

*Ewa Koszela-Marek\**

## CHARAKTERYSTYKA ZMIAN ŚCISLIWOŚCI ROZTWORÓW SOLI NaCl POD WPŁYWEM WYSOKICH CIŚNIEŃ HYDROSTATYCZNYCH

---

### 1. Wprowadzenie

Pojęcie ściśliwości płynów, w tym wody i roztworów wodnych, ma istotne znaczenie w wielu naukowych gałęziach wiedzy, do których należy m.in. hydrogeologia, geologia, geotechnika, hydrotechnika, górnictwo. Parametr ten wykorzystywane jest takich dziedzinach, jak: obliczenia 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. Ściśliwość płynu jest cechą charakteryzującą podatność płynu na odkształcenie objętościowe przy zmianie ciśnienia. Jeżeli masa płynu o objętości  $V$ , w temperaturze  $T$ , znajduje się pod ciśnieniem  $p$ , to zmiana ciśnienia o wartość  $\Delta p$  spowoduje zmianę objętości płynu o  $\Delta V$  [2, 3, 5, 6].

Powszechnie znane pojęcie średniego współczynnika ściśliwości  $\xi$  jest rozumiane jako względna zmiana objętości do zmiany ciśnienia [2, 3] i przedstawiane wzorem (1):

$$\xi = \frac{\Delta V}{V} \frac{1}{\Delta p} \quad (1)$$

Wyraża się go w jednostce 1/Pa. Przyjmuje się, że ściśliwość wody pod wpływem przyłożonego ciśnienia jest stosunkowo nieduża, a dla większości przypadków technicznych jest tak mała, że może być pominięta [2].

---

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

Czterwertyński i Szuster [1] uważają, że pod wpływem ciśnienia 0,1÷5,0 MPa, przy temperaturze 20°C, objętość wody zmniejsza się o 0,23%. Wieczysty [8] omawiając szacowanie dynamicznych złóż wody podziemnej podaje, że „współczynnik sprężystości objętościowej wody” zmienia się w zależności od ciśnienia i temperatury otaczającego środowiska w granicach od  $4,16 \times 10^{-5}$  1/at do  $5,25 \times 10^{-5}$  1/at. Dla wód silnie zmineralizowanych wartość tego współczynnika jest mniejsza, dochodząc do wartości  $2,8 \times 10^{-5}$  1/at [8].

Jeżowiecka-Kabsch i Szewczyk [2] wartość współczynnika ściśliwości wody przedstawiają, uzależniając jego wartość od ciśnienia i temperatury (tab. 1). Podają, że dla temperatury 20°C wynosi on 47,72 1/GPa.

TABELA 1  
**Współczynnik ściśliwości wody w zależności od ciśnienia i temperatury**  
 (za: Jeżowiecką-Kabsch i Szewczykiem [2])

Ciśnienie [MPa]	Temperatura [°C]	Współczynnik ściśliwości [1/GPa]
0,1÷10	0	52,11
	5	50,27
	10	49,25
	15	48,23
	20	47,72

Często źródła pochodzenia podawanych wartości współczynnika ściśliwości, trudne są dzisiaj do odtworzenia, zwłaszcza w zakresie wysokich ciśnień z przedziału 100÷1000 MPa. Zagadnienia dotyczące ściśliwości wody i wodnych roztworów soli pod wpływem wysokich ciśnień, jak wskazuje w literaturze [2, 3, 5, 6, 8], nie są dobrze rozpoznane. Prawdopodobną przyczyną tego może być trudność budowy urządzeń z komorą badawczą do badań, w której utrzymywane byłoby żądane ciśnienie przez dłuższy czas na stałym poziomie.

Urządzenie takie zbudowano w Politechnice Wrocławskiej i zostało ono zastosowane m.in. do przeprowadzenia doświadczalnej weryfikacji ściśliwości wody, a także wodnych roztworów soli NaCl. W czasie wcześniej przeprowadzonych badań [4] porównano wyniki badań ściśliwości wody destylowanej i roztworu soli NaCl o stężeniu 20 g/dm<sup>3</sup>, poddanych ciśnieniom od 50 do 400 MPa. Stwierdzono, że w zakresie tych ciśnień objętość wody zmniejszyła się od 2,1 do 9,4%, a roztworu soli od 1,6 do 6,9%. W niniejszej pracy przeprowadzono analizę wyników badań zmienności ściśliwości wodnych roztworów NaCl o różnych stężeniach (5, 10, 20 g/dm<sup>3</sup>) pod działaniem wysokich ciśnień hydrostatycznych o wartościach od 50 do 400 MPa.

