

ZMIANA TEMPERATURY W PROCESIE SAMOWYPŁYWU NAGAZOWANYCH WÓD PODZIEMNYCH

TEMPERATURE CHANGE IN THE PROCESS OF SPONTANEOUS OUTFLOW OF GAS-BEARING GROUNDWATERS

STANISŁAW ŻAK¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono krótki opis rozwiązania samoczynnego wypływu nagazowanych wód podziemnych z pionowych otworów wiertniczych. W rozwiązaniu przyjęto, że w rurach wydobywczych i w zwężkach odbywa się dwufazowy przepływ mieszaniny wodno-gazowej. W modelu przepływu uwzględniono zróżnicowanie prędkości wody i gazu. Główna problematyka artykułu dotyczy termodynamicznych efektów przepływu. Założono, że przepływ mieszaniny odbywa się w procesie adiabatycznym, tzn. bez wymiany ciepła między mieszaniną wodno-gazową a otoczeniem. Przyjęto, że zmiana temperatury podczas samowypływu jest skutkiem trzech procesów: odgazowania wody, rozprężania gazu i oporów tarcia. Obliczenia zmian temperatury wykonano, dokonując podziału rury wydobywczej i zwężki na segmenty. Wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów na rzeczywistych otworach, w których prowadzono długotrwałe badania lub eksploatację. Wskazują one, że przedstawiony model samowypływu w sposób zadawalający opisuje przemiany termodynamiczne.

Słowa kluczowe: wody zgazowane, samoczynne wydobycie, przepływ dwufazowy, model z poślizgiem, termodynamika, przemiana adiabatyczna.

Abstract. The article provides a short description of a solution for spontaneous outflow of gas-bearing groundwaters from vertical boreholes. A two-phase flow of gas-water mixture in extraction pipes and chokes was adopted for the solution. Also, differences between water and gas velocities were taken into account. The article focuses chiefly on the problem of thermodynamic flow effects. An assumption was made that the flow of such a mixture occurs in an adiabatic process, i.e. there is no heat exchange between the gas-water mixture and the surroundings. It was also assumed that temperature change during spontaneous outflow results from three processes: degassing of water, gas expansion and frictional resistance. Calculations of temperature change were performed by dividing the extraction pipe and the choke into segments. Subsequently, the calculation results were compared with measurement results obtained on real holes where long-term research or extraction had been conducted. They prove that the presented spontaneous outflow model adequately describes thermodynamic processes.

Key words: gas-bearing waters, spontaneous outflow, two-phase flow, slip model, thermodynamics, adiabatic transformation.

WSTĘP

Eksploatacja nagazowanych wód podziemnych z pionowych otworów może być prowadzona metodą samowypływu. W krajowej literaturze przedstawione rozwiązania samowypływu opierają się najczęściej na założeniu przepły-

wów mieszaniny wodno-gazowej bez poślizgu, przy założeniu procesu izotermicznego i dla uśrednionych parametrów przepływu w rurze wydobywczej (Ropa, Duliński, 1999; Ciężkowski i in., 2002). Rozwiązanie przepływu z pośliz-

¹ Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, ul. M. Morelowskiego 89, 52-429 Wrocław;
e-mail: stanislaw.zak@pwr.wroc.pl

giem (zróżnicowanej prędkości wody i gazu) oraz zmienionych parametrów oporu przepływu w rurze wydobywczej umożliwił numeryczny sposób rozwiązania (Żak, 2005). Jednak opisany sposób dotyczył również procesów izotermicznych. Przedstawiane nieizotermiczne przepływy opierają się na efekcie Joule'a-Thomsona (Alves i in., 1992; Duliński, Ropa, 2003; Cinar i in., 2006). W przedstawionym w artykule

rozwiązaniu rozważano przepływ adiabatyczny, w którym nie zachodzi wymiana ciepła między mieszaniną wodno-gazową a otoczeniem. Ponadto przyjęto, że na kształtowanie się temperatury oprócz rozprężania mieszaniny wodno-gazowej i tarcia wewnętrznego ma wpływ proces wydzielania się gazu z wody.

