., SPRENGER E., SCHRAMEK E.R., 2008 — *Kompendium wiedzy: ogrzewnictwo, klimatyzacja, ciepła woda, chłodnictwo*. OMNI SCALA, Wrocław.
- TOMASZEWSKA B., PAJĄK L., 2012a — Geothermal water resources management - economic aspects of their treatment. *Gosp. Sur. Miner.*, **28**, 4: 59–70.
- TOMASZEWSKA B., PAJĄK L., 2012b — Dynamics of clogging processes in injection wells used to pump highly mineralized thermal waters into the sandstone structures lying under the Polish Lowlands. *Arch. Environ. Prot.*, **38**, 3: 105–117.
- TOMASZEWSKA B., PAJĄK L., 2013a — Zagospodarowanie schłodzonych i odsolonych wód termalnych w Podhalańskiej Sieci Ciepłowniczej. *Gosp. Sur. Miner.*, **29**, 1: 127–139.
- TOMASZEWSKA B., PAJĄK L., 2013b — Using Treated Geothermal Water to Replenish Network Water Losses in a District Heating System. *Pol. J. Environ.*, **22**, 1: 249–256.

SUMMARY

The key product of secondary mineral precipitation from the geothermal water in the system investigated is calcium carbonate in the form of aragonite and calcite. The geochemical modelling has demonstrated a tendency to precipitate these crystalline forms of CaCO_3 . These minerals were observed in samples of materials discharged from the borehole during implementation of the source zone clean-up procedures. Secondary precipitation products and products of corrosion of the pipes coat the filter and the gravel pack, and are

carried with the injected water so penetrating the reservoir rock formations (probably they are also deposited and form accumulation clusters on the structures of the reservoir rock). As a result, absorbance of the boreholes, borehole zone and source rock formations is decreasing and it has been clearly demonstrated in the analyses performed based on the model and in the practical results from the injection of water into the rock formations.