

# Wykorzystanie pomiaru szybkości spadku ciśnienia do oceny zaworów hydraulicznych i cieczy hydraulicznych

Klaudiusz Klarecki

## Wprowadzenie

W układach hydraulicznych stosowane są różnego rodzaju zawory, dla których istotnym wymogiem jest szczelność. Nie chodzi przy tym o brak przecieków cieczy hydraulicznej na zewnątrz układu hydraulicznego – taki wymóg musi spełniać każdy element układu hydraulicznego.

W przypadku zaworów przez szczelność należy rozumieć brak przepływu pomiędzy przyłączami, które są w danym stanie zaworu od siebie odseparowane. Na przykład dla zaworu odcinającego prostego (zaworu kulowego) 2-drogowego szczelność można rozważać w stanie zamkniętym zaworu. W przypadku typowych rozdzielaczy suwakowych można badać szczelność większej liczby wariantów par dróg przepływu. Uwaga: dla zaworów hydraulicznych stosuje się nazwę „droga przepływu” dla przyłącza wlotowego lub wylotowego, przez które przeprowadzany jest strumień cieczy.

Szczelność odcięcia dróg przepływu jest szczególnie istotna w przypadku takich zaworów, które domyślnie są przez użytkowników traktowane jako „bezp przeciekowe”. Zazwyczaj są to zawory: odcinające proste (kulowe), dławiące nastawne z funkcją odcięcia przepływu, zwrotne, zwrotne sterowane, rozdzielacze gniazdowe i inne zawory hydrauliczne gniazdowe. Takie przekonania użytkowników są skutkiem częstego nazywania takich zaworów „bezp przeciekowymi” (*leak-free valves*) i również częstego braku informacji ilościowej o przeciekach w katalogach producentów.


Takie postępowanie producentów zaworów hydraulicznych nie jest oczywiście wynikiem ich złej woli. Jest to raczej świadectwo trudności związanych z pomiarem ekstremalnie małych natężeń przepływu przecieków w sprawnych zaworach gniazdowych. Zazwyczaj tak małe przepływy podawane są jako liczba kropli w jednostce czasu przy założonym ciśnieniu lub różnicy ciśnień pomiędzy drogami przepływu. Należy przy tym zauważyć, że taka jednostka nie jest związana z układem SI, co gorsza, objętość jednej kropli jest różnie definiowana (od 0,05 do 0,1 cm<sup>3</sup>).

W artykule przedstawiono wstępne testy szczelności zaworów hydraulicznych zrealizowanych inną metodą, opartą na pomiarze zmian ciśnienia w przestrzeni zamkniętej badanymi zaworami.

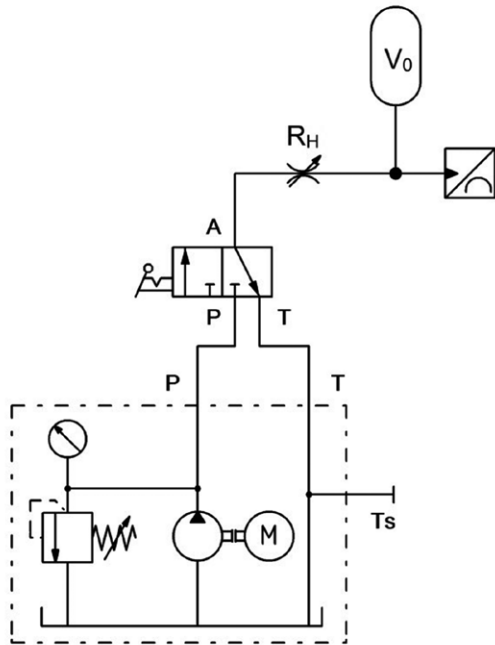
## Założenia badania szczelności zaworów metodą pomiaru szybkości spadku ciśnienia

Badanie szczelności oparto na pomiarze szybkości spadku ciśnienia w przestrzeni wypełnionej cieczą, której połączenie