MODEL SAMOWYPŁYWU

Matematyczny opis samowypływu jest oparty na modelach:

- przepływu wody w górotworze,
- odgazowania,
- przepływu mieszaniny wodno-gazowej w rurze wydobywczej i w zwężce.

Przyjęto, że w gruncie odbywa się przepływ, dla którego wielkość depresji w otworze w zależności od wydatku wody jest funkcją wykładniczą (Ciężkowski i in., 2002).

W modelu odgazowania założono, że zawartość gazu w wodzie jest zgodna z prawem Henry'ego. Jednak ze względu na kinetykę wydzielania się gazu zamiast współczynnika Bunsena α_{Bi} wprowadzono do obliczeń parametr α_{Bi}^* . Stanowi on odpowiednik współczynnika absorpcji Bunsena, lecz ma od niego większą wartość. Wartość parametru przyjmowano z wzoru:

$$\alpha_{Bi}^* = \alpha_{Bi} \frac{c_p^*}{c_p} \quad [1]$$

gdzie:

- c_p^* – rzeczywiste stężenie gazu w wodzie w miejscu wypływu, [g dm⁻³],
- c_p – stężenie gazu w wodzie w warunkach równowagi termodynamicznej między fazą gazową a ciekłą, [g dm⁻³].

W opisie przyjęto przepływ mieszaniny gazu i wody w rurze wydobywczej i w zwężce jako jednowymiarowy, ustalony z poślizgiem. Ponadto przyjęto, że przepływ przez rurę wydobywczą i zwężkę jest adiabatyczny i są spełnione zasady zachowania masy, pędu i energii (Alves i in., 1992; Cinar i in., 2006). Opory tarcia określano w zależności od struktury strumienia (Petalias, Aziz, 2000).

PROCEDURA OBLICZEŃ

Procedura obliczeń polegała na podziale drogi przepływu na segmenty i określaniu w każdym z nich strat ciśnienia oraz zmian temperatury. W tym celu dopasowywano wydatek wody dopływającej do otworu i jej temperaturę w otworze w taki sposób, aby w miejscu wypływu uzyskać ciśnienie i temperaturę zgodne pomiarami na funkcjonujących ujęciach.

W zastosowanej procedurze obliczeń drogę przepływu podzielono na przepływ w górotworze, w rurze wydobywczej (100 segmentów) i w zwężce (50 segmentów).

Całkowita strata ciśnienia związana z przepływem w górotworze, w rurze wydobywczej i w zwężce była określana poprzez sumowanie strat ciśnienia z równania:

$$P_{Ls} - P_0 = \left(\frac{Q_{w0}}{C} \right)^m + \sum_{i=1}^N \Delta P_i \quad [2]$$

Pierwszy człon w równaniu [2] oznacza stratę ciśnienia w górotworze, a drugi stratę ciśnienia w rurze wydobywczej i w zwężce.

Stratę ciśnienia ΔP_i na i -tym segmencie rury wydobywczej lub zwężki określano na podstawie równania zachowania pędu ze wzoru:

$$\Delta P_i = P_{i=1} - P_i = -\rho_{mi} \cdot u_{mi} \cdot \Delta u_{mi} - \lambda_i \cdot \frac{\rho_{mi} \cdot u_{mi}^2 \cdot \Delta l_i}{2 \cdot d} - g \cdot \rho_{mi} \cdot \Delta l_i \quad [3]$$

Zmianę temperatury na i -tym segmencie ΔT_i określano z równania zachowania energii:

$$c_{mi} \Delta T_i + \frac{(-\alpha_{Bi+1}^* P_{i+1} + \alpha_{Bi}^* P_i) \Delta H_{ri} \rho_{gn}}{P_n \rho_{wi} M} = \lambda_i \frac{u_{mi}^2}{2d} \Delta l_i + \frac{P_i}{\rho_{mi}^2} \Delta \rho_{mi} \quad [4]$$

$$\text{gdzie:} \quad c_{mi} = \frac{c_{gi} \rho_{gi} \hat{V}_{gi} + c_w \rho_{wi} V_w}{\rho_{gi} \hat{V}_{gi} + \rho_{wi} V_w} \quad [5]$$

Oznaczenia symboli we wzorach:

