

*Józef Koszela\**, *Ewa Koszela-Marek\**, *Zdzisław Sysak\*\**

## WERYFIKACJA ZMIAN ŚCIŚLIWOŚCI WODY I ROZTWORU SOLI NaCl POD WPŁYWEM WYSOKICH CIŚNIEŃ

---

### 1. Wstęp

W wielu dziedzinach wiedzy technicznej i w naukach przyrodniczych rola ściśliwości wody i wodnych roztworów soli ma istotne znaczenie. W rozważaniach hydrogeologicznych, w geotechnice i w górnictwie znane jest pojęcie ściśliwości wody jako cechy tzw. cieczy rzeczywistej. Ściśliwością cieczy nazywa się zdolność cieczy do zmniejszania objętości pod wpływem przyłożonego ciśnienia. Jest ona charakteryzowana przez współczynnik ściśliwości  $\beta$  [ $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$  lub  $\text{m}^2/\text{N}$  lub  $\text{GPa}^{-1}$ ], będący wartością względnego zmniejszenia się objętości wywołanego przyrostem ciśnienia o 1 atm [5, 6, 8].

Parametr ten przyjmowany jest do obliczeń zwykle jako „pewnik”, przy czym źródła pochodzenia stosowanych wartości trudne są dzisiaj do odtworzenia, zwłaszcza w zakresie ciśnień z przedziału 100÷1000 MPa (ok. 1000÷10 000  $\text{kG/cm}^2$ ).

W niniejszej pracy przeprowadzono próbę doświadczalnej weryfikacji ściśliwości wody destylowanej i roztworu wodnego chlorku sodu (NaCl) o stężeniu 20  $\text{g/dm}^3$  w zakresie ciśnień 50÷400 MPa przy stałej temperaturze 294 K (21°C).

### 2. Istota problemu

Wartość liczbowa współczynnika ściśliwości  $\beta$  jest ważna w takich dziedzinach jak: obliczanie dynamicznych zasobów wód podziemnych, obliczenia ciśnienia porowego wywołanego zamrażaniem i rozmrażaniem górotworu w czasie robót górniczych, ocena ciśnienia hydraulicznego wody porowej, przy eksploatacji górniczej z użyciem materiałów wybuchowych, górnictwo naftowe, budowle hydrotechniczne, ciśnienia hydrauliczne w strefie ruchów tektonicznych itp. Ogólnie, istnieje przekonanie, że ściśliwość wody pod wpły-

---

\* Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska, Wrocław

\*\* Wydział Mechaniczno-Energetyczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław

wem przyłożonego ciśnienia jest stosunkowo nieduża. Czetwertyński i Szuster [1] uważają, że pod wpływem ciśnienia 0,1÷5,0 MPa, przy temperaturze 20°C, objętość wody zmniejsza się o 0,23%. Książkiewicz [4] stwierdza, że woda wypełniająca próżnie (w skałach) zamraża w nich i wtedy wywiera bardzo duże ciśnienie, dochodzące do 2100 kG/cm<sup>2</sup>, czyli ok. 210 MPa w temperaturze – 20°C.

Dla stosunkowo niskich ciśnień w granicach do ok. 10 MPa przyjmuje się często jedną wartość liczbową współczynnika ściśliwości lub podaje się zakres wahań, przeważnie na poziomie tego samego rzędu wielkości. Wieczysty [8] omawiając szacowanie dynamicznych złóż wody podziemnej podaje, że „współczynnik sprężystości objętościowej wody (od autorów: tożsamy ze współczynnikiem ściśliwości wody) zmienia się w zależności od ciśnienia temperatury otaczającego ją środowiska w granicach od  $4,16 \times 10^{-5}$  1/at do  $5,25 \times 10^{-5}$  1/at. Wartość tego współczynnika dla wód zmineralizowanych jest mniejsza, dochodząc dla wód silnie zmineralizowanych do wartości  $2,8 \times 10^{-5}$  1/at”. Czetwertyński i Utrysko [2] podają, że przy ciśnieniu 1 bara i temperaturze 20°C współczynnik ściśliwości  $\beta$  wynosi  $5 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/N. Jeżowiecka-Kabsch i Szewczyk [3] wartość współczynnika ściśliwości wody przedstawiają jako parametr charakterystyczny, stały dla określonych przedziałów ciśnienia i temperatury (tab. 1).

