

INSTYTUT
TECHNOLOGII
MATERIAŁÓW
ELEKTRONICZNYCH

PRACE ITME

HELOWE WYKRYWACZE NIESZCZELNOŚCI

BUDOWA I ZASTOSOWANIE

1986

Zeszyt 17

**INSTYTUT TECHNOLOGII
MATERIAŁÓW ELEKTRONICZNYCH**

**Andrzej TACZANOWSKI
Jerzy MARKS**

HELOWE WYKRYWACZE NIESZCZELNOŚCI

BUDOWA I ZASTOSOWANIE

Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego WEMA

<http://rcin.org.pl>

Redaktor naczelny **PRAC ITME**: dr inż. **MIECZYŚLAW FRĄCKI**
Sekretarz redakcji: dr inż. **ŁUKASZ KACZYŃSKI**

Adres redakcji:

ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa

PL ISSN 0209-0066

Od redakcji

Doc. dr Andrzej Taczanowski jest pracownikiem Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, a doc. dr Jerzy Marks – Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Elektroniki Próżniowej w Warszawie.

WEMA – Warszawa 1986 – 300 + 50 – 159/86 K – 193/86 – P-48

<http://rcin.org.pl>

Andrzej TACZANOWSKI, Jerzy MARKS - "Helowe wykrywacze nieszczelności"

Brak w krajowej literaturze zbiorczego materiału poświęconego metodzie wykrywania nieszczelności za pomocą helowych wykrywaczy nieszczelności /HWN/ oraz fakt stosunkowo częstego stosowania tych przyrządów skłonił autorów do opracowania artykułu. Przedstawiono w nim podstawowe definicje związane z przepływem gazu przez nieszczelności oraz opisano zasadę pracy HWN. Opisano różne wersje tych wykrywaczy służące do wykrywania nieszczelności różnymi metodami. Szczególną uwagę zwrócono na kontrolę hermetyczności podzespołów elektronicznych.

Andrzej TACZANOWSKI, Jerzy MARKS - "Helium leak detectors"

This article was needed as well because our home literature does not offer any summary material describing the method of leak detection by means of the helium leak detector /HLD/ as for the fact that these instruments are widely used. Basic definitions related to gas flow through the leaks are given and the HLD operation principle is presented. Various versions of the leak detectors, resulting from various methods of leak detection are described. Special attention is paid to the air-tight control of the electronic sub-assemblies.

Андрей ТАЧАНОВСКИ, Ежи МАРКС - "Гелиевые течеискатели"

Необходимость написания статьи вызвана отсутствием в отечественной литературе сборного материала, посвященного методу обнаруживания течи при помощи гелиевых течеискателей /ГТИ/, а также фактом довольно широкого применения этих приборов.

Представлено в ней основные дефиниции связанные с течением газа через неплотности, а также описано принцип работы ГТИ. Описано тоже разные варианты этих течеискателей, вытекающие из разных методов обнаруживания течи. Особенное внимание обращено на контроль герметичности электронных узлов.

Wykrywanie nieszczelności stało się często stosowaną operacją w różnych dziedzinach współczesnej techniki. Brak aktualnej literatury na ten temat w Polsce i obserwowane przez autorów trudności na jakie natrafia się w stosowaniu i interpretacji wyników pomiarów, skłoniły ich do zebrania podstawowych informacji teoretycznych i praktycznych.

Autorzy mają nadzieję, że zebrany materiał pomoże użytkownikom helowych wykrywaczy nieszczelności we właściwym ich stosowaniu oraz we właściwej interpretacji uzyskanych wyników pomiarów.

1. WSTĘP

Nieszczelnością nazywa się kanał, szczelinę, obszar porowaty względnie przenikalny dla gazu /lub cieczy/, istniejące w ściance obudowy określonego obiektu. Nieszczelność powoduje wskrośny przepływ gazu przez ściankę na skutek różnicy ciśnień lub koncentracji panujących po obydwu jej stronach.

Od wielu obiektów, urządzeń czy podzespołów będących przedmiotem zainteresowania różnych dziedzin techniki i nauki wymaga się, aby były one hermetyczne. Hermetyczność w przypadku obiektów próżniowych określa się jako próżnioszczelność.

Wielkość nieszczelności jest charakteryzowana natężeniem przepływu gazu przez tę nieszczelność i nosi nazwę natężenia nieszczelności.