P_{Ls} – ciśnienie statyczne w górotworze względem spodu rury wydobywczej, [Pa],

P_0 – ciśnienie w miejscu wypływu, [Pa],

Q_{w0} – wydatek wody, [m³ s⁻¹],

C – współczynnik wydobywania, [m³ s⁻¹ Pa^{-m}],

m – wykładnik potęgowy, [-],

$\Delta P_i = P_i - P_{i+1}$ – strata ciśnienia na odcinku (segmentcie) rury wydobywczej lub zwięzki, [Pa],
 P_i – ciśnienie, [Pa],
 ρ_{mi} – gęstość mieszaniny wodno-gazowej, [kg m⁻³],
 u_{mi} – prędkość przepływu mieszaniny wodno-gazowej, [m s⁻¹],
 Δu_{mi} – przyrost prędkości, [m s⁻¹],
 λ_i – współczynnik Coolebrooka, [-],
 g – przyspieszenie ziemskie, [m s⁻²],
 Δl_i – długość segmentu rury, [m],
 d – średnica wewnętrzna rury wydobywczej lub zwięzki, [m],
 c_{mi} – ciepło właściwe mieszaniny, [J kg⁻¹ K⁻¹],
 ΔT_i – zmiana temperatury w segmentcie, [K],

ΔH_{ri} – entalpia wydzielania się 1 mola gazu z wody, [J mol⁻¹],
 ρ_{wi} – gęstość wody, [kg m⁻³],
 ρ_{gn} – gęstość gazu w warunkach normalnych [kg m⁻³],
 P_n – ciśnienie normalne, [Pa],
 c_w – ciepło właściwe wody, [J kg⁻¹ K⁻¹],
 V_w – objętość wody równa 1 m³,
 \hat{V}_{gi} – objętość gazu wydzielonego z 1 m³ wody po dotarciu do i -tego segmentu [m³],
indeks i – oznacza, że wielkość dotyczy i -tego segmentu.
Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu specjalnej procedury opracowanej w arkuszu kalkulacyjnym Excel.

WYNIKI OBLICZEŃ

Na bazie przedstawionego wyżej modelu oraz opracowanej procedury, wykonano obliczenia samoczynnego wypływu dla trzech otworowych ujęć wód leczniczych K 18, Zuber I, Zuber II w Krynicy Zdroju. Wybrane, przyjęte do obliczeń parametry przedstawiono w tabeli 1.

W ten sposób uzyskano zmienność wielu parametrów wzdłuż rury wydobywczej i zwięzki. W artykule skupiono się na przebiegach zmian temperatury, jakie zachodzą w trakcie przepływu. Dla otworu K 18 rozwiązywano samowypływ dla trzech średnic rur wydobywczych: 15, 20 i 25 mm. Wyniki dla rury o średnicy wewnętrznej 20 mm przedstawiono na figurach 1 i 2. Obliczona, całkowita zmiana temperatury w rurze wynosi -2,23°C. Niemal całe obniżenie temperatury jest związane z wydzielaniem się dwutlenku węgla z wody (fig. 2) i wynosi 1,93°C. Rozprężanie gazu powoduje niewielkie obniżenie temperatury o 0,43°C. Opory tarcia powodują niewielkie podwyższenie temperatury o 0,13°C. Analogiczne obliczenia wykonano dla innych średnic rur wydobywczych – 15 i 25 mm. Dla tych średnic wydatek był