TABELA 1  
Współczynnik ściśliwości wody w zależności od ciśnienia,  
dla temperatury 20°C (za [4])

Ciśnienie [MPa]	Współczynnik ściśliwości 1/GPa
0,1÷2,5	50,07
2,5÷5,0	48,54
0,1÷10,0	47,72

Zagadnienia dotyczące ściśliwości wody i wodnych roztworów soli pod wpływem wysokich ciśnień w literaturze są mało rozpoznane. Prawdopodobną przyczyną tego stanu rzeczy jest trudność budowy urządzeń z komorą badawczą, w której utrzymywane byłoby żądane ciśnienie przez dłuższy czas na stałym poziomie.

Urządzenie takie według własnego pomysłu zostało zbudowane przez współautora niniejszego artykułu [7] i po raz pierwszy zastosowane do badań ściśliwości wody i wodnych roztworów soli.

### 3. Założenia badawcze

- 1) Badania prowadzone są przy jednej, stałej temperaturze 294 K.
- 2) Zadawane (żądane) ciśnienie jest ciśnieniem hydrostatycznym.

- 3) Ciśnienie wzrasta do żądanej wartości w sposób quasi ciągły, nie nagły, a następnie w podobny sposób powraca do zera.
- 4) Czas oddziaływania zadanego ciśnienia — 1 min.
- 5) Siły tarcia w naczyniu pomiarowym na granicy tłok–ścianka relatywnie są tak małe, że praktycznie pomijalne.

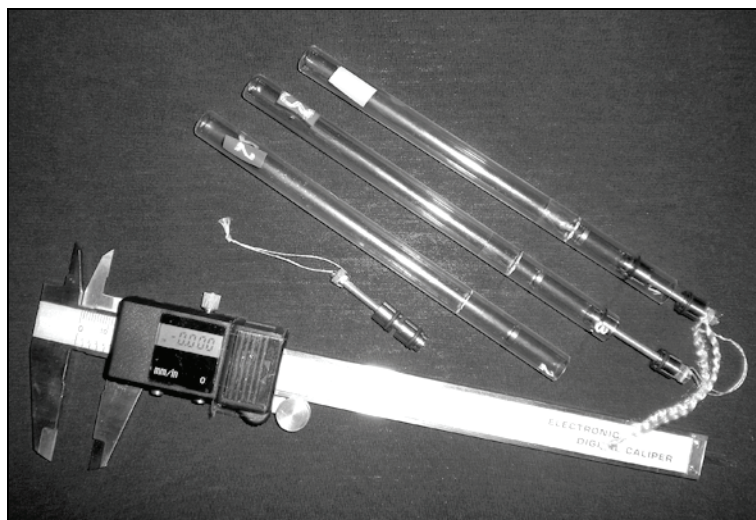
#### 4. Badane ciecze i stosowane ciśnienia

Badaniom poddano wodę destylowaną oraz wodny roztwór NaCl o stężeniu 2000 mg/dm<sup>3</sup>. Zastosowano następujące poziomy ciśnienia: 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa, 300 MPa, 400 MPa.

#### 5. Metodyka badań

##### 5.1. Preparatyka i przygotowanie cieczy do badań

Do badań zastosowano wodę destylowaną (H<sub>2</sub>O destil.) i wodny roztwór NaCl. Roztwór sporządzano w ten sposób, że odważone 20 g NaCl o czystości 98,98%, z dokładnością do 1 mg, wsypywano do kolby miarowej, dopełniając ją wodą destylowaną do objętości 1 dm<sup>3</sup>. Następnie przygotowany roztwór umieszczano za pomocą strzykawki w kalibrowanych cylindrycznych naczyniach szklanych i zamykano specjalnym, szczelnym tłokiem (rys. 1), z jednoczesnym odprowadzaniem powietrza z nad cieczy.



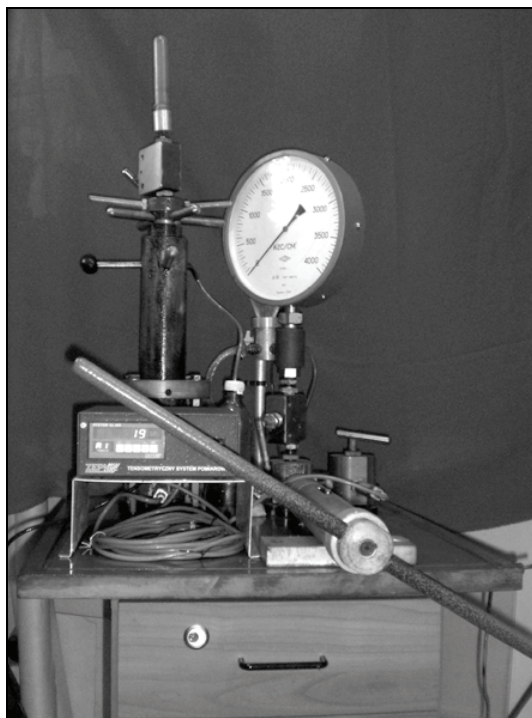
Rys. 1. Kalibrowane naczynia pomiarowe wraz z tłokami i pierścieniami pomiarowymi