Wprowadzenie systemu jednostek SI spowodowało, że dla określania natężenia nieszczelności jest stosowana jednostka $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$, chociaż jeszcze bardzo często używa się $\text{atm}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$, $\text{mbar}\cdot\text{l}/\text{s}$ lub $\text{Tr}\cdot\text{l}/\text{s}$. Są to jednostki, w których są często cechowane urządzenia do wykrywania nieszczelności, dlatego też autorzy zdecydowali się pozostawić je w niniejszym artykule, a dla ułatwienia przeliczeń podali tabelę 1.

Do pomiaru i /lub/ zlokalizowania nieszczelności są stosowane różne metody i urządzenia.

Tabela 1. Podstawowe jednostki stosowane do określania natężenia nieszczelności

Równoważnik Pomiar	atm·cm ³ /s	Pa·m ³ /s	mbar·l/s	Tr·l/s
atm·cm ³ /s	1	0,1	1	0,76
Pa·m ³ /s	10	1	10	7,5
mbar·l/s	1	0,1	1	0,76
Tr·l/s	1,3	0,13	1,3	1

Minimalne natężenie nieszczelności jakie dane urządzenie /lub metoda/ pozwala zmierzyć, często nosi nazwę czułości metody.

Maksymalne natężenie nieszczelności powyżej którego cechy lub parametry eksploatacyjne obiektu mogą ulec zmianie, nosi nazwę granicznego lub dopuszczalnego natężenia nieszczelności.

Do niedawna tylko od obiektów próżniowych /urządzenia i podzespoły próżniowe oraz lampy elektronowe/ wymagano dopuszczalnych natężeń nieszczelności mniejszych niż 10^{-6} Pa·m³/s. Później wymaganie to dotyczyło coraz większej liczby produktów i obiektów będących przedmiotem zainteresowania różnych dziedzin techniki /np. hermetyzowane podzespoły elektroniczne, urządzenia techniki jądrowej, zbiorniki na ciekłe gazy, podzespoły automatyki hydraulicznej i pneumatycznej/. Stworzyło to konieczność opracowania metod kontroli szczelności charakteryzujących się dużymi czułościami.

Spośród tych metod najczulsza jest metoda wykorzystująca spektrometry masowe, które umożliwiają wykrycie określonego rodzaju substancji próbnej /zwykle gazu/ przepływającej przez nieszczelność. Najpowszechniej metoda ta jest realizowana w helowych wykrywaczach nieszczelności /HWN/.

2. PRZEPŁYW GAZU PRZEZ NIESZCZELNOŚCI

Nieszczelność występująca w postaci kanalika lub szczeliny i umożliwiająca swobodny przepływ gazu na skutek różnicy ciśnień lub koncentracji może być nazwana nieszczelnością przewodnościową /kanalikową/. Przyczyną jest zwykle określony defekt mechaniczny powstały w czasie wykonywania obiektu.

Istnieje również inny typ nieszczelności, w którym wskrośny przepływ gazu przez ściankę obudowy następuje na skutek przenikania. Nieszczelność taką można nazwać nieszczelnością przenikalnościową. Znany jest cały szereg materiałów, które są przenikalne dla określo-

nych gazów, np. kwarc i niektóre szkła są przenikalne dla helu, srebro dla tlenu, tworzywa sztuczne dla gazów atmosferycznych. Przepływ molekuł gazu przez nieszczelność przenikalnościową jest wynikiem określonych procesów jednostkowych, takich jak: adsorpcja, dyfuzja i desorpcja gazu w materiale ścianki.

2.1. Nieszczelność przewodnościowa

Ilość gazu przepływająca w jednostce czasu przez nieszczelność przewodnościową /natężenie nieszczelności/ wynosi

$$I = F \cdot \Delta p \quad /1/$$

gdzie:

F - przewodność nieszczelności,

Δp - różnica ciśnień po obydwu stronach nieszczelności.

Z teorii przepływu gazu przez przewody wiadomo, że przewodność F zależy od rodzaju przepływu. Przepływ ten może odbywać się w warunkach molekularnych, lepkich i pośrednich.

Warunki przepływu molekularnego występują wówczas, gdy średnia droga swobodna cząsteczki gazu jest znacznie większa niż średnica kanału /nieszczelności/. O przepływie gazu decydują zderzenia cząsteczek gazu ze ścianką kanału.

Warunki przepływu lepkiego występują wówczas, gdy średnia droga swobodna jest mniejsza od rozmiarów średnicy kanału. O przepływie gazu decydują zderzenia między cząsteczkami gazu i występujący proces tarcia wewnętrznego między nimi, charakteryzowany lepkością gazu.

Przepływ, w którym średnia droga swobodna cząsteczek gazu jest zbliżona do średnicy kanału, nosi nazwę przepływu w warunkach pośrednich.