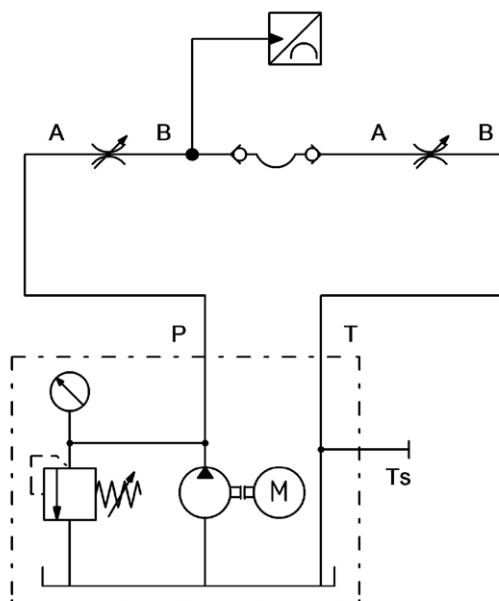
**Streszczenie:** W artykule przedstawiono rozważania teoretyczne oraz wyniki badań eksperymentalnych związanych ze spadkiem ciśnienia w komorach zamkniętych testowanymi pod kątem szczelności zaworami hydraulicznymi. Zauważono znaczne rozbieżności pomiędzy wynikami otrzymanymi dla modelu matematycznego, w którym założono stałą wartość modułu sprężystości objętościowej cieczy hydraulicznej, a rezultatami badań eksperymentalnych. Próbuąc wyjaśnić zaobserwowane rozbieżności, utworzono nowy model matematyczny opisujący ciśnienie w komorze zamkniętej nieszczelnym zaworem, zawierającej ciecz o liniowo zależnym module sprężystości objętościowej od ciśnienia. Wyniki symulacji z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu matematycznego zbliżyły się do wyników testów eksperymentalnych dla bardzo dużych różnic pomiędzy wartościami modułu sprężystości objętościowej cieczy przy niskim i wysokim ciśnieniu, co jest charakterystyczne dla cieczy zapowietrzonych (zawierających pęcherzyki nierozpuszczonego powietrza). Poza testowaniem szczelności zaworów, w artykule zaproponowano wykorzystanie metody pomiaru szybkości zmian ciśnienia do wyznaczania zastępczego modułu sprężystości objętościowej cieczy hydraulicznych oraz szacowania ich zapowietrzenia.

 **Abstract:** The article presents theoretical considerations and the results of experimental tests related to the pressure drop speed in closed chambers by hydraulic valves tested for leaks. A significant discrepancy was observed between the results obtained for a mathematical model in which a constant value of the bulk modulus of the hydraulic fluid against the results of experimental studies was assumed. Trying to explain the discrepancies observed, a new mathematical model was created describing the pressure in the chamber closed by a leaking valve, containing a liquid with a bulk modulus linearly dependent of pressure. The simulation results using a modified mathematical model approached the results of experimental tests for very large differences between the values of the bulk modulus of the liquid at low and high pressure, which is characteristic for aerated liquids (containing bubbles of insoluble air). In addition to valve leak testing, the article proposes the use of a method for measuring the pressure drop speed to determine the replacement bulk modulus of hydraulic fluids and to estimate their aeration level.

ze zbiornikiem otwartym było odcięte testowanym zaworem (rys. 1). Z uwagi na zachowanie możliwości przepłukiwania przestrzeni wypełnionej cieczą oraz testowanego zaworu celem usunięcia ewentualnego ich zapowietrzenia, badania przeprowadzono przy wykorzystaniu zmodyfikowanego układu hydraulicznego (rys. 2). W układzie zmodyfikowanym w istocie mierzony jest sumaryczny przeciek dwóch zaworów hydraulicznych.



Rys. 1. Wstępna koncepcja układu do testowania szczelności zaworu (do schematu przyjęto zawór dławiący z funkcją odcięcia przepływu)



Rys. 2. Zmodyfikowany układ do testowania szczelności zaworów – umożliwia przepłukiwanie badanych zaworów

### Model fenomenologiczny analizowanego zjawiska

Wstępnie przyjęto, że podczas testów szczelności będą spełnione następujące warunki:

- przecieki na testowanym zaworze będą miały charakter przepływu laminarnego;
- ciecz robocza będzie miała stałą temperaturę;
- ciecz robocza będzie miała stały moduł sprężystości objętościowej;
- objętość przestrzeni napełnionej cieczą roboczą pod ciśnieniem będzie stała;
- na przyłączy wylotowym badanego zaworu panuje ciśnienie atmosferyczne.

Dzięki przyjętym założeniom można było opracować prosty model matematyczny wiążący ze sobą przecieki i zmianę ciśnienia w zamkniętej objętości cieczy roboczej. Przyjmując w badanym zaworze przepływ laminarny cieczy o stałej temperaturze, a tym samym i stałej lepkości dynamicznej, można zapisać związek pomiędzy ciśnieniem  $p$  cieczy w przestrzeni zamkniętej zaworem o oporze hydraulicznym  $R_H$  a natężeniem przepływu strumienia przecieków  $Q$  jako:

$$Q = \frac{p}{R_H} \quad (1)$$

Jednocześnie można zapisać związek pomiędzy objętością cieczy wyprowadzoną przeciekami  $V_L$  z przestrzeni  $V_0$  a ciśnieniem jako:

$$V_L = \frac{p \cdot V_0}{B} \quad (2)$$

Dla ułatwienia zapisu można wprowadzić do zależności (2) pojemność hydrauliczną (kapacytancję)  $C_H$ , równą:

$$C_H = \frac{V_0}{B} \quad (3)$$

Chwilowe natężenie przecieków  $Q$  można zapisać też jako:

$$Q = -\frac{dV_L}{dt} \quad (4)$$

Sprowadzając zależności (1–4) do jednego równania, po rozdzieleniu zmiennych otrzymujemy:

$$\frac{dV_L}{V_L} = -\frac{dt}{R_H C_H} \quad (5)$$

Rozwiązaniem równania (5) dla dodatkowej objętości cieczy roboczej  $V_{L0}$  skompresowanej w przestrzeni  $V_0$  pod ciśnieniem początkowym  $p_0$  jest:

$$V_L = V_{L0} \cdot e^{-\frac{t}{R_H C_H}} \quad (6)$$

gdzie:

$V_L$  – objętość wycieku przez testowany zawór z przestrzeni  $V_0$  w czasie  $t$ .

