

WYBRANE ELEMENTY DIAGNOSTYKI SZCZELNOŚCI PŁYNOWYCH KONSTRUKCYJNIE ZAMKNIĘTYCH W PRZESTRZENIACH ROBOCZYCH

Szymon SALAMON

Katedra Systemów Technicznych i Zarządzania, Politechnika Częstochowska
Al. Armii Krajowej 19 B, 42-200 Częstochowa, salamon@zim.pcz.czest.pl

Streszczenie

Artykuł prezentuje podstawowe pojęcia związane z utratą szczelności płynowych konstrukcyjnie zamkniętych przestrzeni roboczych. Przedstawiono rodzaje nieszczelności: rzeczywistej i pozornej, zewnętrznej i wewnętrznej, pneumatycznej i hydraulicznej. Fizyczne podstawy zjawiska nieszczelności obiektów mechanicznych w szczególności dotyczą: rodzajów przepływów gazowych przez nieszczelności (wprowadzono pojęcie liczby *Knudsen* oraz warunków: lepkich, molekularnych i pośrednich) jak również rodzajów przepływów cieczowych (liczba *Reynoldsa*, przepływ laminarny i burzliwy, model przepływu *Hagena - Poiseuille'a*). Rozważano uwarunkowania badań szczelności obiektów mechanicznych.

Słowa kluczowe: diagnostyka szczelności, fizyczne podstawy zjawiska nieszczelności.

SELECTED ELEMENTS OF LEAK-TIGHTNESS DIAGNOSTICS OF FLUID WORKING VOLUMES CONFINED BY DESIGN

Summary

This article presents some basic concepts connected with loss of leak-tightness in fluid working volumes confined by design. It describes: actual and apparent, external and internal, and pneumatic and hydraulic leak models. In particular, the physical background of the phenomenon of mechanical objects' leaks pertains to: types of gas flow through leaks (the notions of the *Knudsen* number and of viscose, molecular and intermediate conditions were introduced), as well as fluid flow types (the *Reynolds* number, laminar and turbulent flow types, and the *Hagen-Poiseuille* flow model). Various considerations of studying mechanical objects' leak-tightness were encompassed.

Keywords: leak-tightness diagnostics, physical background of phenomenon of mechanical objects' leaks.

1. RODZAJE NIESZCZELNOŚCI PŁYNOWYCH KONSTRUKCYJNIE ZAMKNIĘTYCH PRZESTRZENI ROBOCZYCH

1.1. Nieszczelność rzeczywista i pozorna

W każdym obiekcie mechanicznym w czasie jego wytwarzania, montażu czy eksploatacji występują określone nieciągłości materiałowe, niedoskonałości wykonania, wreszcie defekty ograniczające czy wręcz eliminujące obiekt z dalszej eksploatacji. Te nieciągłości, niedoskonałości i defekty powodujące przecieki medium roboczego, określa się jako *nieszczelności rzeczywiste* [3]. W badaniu szczelności obiektów funkcjonuje również pojęcie *nieszczelności pozornej*, określanej, jako powolne uwalnianie się cząstek gazu zaabsorbowanych i zaadsorbowanych przez materiały stykające się z czynną objętością badanego obiektu. Warto zaznaczyć, że *nieszczelność* to otwór, porowatość, przepuszczalność elementu lub struktura ścianki obiektu pozwalające na przepływ płynu poprzez ściankę w wyniku istniejącej różnicy ciśnień lub

stężeń na obu stronach ścianki obiektu, zaś *przeciek* to przepływ płynu poprzez nieszczelności. Oba wyżej wymienione rodzaje nieszczelności mogą występować jednocześnie.

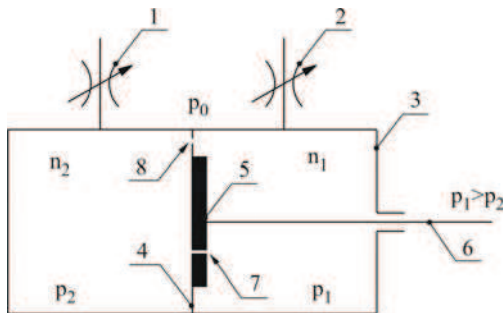
Nieszczelności rzeczywiste można podzielić na przewodnościowe i przenikalnościowe [4].