Wyniki odniesiono również do przedstawianych wcześniej [4] badań ściśliwości wody destylowanej.

## 2. Zastosowana metodyka i przebieg badań

### Założenia badawcze

Badania przeprowadzono przy zachowaniu następujących założeń:

- temperatury w czasie badań jest stała i wynosi 21°C;
- badane roztwory są całkowicie odgazowane;
- działające na badaną ciecz ciśnienie jest ciśnieniem hydrostatycznym;
- ciśnienie wzrasta do żądanej wartości w sposób quasi ciągły, nie nagły, a następnie w podobny sposób powraca do zera;
- czas oddziaływania zadanego ciśnienia — 1 min;
- naczynia badawcze są cylindryczne i mają stałą średnicę;
- siły tarcia w naczyniu pomiarowym na granicy tłok – ścianka są tak małe, że praktycznie pomijalne.

### Przygotowanie prób do badań

Badano ściśliwość wodnych roztworów NaCl o stężeniu 5 i 10 g/dm<sup>3</sup>, przy zastosowaniu następujących ciśnień: 50, 100, 150, 200, 300 i 400 MPa.

Roztwory sporządzano w ten sposób, że odważono odpowiednio 5 i 10 g NaCl o czystości 98,98%, z dokładnością 1 mg, a następnie wsypywano do kolby miarowej, dopełniając ją wodą destylowaną do objętości 1 dm<sup>3</sup>. Przygotowane roztwory umieszczano za pomocą strzykawki w kalibrowanych cylindrycznych naczyniach szklanych i zamykano specjalnym, szczelnym tłokiem, z jednoczesnym odprowadzaniem powietrza z nad cieczy. W ten sposób przestrzeń między dnem naczynia a tłokiem w całości wypełniona była cieczą. Każde naczynie zawierało taką samą objętość badanej cieczy 5,665 cm<sup>3</sup>, 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.

Dla każdego roztworu soli badania powtórzono trzykrotnie, a wyniki prezentowane w dalszej części pracy są wartościami średnimi z tych trzech serii badań.

### Badanie w wysokociśnieniowym stanowisku badawczym

Przygotowane i oznakowane naczynia z roztworami soli poddawano ciśnieniu w specjalnie skonstruowanym urządzeniu. Jest to wysokociśnieniowe hydrostatyczne stanowisko badawcze, zaprojektowane i zrealizowane w Instytucie Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, przez Z. Sysaka [7]. Umożliwia ono prowadzenie badań pod

ciśnieniem hydrostatycznym do 800 MPa, w nieograniczonym czasie [7]. 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. Ciśnienie podnoszono w układzie za pomocą specjalnego pokrętki. Prędkość przyrostu ciśnienia wynosiła 4,5 MPa/s ( $\pm 0,5$  MPa/s). Po uzyskaniu żądanej wartości ciśnienia, pozostawało ono na tym samym poziomie przez czas około 1 minuty. Następnie ciśnienie obniżano do poziomu zerowego. Po otwarciu komory ciśnieniowej wyjmowano naczynia pomiarowe i dokonywano pomiarów ściśliwości cieczy, wskazanych przez przesunięty w naczyniu pierścień pomiarowy ( $\Delta H$ ). Przesunięcie to mierzono za pomocą suwmiarki z dokładnością 0,05 mm, w 5 miejscach na obwodzie naczynia, po czym wyliczano wartość średnią. Współczynniki ściśliwości obliczono w oparciu o wzór (1).

### 3. Uzyskane wyniki

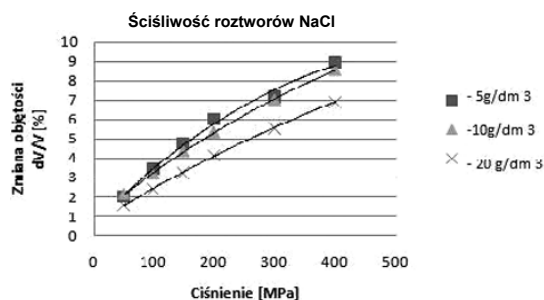
Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, obliczono zmiany objętości wodnych roztworów NaCl, względem ich objętości początkowej ( $\Delta V/V$ ), wyrażone w procentach oraz określono współczynnik ściśliwości  $\xi$ . Wyniki zestawiono w tabeli (tab. 2).