Korzystając z zależności (6), można znaleźć zależność opisującą zmiany ciśnienia cieczy w przestrzeni  $V_0$  podaną jako:

$$p = p_0 \cdot e^{\frac{-t}{R_H C_H}} \quad (7)$$

Należy zauważyć pełną analogię pomiędzy powyższymi rozważaniami i wynikami przestawionymi w pracy [1], a także przypadkiem układu elektrycznego z obwodem  $R_C$  (rys. 3). Zawór dławiący można zastąpić rezystorem o oporności  $R$ , a przestrzeń zawierającą ciecz pod ciśnieniem można zastąpić kondensatorem o pojemności  $C$ . Dla takiego układu napięcie na okładkach kondensatora w czasie rozładowywania przez zwarcie rezystorem można zapisać jako:

$$U = U_0 \cdot e^{\frac{-t}{R C}} \quad (8)$$

Przyjmując wartości liczbowe dla wielkości ciśnienia początkowego  $p_0$ , objętości  $V_0$  przestrzeni wypełnionej cieczą o module sprężystości objętościowej  $B$  rozładowywanej przeciekami przez zawór o oporze hydraulicznym  $R_H$ , wykonano szkic przebiegu ciśnienia podczas rozładowywania (rys. 4).

### Badania eksperymentalne

Rozważania teoretyczne postanowiono zweryfikować badaniami, w których ciecz hydrauliczna zamykana była zaworami:

- dławiącymi z funkcją odcinania typu DV-06 (2 szt.);
- zwrotnymi obciążonymi typu RV-06 (3 szt.);
- odcinającymi prostymi (kulowymi) typu KHB (3 szt.).

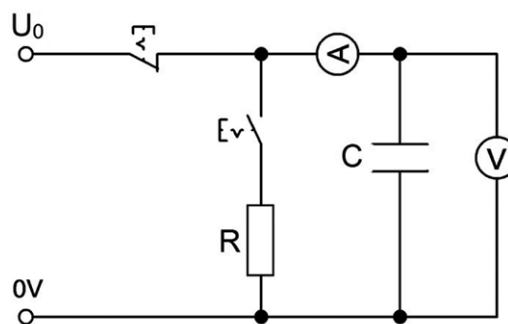
Do badań przyjęto olej hydrauliczny HM46, którego temperatura wynosiła  $30 \pm 1$  [°C]. Jako przestrzeń, w której była zamykana ciecz hydrauliczna przez testowane zawory, przyjęto:

- wąż elastyczny 1SC DN8 o długości 1,2 m wraz z niezbędnymi szybkozłączami suchoodcinającymi;
- dwa węże elastyczne 1SC DN8 o długościach 1,2 m wraz z niezbędnymi szybkozłączami suchoodcinającymi;
- stalowy kolektor wraz z niezbędnymi szybkozłączami suchoodcinającymi.

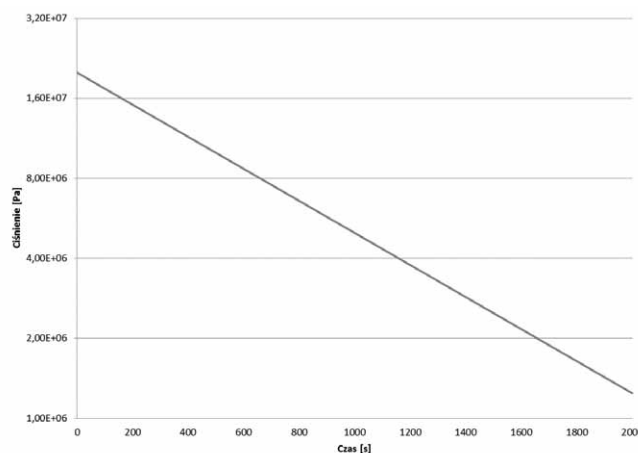
Objętości komór zamykanych zaworami wynosiły odpowiednio:

- 73 cm<sup>3</sup> dla testów z jednym wężem 1SC DN08;
- 133 cm<sup>3</sup> dla testów z dwoma wężami 1SC DN08;
- 53 cm<sup>3</sup> dla testów z grubościennym kolektorem stalowym.

Badania prowadzono w układzie zbudowanym wg rys. 2, co oznacza, że testowano sumaryczny przeciek dwóch zaworów. Przed każdym pomiarem realizowano przepłukiwanie komory



**Rys. 3.** Przykład układu z obwodem RC jako analogia elektryczna dla układu hydraulicznego



**Rys. 4.** Przykładowy przebieg ciśnienia w komorze zamkniętej nieszczelnym zaworem

z cieczą hydrauliczną wraz z testowanymi zaworami, otwierając przez nie przepływ od zasilacza hydraulicznego na minimum dwie minuty.