W ten sposób przestrzeń między dnem naczynia a tłokiem w całości wypełniona była cieczą. Każde naczynie zawierało taką samą objętość badanej cieczy  $5,665 \text{ cm}^3$ , o wysokości słupa cieczy 110 mm. Na obrzeżach tłoka, od strony cieczy, znajdował się sprężysty pierścień pomiarowy ze stali, który mógł być w naczyniu przesunięty tylko przez ruch tłoka do wewnątrz. Gdy po ustąpieniu ciśnienia tłok wracał do wyjściowego położenia, pierścień pozostawał w położeniu, do którego uprzednio przesunął go tłok. Różnica pierwotnego położenia tłoka i położenia pierścienia po badaniu wskazywała na deformację objętościową cieczy (ściśliwość), odpowiadającą zadanemu ciśnieniu.

Zarówno dla wody, jak i dla roztworu soli badania powtórzone trzykrotnie. Wyniki prezentowane w dalszej części pracy są wartościami średnimi z tych trzech serii badań.

## 5.2. Realizacja ciśnienia i przebieg badań

Przygotowane i oznakowane naczynia z wodą i roztworem soli poddawano ciśnieniu w specjalnie skonstruowanym urządzeniu (rys. 2). Jest to wysokociśnieniowe hydrostatyczne stanowisko badawcze, zaprojektowane i zrealizowane w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, umożliwiające prowadzenie badań pod ciśnieniem hydrostatycznym do 800 MPa w nieograniczonym czasie [7].



Rys. 2. Stanowisko badawcze do prowadzenia badań pod wysokim ciśnieniem

Najważniejszymi elementami tego urządzenia są: komora wysokociśnieniowa, pompa ciśnieniowa o płynnej regulacji ciśnienia, podwójny system rejestracji ciśnienia — hydrauliczny (manometr) i elektroniczny (cyfrowy). Do komory ciśnieniowej w kształcie cylindra wkładano po trzy naczynia pomiarowe równocześnie. Komora po zamknięciu wypełniała się płynem, sporządzonym na bazie gliceryny i glikolu, w którym zanurzone były naczynia pomiarowe. Na płyn, całkowicie wypełniający komorę ciśnieniową, zaczęło po otwarciu zaworów oddziaływać ciśnienie przekazywane przez pompę.

Prowadzący badanie podnosił ciśnienie w układzie za pomocą specjalnego pokrętkła. Prędkość przyrostu ciśnienia wynosiła 4,5 MPa/s ( $\pm 0,5$  MPa/s). Po uzyskaniu żądanej wartości ciśnienia i pozostawieniu go na czas około 1 minuty, obniżano ciśnienie z tą samą prędkością do poziomu zerowego. Następnie po otwarciu komory ciśnieniowej wyjmowano naczynia pomiarowe i dokonywano pomiarów ściśliwości cieczy, wskazanych przez przesunięcie pierścienia pomiarowego w naczyniu ( $\Delta H$ ). Przesunięcie to mierzono za pomocą suwmiarki z dokładnością 0,05 mm, w 4–5 miejscach na obwodzie naczynia, po czym wyliczano wartość średnią.

## 6. Uzyskane wyniki

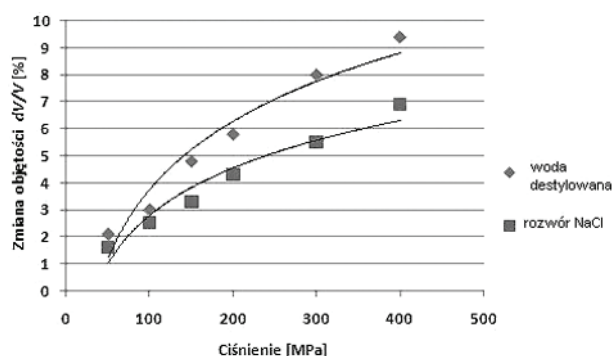
Wychodząc z wartości przesuwu tłoka ( $\Delta H$ ), obliczono zmianę objętości cieczy względem objętości początkowej, wyrażoną w procentach, oraz określono współczynnik ściśliwości  $\beta$ . Wyniki zestawiono w tabeli (tab. 2).