TABELA 2

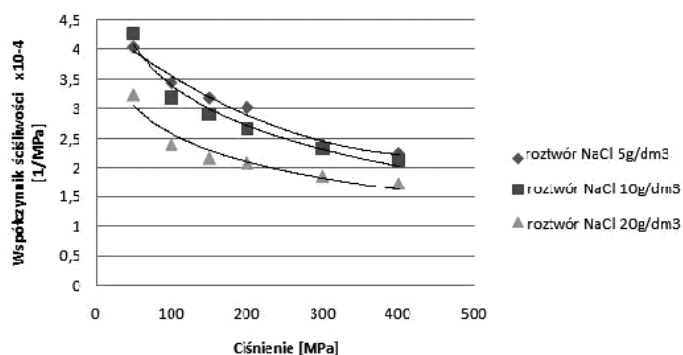
**Zmiany objętości wodnych roztworów NaCl o różnych stężeniach oraz wartości współczynników ściśliwości w zależności od ciśnień, dla temperatury 21°C**

Ciśnienie [MPa]	Wodny roztwór NaCl (5 g/dm <sup>3</sup> )		Wodny roztwór NaCl (10 g/dm <sup>3</sup> )		Wodny roztwór NaCl (20 g/dm <sup>3</sup> )	
	$\Delta V/V$ [%]	Współczynnik ściśliwości $\xi \times 10^{-4}$ [1/MPa]	$\Delta V/V$ [%]	Współczynnik ściśliwości $\xi \times 10^{-4}$ [1/MPa]	$\Delta V/V$ [%]	Współczynnik ściśliwości $\xi \times 10^{-4}$ [1/MPa]
50	2,02	4,04	2,13	4,26	1,62	3,24
100	3,44	3,44	3,19	3,19	2,41	2,41
150	4,78	3,18	4,37	2,91	3,26	2,17
200	6,03	3,02	5,35	2,67	4,18	2,09
300	7,18	2,39	7,04	2,34	5,58	1,86
400	8,96	2,24	8,58	2,14	6,90	1,73

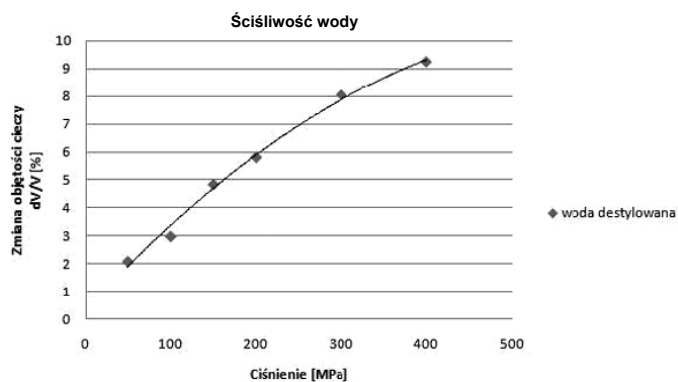
Charakterystykę zachodzących zmian objętości i współczynników ściśliwości pod wpływem ciśnienia dla badanych roztworów przedstawiono na wykresach (rys. 1 i 2). Na podstawie danych uzyskanych z wcześniej przeprowadzonych badań [4] sporządzono wykres ściśliwości wody destylowanej (rys. 3).