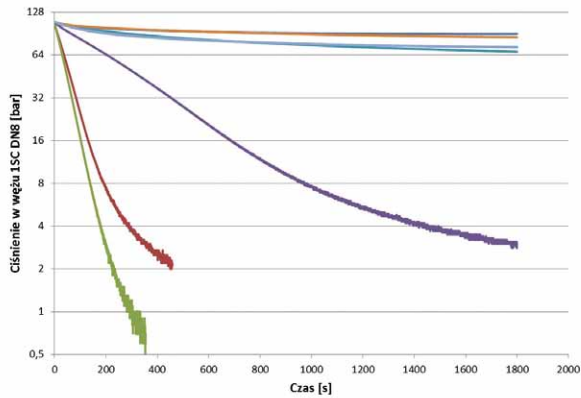
W tabeli 1 podano kombinacje dwóch jednocześnie testowanych zaworów wraz z nazwami plików z zarejestrowanymi przebiegami ciśnienia.

Zarejestrowane przebiegi ciśnień pokazano na rys. 5–8.

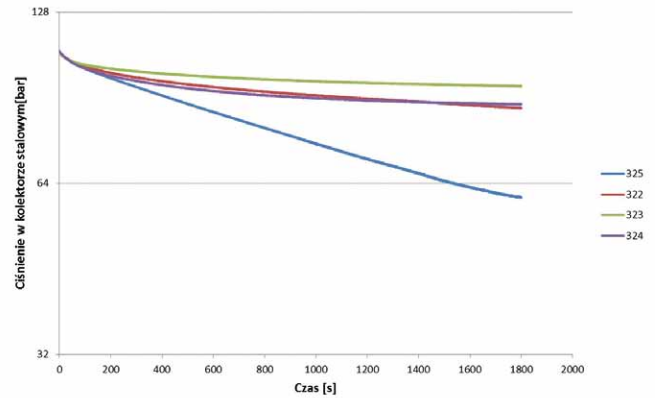
Przedstawione przebiegi ciśnień cieczy hydraulicznej w komorach zamkniętych badanymi zaworami są zbliżone

**Tabela 1.** Zapis przetestowanych kombinacji zaworów

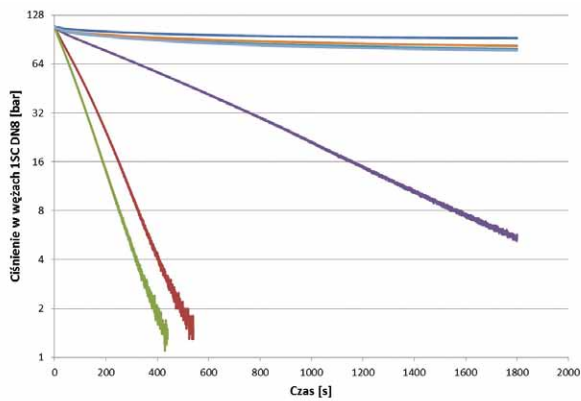
Nazwa pliku z danymi pomiarowymi		Oznaczenie zaworu na wlocie komory							
		DV-06 II	RV-06 I	RV-06 II	RV-06 III	KHB I	KHB II	KHB III	
Oznaczenie zaworu na wylocie z komory	DV-06 I		307 (wąż) 321 (2x wąż)	308 (wąż) 319 (2x wąż)	309 (wąż) 320 (2x wąż)	310 (wąż) 318 (2x wąż)	311 (wąż) 317 (2x wąż)	312 (wąż) 316 (2x wąż)	313 (wąż) 315 (2x wąż)
	DV-06 II	325 (stal)					322 (2x wąż)	323 (2x wąż)	324 (2x wąż)
	KHB II						326 (stal)		328 (stal)
	KHB III						327 (stal)		



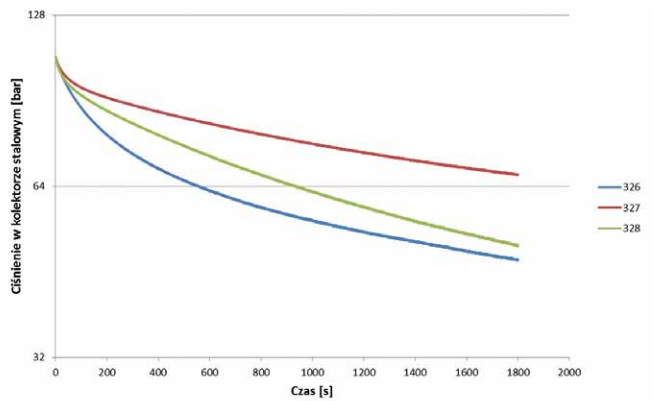
**Rys. 5.** Przebiegi ciśnienia w węźu 1SC DN8 zamkniętym na wylocie zaworem DV-06 II



**Rys. 7.** Przebiegi ciśnienia w kolektorze stalowym zamkniętym na wylocie zaworem DV-06 II



**Rys. 6.** Przebiegi ciśnienia w zdublowanych węzłach 1SC DN8 zamkniętych na wylocie zaworem DV-06 II



**Rys. 8.** Przebiegi ciśnienia w kolektorze stalowym zamkniętym na wylocie zaworem KHB

reklama

reklama

do wyników rozważań teoretycznych opisanych zależnościami (7) i zilustrowanych rys. 4. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że jedynie dla zaworów zwrotnych typu RV-06, zamykających z jednej strony połączone szeregowo dwa węże 1SC DN8 o długości 1,2 m każdy (pliki 318 – 320), otrzymano przebiegi ciśnień niemal dokładnie odpowiadające oczekiwaniom.