1.2. Nieszczelność wewnętrzna i zewnętrzna [6]

Nieszczelność wewnętrzna, oznacza przeciek gazu (powietrza) między komorami roboczymi, gdy przesłona między komorami zamknięta jest tłokiem (rys. 1).

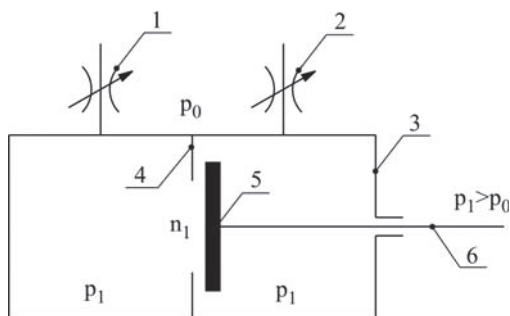
W komorach znajdują się różne ilości powietrza $n_1 \neq n_2$ (wyrażone w kilomołach) pod różnymi ciśnieniami. Jeżeli w tym elemencie, przesłona lub tłoczek posiadają wadę materiałową w postaci np. kapilarnego kanalika lub uszczelnienie między tłokiem i przesłoną jest niesprawne, wówczas powietrze z komory o wyższym ciśnieniu (prawa komora) przecieka do komory o niższym ciśnieniu (lewa komora). Jeżeli obiekt pneumatyczny posiada zamknięte zawory odcinające 1 i 2, wówczas przeciek między komorami istnieje do czasu

wyrównania się ciśnień w obu komorach, tzn. do czasu spełnienia warunku: $p_1 = p_2$.



Rys. 1. Model elementu pneumatycznego z nieszczelnością wewnętrzną, gdzie: 1 i 2 – zawory dławiące nastawne, 3 – komora pneumatyczna, 4 – przesłona komory, 5 – tłok, 6 – tłoczyso, 7 – mikronieciągłość tłoka, 8 – mikronieciągłość przesłony

Nieszczelność zewnętrzna, oznacza przeciek gazu z komory roboczej (lub z obu komór) do otoczenia. Można to zobrazować, jak na rysunku 2.



Rys. 2. Model elementu pneumatycznego z nieszczelnością zewnętrzną, gdzie: 1 i 2 – zawory dławiące nastawne, 3 – komora pneumatyczna, 4 – przesłona komory, 5 – tłok, 6 – tłoczyso

Przy otwartej przesłonie pomiędzy komorami n_1 kilonoli powietrza przy ciśnieniu p_1 wypełnia obie komory robocze. Ciśnienie p_1 jest nadciśnieniem w stosunku do ciśnienia otoczenia p_0 . Jeżeli zawory odcinające 1 i 2 są zamknięte a korpus obiektu pneumatycznego jest nieszczelny (mikronieciągłości i mikroszczeliny), wówczas następuje przeciek powietrza z komór roboczych do otoczenia. Przeciek ten trwa do momentu aż ciśnienie wewnątrz komór zrównoważy się z ciśnieniem otoczenia, tzn.: $p_1 = p_0$.

1.3. Szczelność pneumatyczna i hydrauliczna [3]

Szczelność pneumatyczna, to stan techniczny obiektu mechanicznego, polegający w szczególności na generowaniu symptomu diagnostycznego przez obiekt, w postaci przecieku pneumatycznego czynnika testującego (najczęściej powietrza), w określonych warunkach badania jego szczelności, najczęściej poprzez podanie: ciśnienia czynnika testującego i jego objętościowego natężenia przecieku.

Szczelność hydrauliczna, to stan techniczny obiektu mechanicznego, polegający w szczególności, na generowaniu symptomu diagnostycznego przez obiekt, w postaci przecieku czynnika testującego (najczęściej oleju pochodzenia mineralnego), w określonych warunkach badania jego szczelności, najczęściej poprzez podanie: wartości ciśnienia testującego i czasu trwania tego badania.