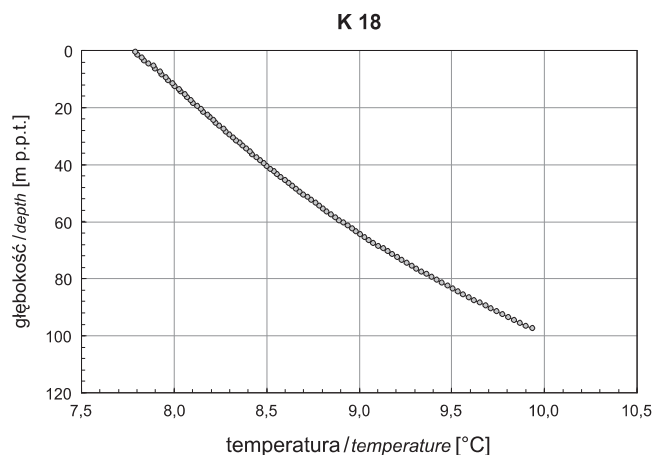


Fig. 1. Temperatura mieszaniny wodno-gazowej w rurze wydobywczej otworu K 18

Temperature of gas-water mixture in the extraction pipe of K 18 well

Tabela 1

Wybrane parametry ujęć przyjęte do obliczeń

Selected parameters of groundwater intakes

Nazwa ujęcia	K 18	Zuber I	Zuber II
Głębokość otworu, [m]	251,5	810	948,5
Długość rury wydobywczej L , [m]	100,0	670	601
Średnica rury wydobywczej d_r , [mm]	15; 20; 25	60	60
Średnica zwięzki d_z , [mm]	–	4,0	4,0; 7,0
Długość zwięzki, [mm]	–	5,0	5,0
Wykładnik gazowy WG , [-]	8,77	289	229
Głębokość statycznego zwierciadła wód podziemnych, [m p.p.t.]	33,0	198	286
Współczynnik wydobycia C , [m ³ Pa ⁻¹ s ⁻¹]	$3,88 \cdot 10^{-9}$	$2,08 \cdot 10^{-11}$	$2,31 \cdot 10^{-11}$
Wykładnik wydobycia m , [-]	1,0	1,0	1,0
Temperatura wody w ujęciu T , [°C]	10	22	22

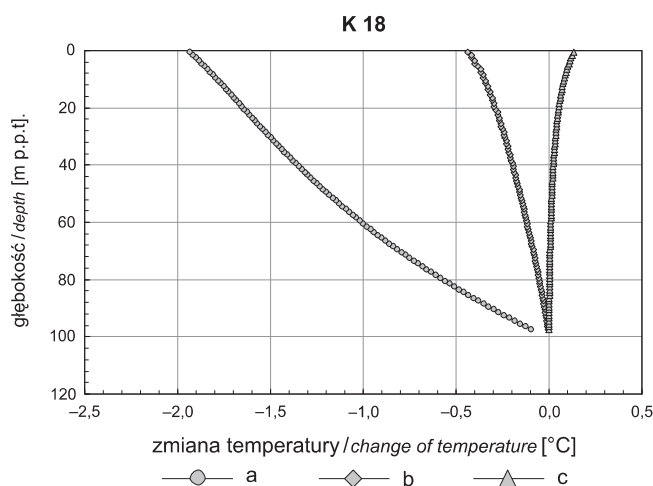


Fig. 2. Zmiana temperatury w rurze wydobywczej otworu K 18 wywołana: a – wydzielaniem się gazu z wody, b – rozprężaniem gazu, c – oporami przepływu

Temperature change in the extraction pipe of K 18 well caused by: a – gas release from water, b – gas expansion, c – flow resistances

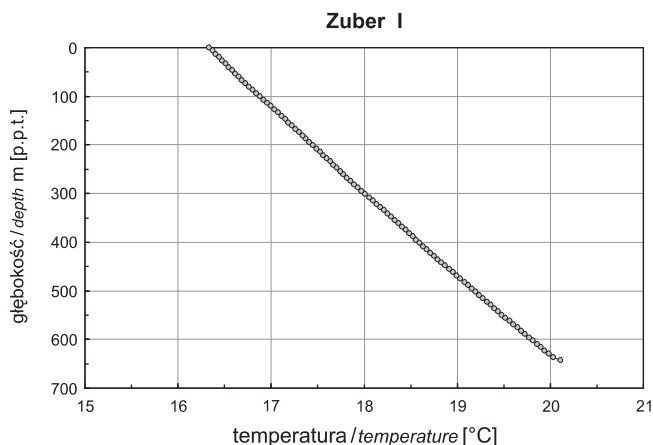


Fig. 3. Temperatura mieszaniny wodno-gazowej w rurze wydobywczej otworu Zuber I

Temperature of gas-water mixture in the extraction pipe of Zuber I borehole

wyraźnie zróżnicowany, jednak zmiana temperatury podczas wypływu była bardzo zbliżona.