W celu porównania wpływu objętości komory, w której zamknięta jest ciecz hydrauliczna pod ciśnieniem, na rys. 9 zestawiono przebiegi otrzymane dla komór zamkniętych dwoma zaworami dławiącymi DV-06.

Ponieważ pokazane przebiegi otrzymano dla tych samych zaworów, to można przyjąć, że wartość oporu hydraulicznego  $R_H$  była dla każdego pomiaru taka sama. Zatem zauważalne różnice wynikają z różnych wartości pojemności hydraulicznych  $C_H$  komór zamkniętych zaworami DV-06.

W przypadku komory w postaci kolektora stalowego szybkość spadku ciśnienia jest znacznie większa, a sam przebieg ma kształt bardziej zbliżony do przebiegu wykładniczego wg zależności (7) (patrz rys. 9). Jednocześnie należy też zauważyć, że przebiegi ciśnień podczas testów dla komory w postaci kolektora stalowego, pokazane na rys. 7 i 8, niemal we wszystkich przypadkach nie odpowiadają dokładnie przebiegowi wykładniczemu. Jedynie podczas pomiaru oznaczonego „325”, w czasie którego kolektor stalowy był zamknięty zaworami dławiącymi DV-06, można mówić o przebiegu niemal wykładniczym (kwadrat współczynnika korelacji  $R^2 = 0,9964$ ).

Reasumując, na podstawie analizy przebiegów pokazanych na rys. 7, 8, a zwłaszcza 9 można postawić dwie tezy. Pierwsza z nich jest trywialna:

- Sztywność ścianek komory ma wpływ na szybkość spadku ciśnienia zamkniętej w niej cieczy.

Zgodnie z doniesieniami literaturowymi [2] można przyjąć, że w przypadku grubościennych zbiorników stalowych (i wykonanych z innych materiałów o zbliżonym do stali module Younga) można przyjąć, że zastępczy moduł sprężystości objętościowej jest równy modułowi sprężystości objętościowej cieczy”

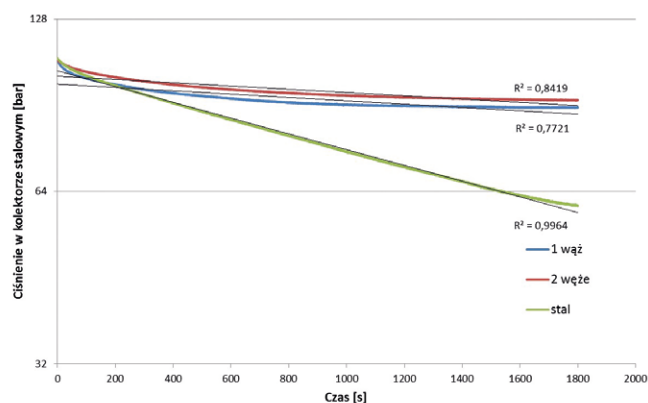
Druga teza, która może objaśnić różnice pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych a rozważaniami teoretycznymi, brzmi:

- Niewykładniczy przebieg ciśnienia cieczy zamkniętej w nieszczelnej komorze jest spowodowany zmiennością modułu sprężystości objętościowej cieczy.

Wpływ sztywności ścianek komory zawierającej ciecz hydrauliczną wynika z jej wpływu na zastępczy, tj. uwzględniający sprężyste odkształcenia ścianek komory, moduł sprężystości objętościowej cieczy. Rozważania dotyczące tego problemu opisano w [2], przy czym autor skupił się w szczególności na prędkości propagacji dźwięku w cieczy wynikającej z wartości zastępczego modułu sprężystości objętościowej cieczy.

### Analiza wpływu zmienności modułu sprężystości objętościowej na przebieg ciśnienia cieczy hydraulicznej zamkniętej w nieszczelnej komorze

Celem wyjaśnienia rozbieżności pomiędzy wynikami rozważań teoretycznych a rezultatami badań eksperymentalnych postanowiono zmodyfikować przyjęte początkowo założenia.



Rys. 9. Przebiegi ciśnień w przyjętych komorach zamkniętych zaworami DV-06 (dodano wykładnicze linie trendu)

Zgodnie z [3] należy zauważyć, że przyjęcie stałej wartości modułu sprężystości objętościowej w zakresie ciśnień od ok. 10 MPa do niemal ciśnienia atmosferycznego może być nieuzasadnione. Dla stałej temperatury mineralnego oleju hydraulicznego HM46 na podstawie [3] i [5] można przyjąć liniową zależność pomiędzy ciśnieniem a modułem sprężystości objętościowej.