W warunkach molekularnych przewodność przewodu o długości l i średnicy d /gdy $l \gg d$ / wynosi

$$F_M = 9,63 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{d^3}{l} \quad /2/$$

gdzie:

F wyraża się w m^3/s , T w kelwinach, M w $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ zaś d i l w metrach.

W warunkach lepkich przewodność takiego przewodu może być opisana równaniem Poiseuilla:

$$F_L = 3,27 \cdot 10^{-2} \frac{d^4}{\eta L} \frac{p_1 + p_2}{2} \quad /3/$$

gdzie:

F wyraża się w dm^3/s , d i l w cm, p_1 i p_2 w torach^{xx}/ zaś η /współczynnik lepkości gazu/ w puazach^{xx}.

Dla warunków pośrednich równanie do obliczenia F ma charakter bardziej skomplikowany: do równania Poiseuille'a jest dodany współczynnik korekcyjny zależny od d , l oraz ciśnienia gazu, jego rodzaju i temperatury.

W praktyce warunki przepływu molekularnego występują wtedy, gdy natężenie nieszczelności jest mniejsze od $10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ / $10^{-4} \text{ atm}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$. W wykrywaniu nieszczelności celowe jest rozpatrzenie wpływu temperatury na natężenie przepływu gazu przez nieszczelność przewodnościową.

Z równania /2/ wynika, że natężenie przepływu gazu w warunkach molekularnych jest wprost proporcjonalne do \sqrt{T} . Wzrost temperatury materiału, w którym istnieje nieszczelność, powoduje również zmianę wymiarów przewodu na skutek rozszerzalności cieplnej. Można wykazać bez trudu, że dla powszechnie stosowanych materiałów wpływ ten jest praktycznie bez znaczenia, nawet gdy temperatura materiału wzrosła o kilkaset stopni.

W przypadku przepływu lepkiego jak również przepływu pośredniego wpływ temperatury na natężenie przepływu zależy od wzrostu współczynnika lepkości gazu. W zależności od rodzaju gazu wzrost ten jest proporcjonalny do $T^{-2/3}$ \rightarrow $T^{-1/2}$.

2.2. Nieszczelność przenikalnościowa

Natężenie przepływu gazu /w warunkach stacjonarnych/ na skutek procesu przenikania przez przegrodę z ciała stałego może być opisane równaniem

$$J = Dr \frac{p_1^u - p_2^u}{L} \quad /4/$$

gdzie:

D - współczynnik dyfuzji gazu w przegrodzie,

r - współczynnik rozpuszczania,

p_1, p_2 - ciśnienia gazu po obydwu stronach przegrody [Pa],

L - grubość przegrody [cm],

u - współczynnik zależny od rodzaju gazu i materiału przegrody, wskazujący czy procesowi przenikania towarzyszy dysocjacja molekuł gazu / $u = 1/2$ / lub nie / $u = 1$ /.

Iloczyn Dr nosi nazwę współczynnika przenikalności J_0 i wyraża ilość gazu przenikającego przez powierzchnię 1 cm^2 ściany o grubości 1 cm , pod wpływem jednostkowej różnicy ciśnień, w ciągu 1 sekundy.

x/ $1 \text{ Tr} \approx 133,3 \text{ Pa}$ /przeliczenie dotyczy całego artykułu/

xx/ $1 \text{ P} = 10^{-1} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ /przeliczenie dotyczy całego artykułu/

Zależność współczynnika przenikalności gazu J_0 od temperatury jest opisywana równaniem

$$J_0 = J_0^0 \exp\left[-\frac{\Delta E_p}{RT}\right] \quad /5/$$

gdzie:

J_0^0 - stała przenikalności,
 ΔE_p - energia aktywacji procesu przenikania.

Równanie /4/ można napisać dla $u = 1$ i $p_1 \gg p_2$ w postaci

$$J = J_0^0 \exp\left[-\frac{\Delta E_p}{RT}\right] \frac{p}{L} \quad /6/$$

Z równania /6/ wynika, że dla danego ciśnienia gazu p i dla danej grubości ścianki L natężenie przepływu gazu przez nieszczelność przenikalnościową jest zależne od rodzaju gazu /stała przenikalności J_0^0 , energii aktywacji ΔE_p i temperatury T /.

2.3. Porównanie własności nieszczelności przewodnościowej i przenikalnościowej

W tabeli 2 zestawiono podstawowe własności obydwu typów nieszczelności.