Dużo większe zmiany temperatury otrzymano w przypadku otworów Zuber I i Zuber II, w których wypływająca woda z dwutlenkiem węgla charakteryzuje się bardzo dużą wartością wykładnika gazowego, powyżej 200. W przypadku otworu Zuber I obliczona, całkowita zmiana temperatury w rurze wydobywczej i w zwężce wyniosła $-14,0^{\circ}\text{C}$. Obniżenie temperatury w rurze wydobywczej wyniosło $4,0^{\circ}\text{C}$, a w zwężce – ok. $10,0^{\circ}\text{C}$ (fig. 3, 4).

Wielkości zmian temperatury w zwężce w wyniku wydzielania się gazu z wody i rozprężania się gazu są bardzo zbliżone zarówno w aspekcie wielkości, jak i przebiegu. Określone prędkości przepływu przez zwężkę są bardzo duże i przekraczają nawet 200 m s^{-1} na wypływie. Pomimo tego udział oporów tarcia w zmianie temperatury wynosi zaledwie $0,16^{\circ}\text{C}$. Należy zaznaczyć, że obliczona wielkość zmiany temperatury w otworze Zuber I była bardzo zbliżona do określonej różnicy

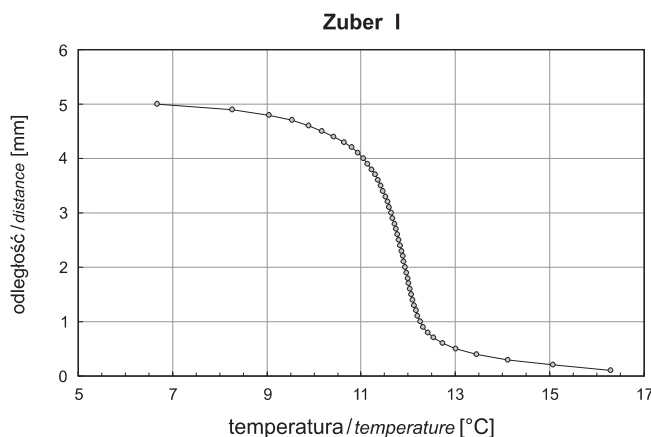


Fig. 4. Temperatura mieszaniny wodno-gazowej w zwężce otworu Zuber I

Temperature of gas-water mixture in the choke of Zuber I borehole

temperatur na podstawie pomiarów. Zmierzona różnica określona była między temperaturą wody w otworze na głębokości spodu rury wydobywczej a temperaturą wypływającej mieszaniny wodno-gazowej i wyniosła $-14,8^{\circ}\text{C}$. Badania temperatury w otworze zostały przeprowadzone przez Grupę Terenową SITPNiG w 1997 r. za pomocą specjalistycznego sprzętu stosowanego w odwiertach ropy naftowej.

Analogiczne obliczenia samowypływu jak dla otworu Zuber I przeprowadzono dla otworu Zuber II. Obliczenia wykonano przyjmując zwężki o średnicach 7 i 4 mm. W obu otworach uzyskano bardzo podobny przebieg zmian temperatury. Przy zadanych parametrach obniżenie temperatury dla zwężki 4 mm wyniosło 15°C , a dla zwężki 7 mm $12,5^{\circ}\text{C}$. Przeprowadzone wyniki obliczeń dla otworów Zuber I i Zuber II wskazują również, że oprócz nagazowanej wody do otworów będzie dopływał dwutlenek węgla w postaci gazowej. W związku z tym temperatura na wypływie zależy od wydatku, z jakim jest prowadzona eksploatacja.

WNIOSKI

Przeprowadzone obliczenia i porównanie ich wyników z parametrami na rzeczywistych ujęciach nagazowanych wód pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowany model samowypływu nagazowanych wód podziemnych i metoda rozwiązania dla wybranych ujęć szczaw umożliwiły określenie w zadowalający sposób zmian temperatury przepływającej mieszaniny wodno-gazowej.

2. Zmiany temperatury podczas wypływu mieszaniny wodno-gazowej zależą od wykładnika gazowego na wypływie. Większa wartość wykładnika powoduje większą zmianę temperatury podczas samowypływu.

3. Istotne zmiany temperatury powodują wydzielanie się gazu z wody oraz rozprężanie gazu. Zmiany temperatury związane z oporami tarcia są zwykle niewielkie.