Do tworzenia nowego modelu matematycznego przyjęto więc następujące założenie:

- Moduł sprężystości objętościowej liniowo zależy od ciśnienia cieczy hydraulicznej, przy czym dla ciśnienia atmosferycznego jego wartość wynosi  $B_0$ , a dla ciśnienia  $p_1$  przyjmuje wartość  $B_1$ .

Na podstawie powyższego założenia można zapisać zależność pomiędzy modułem sprężystości objętościowej cieczy hydraulicznej  $B$  a ciśnieniem  $p$  jako:

$$B = \frac{B_1 - B_0}{p_1} p + B_0 \quad (9)$$

Dla ułatwienia zapisu postanowiono zapisać zależność (9) jako:

$$B = a \cdot p + b \quad (10)$$

przy czym:

$$a = \frac{B_1 - B_0}{p_1} \quad (11)$$

$$b = B_0$$

Biorąc pod uwagę zależności (2), można zapisać związek pomiędzy zmianami ilości cieczy  $dV$  zamkniętej w przestrzeni o objętości  $V_0$  a ciśnieniem  $p$  jako:

$$\frac{dV}{V_0} = -\frac{dp}{B} \quad (12)$$

Po przekształceniu z uwzględnieniem (10) i wyeliminowaniu modułu dla ułatwienia zapisu można przyjąć:

$$dV = -\frac{V_0 dp}{ap + b} \quad (13)$$

Korzystając z (5), można zatem zapisać:

$$\frac{V_0 dp}{ap + b} = -\frac{p}{R_H} \quad (14)$$

Po rozdzieleniu zmiennych:

$$\frac{dp}{p^2 + \frac{b}{a}p} = -\frac{a \cdot dt}{R_H V_0} \quad (15)$$

Wynikiem całkowania równania (15) jest:

$$\frac{a}{b} \left[ \ln p - \ln \left( p + \frac{b}{a} \right) \right] + C = -\frac{a}{R_H V_0} t \quad (16)$$

Po przekształceniu równania (16) otrzymać można postać:

$$p = \frac{b}{a} \cdot \frac{e^{-\frac{b}{R_H V_0} t}}{1 - e^{-\frac{b}{R_H V_0} t}} \quad (17)$$

Stałą całkowania  $C$  można wyznaczyć, przyjmując, że ciśnienie cieczy ma w chwili  $t = 0$  wartość  $p_{pocz}$ :

$$p_{pocz} = \frac{b}{a} \cdot \frac{e^C}{1 - e^C}$$

$$C = \ln \left( \frac{p_{pocz}}{\frac{b}{a} + p_{pocz}} \right) \quad (18)$$

W celu wstępnej weryfikacji zależności (17) wykonano obliczenia przebiegów ciśnienia w komorze o objętości zawierającej olej hydrauliczny dla podanych wartości liczbowych (wartości

$B_0$  i  $B_1$  przyjęto na podstawie [3]):

- $p_{pocz} = 10$  MPa;
- $V_0 = 100$  cm<sup>3</sup>;
- $B_0 = 1,5$  GPa;
- $B_1 = 1,61$  GPa;
- $p_1 = 10$  MPa;
- $R_H = 1,8E + 16$  Pa · s/m<sup>3</sup> (co odpowiada przepływowi 10cm<sup>3</sup> w czasie 30 minut przy różnicy ciśnień 10 MPa).

Wyniki obliczeń przedstawiono graficznie na rys. 10, przy czym dla porównania pokazano przebiegi otrzymane dla zmiennego modułu sprężystości objętościowej oraz stałych wartości, równych odpowiednio  $B_0$  i  $B_1$ .

Jak łatwo zauważyć, wyniki przykładu liczbowego charakteryzują się:

- niewielkimi różnicami pomiędzy przebiegami ciśnienia, co jest spowodowane zbliżonymi wartościami modułów sprężystości objętościowej w analizowanym zakresie ciśnień;
- zbliżonym do prostoliniowego kształtem przebiegu ciśnienia otrzymanego dla zmiennego modułu sprężystości objętościowej na wykresie z logarytmiczną podziałką osi ciśnień (co oznacza niemal wykładniczy spadek ciśnienia).

Aby wyjaśnić kształt przebiegów z rys. 5–10, postanowiono przyjąć w obliczeniach większy zakres zmienności modułu sprężystości objętościowej cieczy. Duże zmiany wartości modułu sprężystości objętościowej cieczy obserwuje się w przypadku jej zapowietrzenia, nawet nieznacznego (patrz [4]).

Przykładowo, przyjmując 0,15% zapowietrzenie cieczy hydraulicznej, za [4] można w zakresie ciśnień 0,5–10 MPa przyjąć:

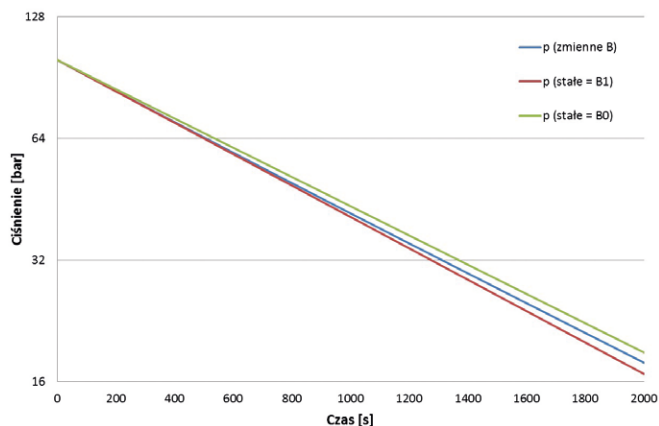
- $B_0 = 300$  MPa;
- $B_1 = 1600$  MPa.