Tabela 2. Podstawowe własności nieszczelności przewodnościowej i przenikalnościowej

Parametry	Nieszczelność	
	przewodnościowa	przenikalnościowa
Ciśnienie gazu	$\sim P$ lub P^2	$\sim P$ lub \sqrt{P}
Temperatura	$\sim \sqrt{T}$ $\sim T^{-3/2} + T^{-1/2}$	$\sim \exp[\Delta E_p/RT]$
Rodzaj gazu	$\sim \sqrt{M}$ $\sim D^{-1}$	selektywny
Czas ustalenia przepływu stacjonarnego	$< 0,1$ s/mm długości	< 100 s/mm długości

Z tabeli 2 wynika, że najbardziej charakterystycznymi parametrami umożliwiającymi rozróżnienie typu nieszczelności są temperatura i czas ustalania się przepływu stacjonarnego. Wpływ temperatury na natężenie nieszczelności przewodnościowej jest niewielki, zaś w przy-

padku nieszczelności przenikalnościowej może być znaczny. Również czasy ustalania się przepływu stacjonarnego znacznie się różnią.

3. METODY WYKRYWANIA NIESZCZELNOŚCI

W technice wykrywania i lokalizacji nieszczelności są stosowane różne metody. W tabeli 3 zestawiono metody wykrywania, które mają praktyczne zastosowanie.

Tabela 3. Metody wykrywania nieszczelności

Metody	Minimalne natężenie nieszczelności $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	Uwagi
Pęcherzyki powietrza w cieczy	10^{-5}	Łatwa lokalizacja
Spadek ciśnienia	$10^{-3} + 10^{-1}$	
Wyładowanie jarzeniowe	10^{-2}	
Metoda z zastosowaniem gazu próbnego: - chlorowcowe - amoniakalne - kryptonowe	10^{-6} 10^{-8} 10^{-11}	
Metoda z zastosowaniem spektrometru mas i gazu próbnego	10^{-10}	

Z tabeli 3 wynika, że metody wykrywania nieszczelności z wykorzystaniem gazu próbnego charakteryzują się dużą czułością i pozwalają na stosunkowo łatwą lokalizację nieszczelności.

Szczególną pozycję zajmuje jednak metoda z zastosowaniem spektrometru mas oraz helu jako gazu próbnego.

W związku z powszechnym jej stosowaniem zostanie ona szczegółowo omówiona w niniejszym opracowaniu.

3.1. Spektrometryczna metoda wykrywania nieszczelności

Metoda ta polega na tym, że obiekt poddawany badaniu szczelności jest podłączony bezpośrednio lub pośrednio do spektrometru mas, który reaguje na obecność tzw. gazu próbnego przechodzącego przez nieszczelność. Wskazania spektrometru mas są przy połączeniu bezpośrednim proporcjonalne do koncentracji tego gazu w głowicy spektrometru i tym

samym możliwe jest określenie wielkości natężenia nieszczelności w badanym obiekcie.

Techniczną realizację tej metody uzyskuje się w spektrometrycznych wykrywaczach nieszczelności. Zawierają one oprócz głowicy spektrometru mas i odpowiedniego układu zasilająco-pomiarowego układ pompowy wysokiej próżni zapewniający prawidłową pracę spektrometru mas.

Gaz próbny stosowany do wykrywania nieszczelności powinien spełniać następujące wymagania:

- duży współczynnik dyfuzji w powietrzu, ułatwiający w istotny sposób przepływ gazu przez nieszczelność,
- niewielka koncentracja gazu w powietrzu atmosferycznym,
- nie powinien być wiązany /np. sorbowany/ przez materiały stosowane do budowy obiektu,
- powinien być gazem, który nie występuje jako składnik gazów szkodliwych w układach próżniowych,
- powinien być gazem bezpiecznym.

Gazem, który spełnia większość tych wymagań, jest hel. Z tego właśnie względu produkowane obecnie spektrometryczne wykrywacze nieszczelności są przede wszystkim helowymi wykrywaczami nieszczelności /HWN/. W pewnych specjalnych przypadkach, gdy istnieją względy przemawiające za stosowaniem innego rodzaju gazu próbnego, wykrywacz może być uczulony na inny rodzaj gazu, np. H_2 , He^3 , Ne, Ar, lekkie węglowodory.

3.2. Zasada pracy i budowa HWN

W skład HWN wchodzi trzy zasadnicze układy:

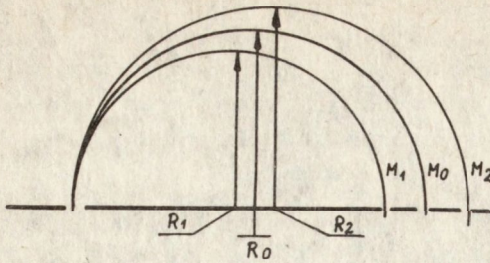
- głowica spektrometru mas,
- układ próżniowy,
- elektroniczny układ zasilająco-pomiarowy.