4. Zmiany temperatury podczas samowypływu zależą przede wszystkim od zmian ciśnienia w mieszaninie wodno-gazowej. Jeśli największe straty ciśnienia występują na zwężce, to i największe zmiany temperatury mają miejsce również na zwężce.

5. Wydajność samowypływu nie ma dużego znaczenia na temperaturę wypływającej mieszaniny wodno-gazowej w sytuacji, gdy cały gaz jest rozpuszczony w wodzie dopływającej do otworu. Nie ma wówczas istotnego wpływu na temperaturę dobór średnic rur wydobywczych i zwęzek.

LITERATURA

- ALVES I.N., ALHANATI F.J., SHOHAM O., 1992 — A unified model for predicting flowing temperature distribution in wellbores and pipelines: 363–367. SPE Production Engineering, New Orleans.
- CIEŻKOWSKI W., DULIŃSKI W., JÓZEFKO I., KIELCZAWA B., LIBER-MADZIARZ E., WITCZAK S., ZUBER A., ŻAK S., 2002 — Występowanie, dokumentowanie i eksploatacja endogenicznego dwutlenku węgla w Polsce – Poradnik metodyczny (red. W. Ciężkowski). Ministerstwo Środowiska, Departament Geologii i Koncesji Geologicznych. Wyd. Wrocław. Tow. Nauk., Wrocław.
- CINAR M., ONUR M., SATMAN A., 2006 — Development of the Multi-feed p-T Wellbore Model for Geothermal Wells. Proceedings, Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 30–February 1.
- DULIŃSKI W., ROPA C.E., 2003 — Analiza dwufazowego, nieizotermicznego przepływu wody mineralnej i CO₂ w pionowym przewodzie wydobywczym, *Wiern. Nafta Gaz*, **20**, 1: 343–350.
- PETALAS N., AZIZ K., 2000 — A mechanistic model for multiphase flow in pipes. *J. Can. Pet. Tech.*, **39**: 43–55.
- ROPA C.E., DULIŃSKI W., 1999 — Ocena możliwości samoczynnego wydobywania i zagospodarowania nagazowanej wody mineralnej z odwiertu K-4a w Krynicy. *Inż. Środowiska*, **4**, 1: 95–102.
- ŻAK S., 2005 — Modelowanie samowypływu szczyzaw z odwiertów. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, **12** (red. A. Sadurski, A. Krawiec): 749–754. Wyd. UMK, Toruń.

SUMMARY

The article discusses the problem of spontaneous outflow of gas-bearing groundwaters. Such spontaneous outflow is based on models of water flow through rocks, water degassing and the flow of gas-water mixture through extraction pipes and elements restricting the outflow, i.e. chokes. The assumptions for these models are briefly described. The main part of the article focuses on water degassing and flow through extraction pipes seen as a thermodynamic process. It has been assumed that flow through conduits is adiabatic, which means that there is no heat exchange between the gas-water mixture and the surroundings. Three processes affecting temperature change have been taken into account: the degassing of water, gas expansion in an isentropic transformation and internal friction of the flowing gas-water mixture. Temperature change calculations were based on the enthalpy of water degassing process, the work done by expanding gas and the work related to the overcoming of frictional resistance. It has been also assumed that all the energy thus calculated causes water temperature change. The flow was solved as steady flow by dividing the flow path into seg-

ments and performing calculations on each segment. Water, gas and gas-water mixture parameters adopted for the calculations on particular segments allowed for the pressure and temperature inside a given segment. The calculations were performed for three holes tapping gas-bearing groundwaters containing carbon dioxide. The water extracted from the holes varied in gas content. This is depicted by the ratio between the discharge of the released gas and the discharge of water, which was from 8.8 to almost 300. Examples of the course of temperature change in the extraction pipe and in the chokes, as well as the impact of degassing, gas expansion and frictional resistances on temperature change are presented graphically in the article.

The obtained calculation results have been compared with measurement results. The measurement results refer to long-standing tests or long-term extraction from boreholes with constant discharge. The comparison indicates that the presented calculation method satisfactorily describes the thermodynamic processes occurring during spontaneous outflow of gas-water mixture out of a vertical borehole.