Natomiast zakładając aż 5% zapowietrzenie, wg [5] w zakresie ciśnień 0,1–10 MPa można założyć:

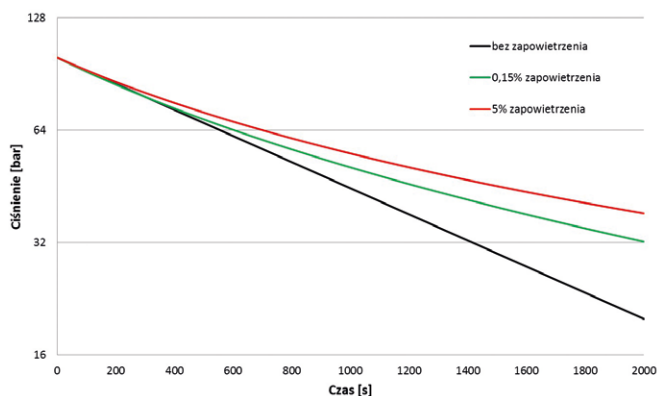
- $B_0 = 0,1$  MPa;
- $B_1 = 1450$  MPa.

Dla tak zmodyfikowanych danych obliczone przebiegi ciśnień pokazano na rys. 11.

Z przedstawionych na rys. 11 przebiegów jednoznacznie wynika, że nawet niewielkie zapowietrzenie cieczy hydraulicznej może być przyczyną niewykładniczego przebiegu ciśnienia cieczy zamkniętej w nieszczelnej komorze.



Rys. 10. Obliczone dla przykładu liczbowego przebiegi ciśnienia



Rys. 11. Przebieg ciśnienia wyznaczony dla cieczy hydraulicznej z zapowietrzeniem i bez

### Możliwości wykorzystania metody

Przedstawiona metoda może być wykorzystana nie tylko do prostego testowania szczelności zaworów hydraulicznych. Znacznie ciekawsze wydaje się to, że umożliwia ona również wyznaczanie:

- stycznego modułu sprężystości objętościowej cieczy dla wybranej wartości ciśnienia;
- wpływu sztywności ścianek komory zamykającej ciecz na moduł sprężystości objętościowej cieczy.

W zakresie ciśnień nieprzekraczających ok. 10 MPa można również podjąć próbę wykorzystania metody do oszacowania stopnia zapowietrzenia cieczy hydraulicznych.

Wyżej wymienione zastosowania wymagają jednak użycia zaworu (zaworów) o znanym oporze hydraulicznym.

Przykład opracowania wyników z rys. 9.

Założono, że przy małych zmianach ciśnienia występujących w czasie od  $t_0 = 0$  s do  $t_1 = 20$  s można przyjąć stałą wartość modułu sprężystości objętościowej. Jednocześnie wyznaczone w tym przedziale czasowym proste regresji mogą wystarczająco dokładnie przybliżać styczne w punkcie  $t_0$ .

Ogólne równanie stycznej dla zależności (7) w punkcie  $A (t_A, p_A)$  można opisać wzorem:

$$p = \frac{-p_0}{R_H C_H} \cdot e^{\frac{-t_A}{R_H C_H}} (t - t_A) + p_0 \cdot e^{\frac{-t_A}{R_H C_H}} \quad (19)$$

Dla czasu  $t_A = 0$  zależność (19) sprowadza się do:

$$p = \frac{-p_0}{R_H C_H} \cdot t + p_0 \quad (20)$$

Podstawiając w miejsce pojemności hydraulicznej  $C_H$  zależność (3), otrzymano:

$$p = \frac{-p_0 \cdot B}{R_H \cdot V_0} \cdot t + p_0 \quad (21)$$

Stosując do testów przy stałej wartości ciśnienia  $p_0$  ten sam zawór (zawory), można przyjąć stałą wartość oporu hydraulicznego  $R_H$  i stąd dla ilorazu współczynników kierunkowych prostych regresji można przyjąć zależność:

$$\frac{a_I}{a_{II}} = \frac{-p_0 \cdot B_I}{R_H \cdot V_I} \cdot \frac{-R_H \cdot V_{II}}{p_0 \cdot B_{II}} = \frac{V_{II} \cdot B_I}{V_I \cdot B_{II}} \quad (22)$$

$$\frac{B_{II}}{B_I} = \frac{a_{II} \cdot V_{II}}{a_I \cdot V_I}$$

Należy zauważyć, że wartości modułów sprężystości cieczy wyznaczone eksperymentalnie są zawsze wartościami zastępczych modułów sprężystości objętościowej, obejmującymi również wpływ odkształceń sprężystych naczyń, w których zamknięto cieczę podczas testów.