TABELA 2

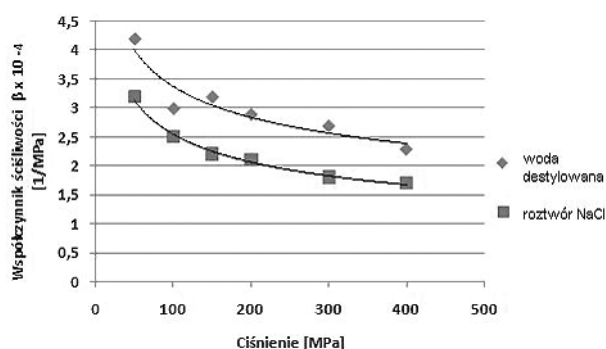
**Zmiany objętości wody i roztworu NaCl oraz wartości współczynników ściśliwości  $\beta$  w zależności od ciśnień, dla temperatury 21°C**

Ciśnienie [MPa]	Woda destylowana		Wodny roztwór NaCl (20g/dm <sup>3</sup> )	
	$\Delta V/V$ [%]	współczynnik ściśliwości $\beta \times 10^{-4}$ [1/MPa]	$\Delta V/V$ [%]	współczynnik ściśliwości $\beta \times 10^{-4}$ [1/MPa]
50	2,1	4,2	1,6	3,2
100	3,0	3,0	2,5	2,5
150	4,8	3,2	3,3	2,2
200	5,8	2,9	4,3	2,1
300	8,0	2,7	5,5	1,8
400	9,4	2,3	6,9	1,7

Analizę charakteru zachodzących zmian przeprowadzono w oparciu o aproksymację logarytmiczną dla zmian objętości i aproksymację potęgową dla zmian współczynnika ściśliwości  $\beta$ , co przedstawiono na poniższych rysunkach (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Zmiany objętości cieczy pod wpływem wysokich ciśnień



Rys. 4. Charakter zmian współczynnika ściśliwości pod wpływem wysokich ciśnień

## 7. Podsumowanie i wnioski

Z przeprowadzonych badań wynika, że pod wpływem wysokich ciśnień woda i wodny roztwór soli NaCl zmniejszają swoją objętość, przy czym zmiany objętości nie pozostają w prostej zależności od wartości przyłożonego ciśnienia. Z charakteru krzywych ściśliwości wynika, że badane ciecze mogą jeszcze ulegać dalszym zmianom objętości przy wyższych niż zastosowane ciśnieniach.

Potwierdziło się znane z literatury stwierdzenie [8], że roztwory soli wykazują relatywnie mniejszą ściśliwość niż woda i uzyskano tutaj konkretne wartości zmian objętości i współczynnika ściśliwości  $\beta$ . W przedziale ciśnień od 50 do 400 MPa objętość wody zmniejsz-

szła się od 2,1 do 9,4%, a współczynnik ściśliwości malał odpowiednio od 4,2 do  $2,3 \times 10^{-4}$  1/MPa. Natomiast dla roztworu NaCl ( $20 \text{ g/dm}^3$ ), wraz ze wzrostem ciśnienia od 50 do 400 MPa objętość cieczy malała odpowiednio od 1,6 do 6,9%, a współczynnik ściśliwości zmieniał się odpowiednio od 3,2 do  $1,7 \cdot 10^{-4}$  1/MPa.

Objętość cieczy po zdjęciu ciśnienia każdorazowo wracała do wartości początkowej. Dla pełnego zobrazowania zmian ściśliwości wody i roztworu soli wskazane byłoby wykonanie serii badań w identycznych warunkach z przejściem od ciśnień niskich, poprzez średnie, do wysokich.

#### LITERATURA

- [1] *Czetyrtyński E., Szuster A.*: Hydrologia i hydraulika. Warszawa, PWSZ 1971
- [2] *Czetyrtyński E., Utrysko B.*: Hydraulika i hydromechanika. Warszawa, PWN 1969
- [3] *Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H.*: Mechanika płynów. Wrocław, Ofic. Wyd. PWr. 2001
- [4] *Książkiewicz M.*: Geologia dynamiczna. Warszawa, Wyd. Geol. 1979
- [5] *Munson B.R., Young D.F., Okiński T.H.*: Fundamentals of fluid Mechanics. Wiley, NY, 1998
- [6] *Streeter V.L., Wylie E.B., Bedford K.W.*: Fluid Mechanics. WCB/McGraw-Hill, Boston, 1999
- [7] *Sysak Z.*: Wytwarzanie wysokich ciśnień — reaktor wysokociśnieniowy. Raport SPR nr 21/97, Wrocław, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej 1997
- [8] *Wieczysty A.*: Hydrogeologia inżynierska. Warszawa – Kraków, PWN 1970