Rys. 1. Zmiany objętości wodnych roztworów NaCl pod wpływem wysokich ciśnień

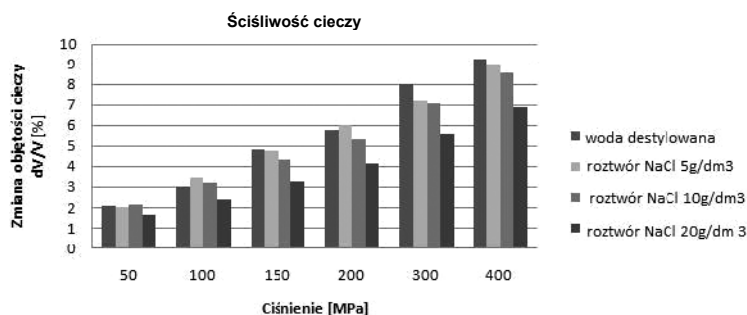


Rys. 2. Charakter zmian współczynnika ściśliwości wodnych roztworów NaCl pod wpływem działania wysokich ciśnień



Rys. 3. Zmiany objętości wody pod wpływem wysokich ciśnień

Natomiast na wykresie słupkowym (rys. 4) zestawiono wszystkie uzyskane wyniki. W przejrzysty sposób pokazuje on zmiany ścisłości wody i wodnych roztworów NaCl o różnych stężeniach pod działaniem zadawanych ciśnień hydrostatycznych.



Rys. 4. Zmiany objętości wodnych roztworów NaCl i wody pod wpływem wysokich ciśnień.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

- Zastosowana aparatura, nazwana przez jej projektanta tzw. „wysokociśnieniowym stanowiskiem badawczym” [7], pozwoliła na przeprowadzenie doświadczalnej weryfikacji ścisłości roztworów wodnych NaCl o różnych stężeniach i wody destylowanej w warunkach wysokich ciśnień hydrostatycznych o wartościach od 50 do 400 MPa.
- Zaznaczyła się wyraźna zależność między zmianami ścisłości wodnych roztworów NaCl i wielkością działającego ciśnienia. Widać również zależność ścisłości od wielkości stężenia badanych roztworów- im większe stężenie, tym ścisłość mniejsza. Największa zmiana objętości (8,96%) nastąpiła dla roztworu o stężeniu najmniejszym (5 g/dm<sup>3</sup>), przy zastosowanym największym ciśnieniu 400 MPa. Współczynnik ścisłości dla tych warunków wynosił  $2,24 \times 10^{-4}$  1/MPa. Najmniejszą zmianę objętości zanotowano (1,62%) dla roztworu o stężeniu największym (20 g/dm<sup>3</sup>), przy najmniejszym ciśnieniu 50 MPa, a współczynnik ścisłości kształtował się na poziomie  $3,24 \times 10^{-4}$  1/MPa.
- Wszystkie roztwory soli wykazały mniejszą ścisłość niż woda destylowana. W przedziale ciśnień od 50 do 400 MPa objętość wody zmniejszyła się od 2,1 do 9,4%, a współczynnik ścisłości malał odpowiednio od  $4,2$  do  $2,3 \times 10^{-4}$  1/MPa.
- Z przeprowadzonych badań i charakterystyk wykresów ścisłości wynika, że wodne roztwory soli NaCl zmniejszają swoją objętość pod wpływem wysokich ciśnień, a zależność tych zmian jest nieliniowa.
- Objętość cieczy po zdjęciu ciśnienia każdorazowo wracała do wartości początkowej. Dla pełnego zobrazowania zmian ścisłości wody i roztworów soli przy wzrastającym ciśnieniu, wskazane byłoby wykonanie serii badań w identycznych warunkach z przejściem od ciśnień niskich, poprzez średnie do wysokich, przekraczając nawet wartości ciśnień zastosowanych w niniejszej pracy.

#### LITERATURA

- [1] *Czetyrtyński, E., Szuster, A.*: Hydrologia i hydraulika. Warszawa, PWSZ 1971
- [2] *Jeżowiecka-Kabsch K., Szewczyk H.*: Mechanika płynów. Wrocław, Ofic. Wyd. PWr 2001
- [3] *Franks F.*: Water: 2nd Edition A matrix of life, Royal Society of Chemistry. Cambridge, 2000
- [4] *Koszela J., Koszela-Marek E., Sysak Z.*: Weryfikacja zmian ściśliwości wody i roztworu soli NaCl pod wpływem wysokich ciśnień, Kwartalnik UWND AGH, r. 32, z. 2, 2008, s. 205–211
- [5] *Munson B.R., Young D.F., Okiiski T.H.*: Fundamentals of fluid Mechanics. NY, Wiley 1998
- [6] *Streeter V.L., Wylie E.B., Bedford K.W.*: Fluid Mechanics. Boston, WCB/McGraw-Hill 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