2. FIZYCZNE PODSTAWY NIESZCZELNOŚCI OBIEKTÓW MECHANICZNYCH

2.1. Rodzaje przepływów gazowych

Wyróżnia się [2], trzy charakterystyczne stosunki tych wielkości, określonych *liczbą Knudsen*. Wyraża ona stosunek miarodajnego w danych warunkach rozmiaru X wyodrębnionego obszaru pneumatycznego (np. średnicy przewodu, długości komory itd.), do średniej drogi swobodnej λ_0 , tj.:

$$K = \frac{X}{\lambda_0} \quad (1)$$

Jeżeli $K \gg 1$ to zachodzą *warunki gazu lepkie*, co oznacza, że $\lambda_0 \gg X$, cząsteczki gazu biorą udział w zjawisku fizycznym polegającym, na wzajemnym zderzaniu się, tzn. przekazywaniu energii ruchu, która odbywa się prawie wyłącznie między najbliższymi cząsteczkami.

Jeżeli $K \ll 1$ to zachodzą *warunki gazu molekularne*, co oznacza, że $\lambda_0 \ll X$, cząsteczki gazu biorą udział w zjawisku fizycznym polegającym, na zderzaniu się cząsteczek ze ściankami lub innymi powierzchniami znajdującymi się w wyodrębnionym obszarze pneumatycznym.

Jeżeli $K \approx 1$ to zachodzą *warunki gazu pośrednie*, co oznacza, że $\lambda_0 \approx X$, cząsteczki gazu biorą udział w zjawiskach, polegających zarówno na wzajemnym zderzaniu się jak zderzaniu się ze ściankami obiektu, z równym prawdopodobieństwem.

2.2. Rodzaje przepływów ciekowych

Jeżeli mamy do czynienia z przepływem w rurze o przekroju kołowym, to rozkład prędkości określony przez scałkowanie równania *Naviera - Stokesa* i związek między strumieniem objętości i różnicą ciśnień określony prawem *Hagena - Poiseuilla* mają zastosowanie tylko do przepływów charakteryzowanych liczbą Reynoldsa mniejszą od pewnej jej krytycznej wartości [1]:

$$Re_{kr} = V_{sr} D_h / \nu \approx 2340 \quad (2)$$

gdzie: V_{sr} – średnia prędkość przepływu;

ν – kinematyczny współczynnik lepkości;

D_h – średnica hydrauliczna.

Biąc pod uwagę krytyczną wartość liczby *Reynoldsa*, rozróżnia się zasadniczo dwa rodzaje przepływów ciekowych: *laminarny (uwarstwiony)*

i burzliwy (*turbulentny*), czasem wyróżnia się jeszcze przepływy pośrednie, dla których dwa rodzaje przepływów wcześniej wymienionych, są przepływami granicznymi. Ważnym pojęciem jest zatem liczba *Reynoldsa*. Jeżeli liczba *Reynoldsa* jest mniejsza od krytycznej liczby *Reynoldsa* Re_{kr} ($Re < Re_{kr}$), to w układzie występuje przepływ laminarny. Jeżeli liczba *Reynoldsa* jest większa od krytycznej liczby *Reynoldsa* Re_{kr} ($Re > Re_{kr}$), to w układzie występuje przepływ burzliwy. Warto zaznaczyć, że te dwa rodzaje przepływów, wyróżnionych dla przepływu cieczy, wyróżnia się również dla przepływu gazu w warunkach lepkich.

3. UWARUNKOWANIA W BADANIU SZCZELNOŚCI OBIEKTÓW PNEUMATYCZNYCH

3.1. Zakłócenia wynikające ze zmian temperatury czynnika testującego

Z ogólnego równania stanu gazu $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ można wyznaczyć teoretyczny wpływ zmiany temperatury na wynik pomiaru. Z tego równania dla określenia pozornych strat w objętości powietrza można wyprowadzić zależność, będącą funkcją zmian temperatury powietrza w tej kontrolowanej objętości.

Ostatecznie, po przekształceniach [6] wyrażenie opisujące zależnością matematyczną, wpływ temperatury na zmianę kontrolowanej objętości, można otrzymać w postaci:

$$V_{poz.}^T = \Delta V = \frac{p_k V}{\rho R T} \left(1 - \frac{T}{T + \Delta T} \right) \quad (3)$$

gdzie: $V_{poz.}^T$ – pozorna strata objętości powietrza, uchodząca przez nieszczelność (jako wynik zmiany temperatury powietrza w badanej przestrzeni w fazie pomiaru);

p_k – ciśnienie kontrolne,

V – badana objętość,

ρ – właściwa gęstość powietrza,

R – uniwersalna stała gazowa,

T – temperatura powietrza kontrolnego,

ΔT – zmiana temperatury powietrza w badanej objętości podczas fazy pomiaru.