Tabela 2. Stosunki zastępczych modułów sprężystości cieczy HM46

	Objętość komory [cm <sup>3</sup> ]	Współczynnik kierunkowy prostej regresji w przedziale 0-20 s	Względna objętość komory	Względny współczynnik kierunkowy	Względny moduł sprężystości objętościowej
1 wąż 1SC DN8	73	-0,16156	1	1	1
2 węże 1SC DN8	133	-0,08552	1,83	0,529	0,97
Kolektor stalowy	53	-0,12021	0,73	0,744	0,55

Korzystając z zależności (22) oraz znajomości objętości komór wypełnionych cieczą, wyznaczono stosunki zastępczych modułów sprężystości oleju HM46 zamkniętego w węzłach elastycznych i kolektorze stalowym zaworami dławiącymi DV-06 dla ciśnienia  $p_0$  wynoszącego 10 MPa (rys. 9). Wartości liczbowe porównania wyznaczone dla ciśnienia początkowego  $p_0$  10 MPa i siecznej w przedziale czasu od 0 s do 20 s zamieszczono w tabeli 2. Wartości względne odniesiono do przypadku komory w postaci jednego węzła elastycznego 1SC DN8.

Wyniki zamieszczone w tabeli 2 wydają się być niejednoznaczne. Z jednej strony potwierdzają ogólnie znany fakt, że długość przewodu nie ma wpływu na wartość zastępczego modułu sprężystości objętościowej zamkniętej w nim cieczy. Z drugiej strony otrzymano drastycznie niski zastępczy moduł sprężystości objętościowej cieczy HM46 zawartej w kolektorze stalowym w porównaniu z tą samą cieczą zamkniętą w jednoplotowym węźle elastycznym. Zdaniem autora niska wartość zastępczego modułu sprężystości objętościowej cieczy HM46 zawartej w kolektorze stalowym wynika z większego jej zapowietrzenia. Z uwagi na bardziej złożoną geometrię kanałów wykonanych w kolektorze stalowym był on trudniejszy do odpowietrzenia przyjętą procedurą przepłukiwania komory przed realizacją pomiaru.

### Podsumowanie

Przedstawione w artykule rozważania teoretyczne oraz wyniki badań eksperymentalnych mogą być wykorzystane praktycznie do:

- szybkiego badania zależności modułu sprężystości objętościowej cieczy w zależności od ciśnienia;
- szybkiego badania wpływu materiału i postaci komory na zastępczy moduł sprężystości objętościowej zamkniętej w niej cieczy, np. w celu porównania różnych przewodów hydraulicznych;
- oszacowania stopnia zapowietrzenia cieczy hydraulicznej.


Poza tym, tak jak to przedstawiono w [1], można je wykorzystać do oceny przecieków w zaworach hydraulicznych.

Należy podkreślić prostotę realizacji testów eksperymentalnych wymagają one jedynie rejestracji przebiegu ciśnienia w komorze zawierającej ciecz. Jako pewną wadę metody należy uznać konieczność utrzymywania stałej temperatury: cieczy, ścianek komory (przewodów) i zaworów zamykających komorę. Należy również dodać, że przedstawione wyniki badań eksperymentalnych stanowią dopiero wstępną próbę zbadania omawianego zjawiska. W ramach dalszych prac podjęte zostaną próby dla innych przewodów (rury stalowe bez szwu, węże dwuoplotowe i inne). Niezbędne będzie również podjęcie próby niezależnego od wymienionej metody sposobu wyznaczania stopnia zapowietrzenia cieczy hydraulicznej.

W następnej kolejności należy podjąć prace nad utworzeniem modelu zjawiska przecieków dla zapowietrzonej cieczy w dowolnym przedziale ciśnień.

### Literatura

- [1] ZASTEMPOWSKI B., DOMANOWSKI P.: *Pośrednia metoda pomiaru mikroprzecieków w zaworach hydraulicznych*. „Inżynieria i Aparatura Chemiczna” 3/2011.
- [2] KUDŹMA Z.: *Tłumienie pulsacji ciśnienia i hałasu w układach hydraulicznych w stanach przejściowych i ustalonych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [3] YANG SHUDONG, TAO AIHUA, LUO YULIN, ZHANG JUNXIANG, ZHOU PENG, ZHOU LIN: *Experimental measurements of bulk modulus for two types of hydraulic oil at pressures to 140 MPa and temperatures to 180°C*. Proceedings of 10th International Fluid Power Conference, Dresden 2016.
- [4] SAYAKO SAKAMA, YUTAKA TANAKA, HIROYUKI GOTO: *Mathematical model for bulk modulus of hydraulic oil containing air bubbles*. „Mechanical Engineering Journal” Vol. 2, No. 6, 2015.
- [5] STRYCZEK S.: *Napęd hydrostatyczny. Tom 1. Elementy*. WNT, Warszawa 1990.

 Klaudiusz Klarecki – Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Politechnika Śląska

reklama



Preferujesz internet?

Wypromuj się na [www.nis.com.pl](http://www.nis.com.pl)