Jeżeli [5] np. całkowita ilość powietrza w badanej objętości równej 1 l zmieni temperaturę o 0,1C przy (założonym) nadciśnieniu badawczym równym 1 bar, wyjściowej temperaturze powietrza równej 20C i czasie trwania pomiaru równym 10s, to zgodnie z powyższym równaniem pozorna nieszczelności wyniesie 4,06 cm³/min. Niniejszy wynik uzyskano przy danych jak wyżej oraz przy założeniu, że $R = 286,99$ J/kg K, $\rho = 1,205$ kg/m³ i ciśnieniu bezwzględny równym (1 bar + 1013,25 hPa). Przykład ten jest wprawdzie teoretyczny i w tej postaci raczej w praktyce nie występuje, pozwala jednak na uzmysłowienie skali wpływu temperatury na wynik pomiaru wielkości przecieku i stanowi przesłankę do utrzymywania

stabilnej temperatury wszystkich elementów układu pomiarowego.

3.2. Zakłócenia wynikające ze zmian objętości badanego obiektu

Zmiana objętości badanej przestrzeni roboczej w czasie pomiaru może albo skompensować przeciek albo ją wykazać mimo jej braku. Zależność pozornej zmiany przecieku od zmiany objętości można także wyprowadzić z ogólnego równania stanu gazu, a mianowicie: zakłócenia wynikające ze zmian objętości kontrolowanego obszaru pneumatycznego, tj. konstrukcyjnie zamkniętej przestrzeni roboczej, rozpatrzono przy założeniu, że: $p = const$ i $T = const$. Pamiętając, że $m = pV/RT$ i $\Delta V = \Delta m/\rho$ i po przekształceniach [6] można otrzymać wyrażenie na zakłócenia w objętości badanego obszaru pneumatycznego, jako efektu odkształceń jego elementów:

$$V_{poz.}^V = \Delta V = \frac{p_k V}{\rho R T} \left(1 - \frac{V}{V + \Delta V} \right) \quad (4)$$

gdzie: $V_{poz.}^V$ – zmiana objętości kontrolowanej przestrzeni w fazie pomiaru (inne oznaczenia jak we wzorze wyżej).

Zależność wykorzystano do wykonania niżej przytoczonych obliczeń. Przyjęto [5], że wymieniony w punkcie 3.1 badany obiekt posiada konieczny do uszczelnienia otwór o średnicy 50 mm, zakładając, że uszczelniający ten otwór korek przemieści się w fazie pomiaru o 0,1mm, (co daje zmianę objętości $\Delta V = 1,96 \times 10^{-7}$ m³), co powoduje teoretyczny przeciek powietrza równy 2,3 cm³/min. Przy nadciśnieniu równym 3 bar wartość ta wzrasta do 4,7 cm³/min. Przytoczone obliczenia wykonano przy pozostałych danych jak we wcześniejszych obliczeniach dla wpływu temperatury na zmianę objętości.

LITERATURA

- [1] Bukowski J., Kijkowski P.: *Kurs mechaniki płynów*. PWN, Warszawa 1980.
- [2] Groszkowski J.: *Technika wysokiej próżni*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1972.
- [3] Groszkowski J.: *Zagadnienia próżni w nauce, technice i przemyśle*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983.
- [4] Hlebowicz J.: *Badanie szczelności. Poradnik*. Wydawnictwo: Biuro Gamma, Warszawa 1996.
- [5] Meurer K. H.: *Automatisches Lecktesten mit Luft*. J. W. Frochlich Testtechnik. Sonderdruck aus Technische Uberwachung 1982, 23, 2.
- [6] Salamon S.: *Diagnostyka szczelności płynowych konstrukcyjnie zamkniętych przestrzeni roboczych*. Seria Mechanika, Monografia 333. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.



dr hab. inż. **Szymon SALAMON**. Kierownik Katedry Systemów Technicznych i Zarządzania. Autor monografii, pt.: „*Diagnostyka szczelności płynowych konstrukcyjnie zamkniętych przestrzeni roboczych*”. Współautor książki, pt.: „*Efektywność Eksploatacji maszyn i urządzeń*”. Autor ponad 130 publikacji krajowych i zagranicznych z zakresu budowy i eksploatacji maszyn.