3.2.1. G ł o w i c a s p e k t r o m e t r u m a s

Zadaniem głowicy spektrometru mas jest wykrycie obecności helu przepływającego przez nieszczelność. Z tej roli głowicy wypływają dwie podstawowe cechy:

- może ona reagować tylko na gaz próbny, tzn. hel,
- obecność innych gazów nie powinna wpływać na wielkość sygnału helu.

Najczęściej stosowanym w HWN spektrometrem jest spektrometr mas o odchyleniu 180° . Wynika to z faktu, że głowica takiego spektrometru może być mała i droga jonu w obszarze separacji jest krótka. Ponadto, w głowicy tego typu, tor jonu znajduje się całkowicie w obszarze jednorodnego pola magnetycznego. Przykładowy tor jonów w jednorodnym polu magnetycznym o odchyleniu 180° jest przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe torony jonów o masach M_1, M_0, M_2 ($M_1 < M_0 < M_2$) w jednorodnym polu magnetycznym /linie siły pola magnetycznego prostopadłe do płaszczyzny rysunku/

Załóżmy, że mamy jony o ładunku jednostkowym. Są one przyspieszane przez napięcie U otrzymując energię kinetyczną eU .

Jeżeli napięcie to jest duże w porównaniu z rozrzutem energii początkowej jonów, możemy założyć, że jony wchodzi do pola magnetycznego z energią

$$eU = \frac{mv^2}{2} \quad /7/$$

gdzie:

m - masa jonu,

e - ładunek elementarny,

v - prędkość jonu po przyspieszeniu [cm/s].

Jeżeli linie siły pola magnetycznego są prostopadłe do wektora prędkości jonów, to jony będą się poruszały po orbicie kołowej wynikającej z równowagi siły odśrodkowej i dośrodkowej

$$BeU = \frac{mv^2}{R} \quad /8/$$

gdzie:

R - promień toru jonu o masie m ,

B - indukcja pola magnetycznego.

Po przekształceniu i wprowadzeniu odpowiednich jednostek otrzymujemy

$$M = 4,82 \cdot 10^{-2} \frac{B^2 R^2}{U} \quad /9/$$

gdzie U w voltach, M w j.m.a., B w gausach^x, R w cm.

Jeżeli kolektor jonów umieści się w odległości $2R_0$ od punktu wprowadzenia jonów w obszar pola magnetycznego, to do kolektora dotrą tylko te jony, których $R = R_0$. W przypadku helu ($M = 4$), wartość napięcia, do którego należy przyspieszyć jony, aby uzyskać sygnał prądu jonowego na kolektorze, wynosi

^x 1 Gs = 0,1 mT /przeliczenie dotyczy całego artykułu/

$$V = 1,20 \cdot 10^{-2} B^2 R_0^2$$

/10/

Nie wnikając w szczegóły teorii spektrometrów z odchyleniem magnetycznym można napisać, że zdolność rozdzielcza $M/\Delta M$ tych spektrometrów może być opisana w przybliżeniu równaniem

$$\frac{M}{\Delta M} = \frac{R}{a + b} \quad /11/$$

gdzie:

a i b - odpowiednio szerokość szczeliny wejściowej i wyjściowej jonów.

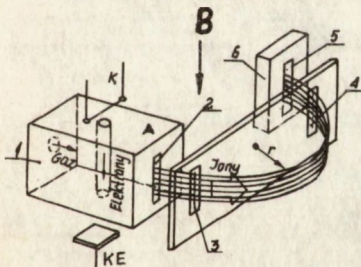
Aby skutecznie oddzielić ze strumienia jonów helu dochodzących do kolektora jony atomów o zbliżonych masach atomowych, tzn. He^3 / $M = 3$ / i C /podwójnie zjonizowany, $M = 6$ /, wystarczy, aby zdolność rozdzielcza spektrometru była nie większa niż 10.

Z równania /11/ wynika, że do tego celu wystarczy $R_0 = 10+15$ mm a szerokość szczelin może wynosić 1+2 mm. Przy takiej szerokości szczelin można uzyskać stosunkowo dużą czułość głowicy dla helu. Wynosi ona zwykle ok. $4 \cdot 10^{-6}$ A/Pa.

W głowicy spektrometru można wyodrębnić trzy zasadnicze części:

- źródło jonów,
- analizator /obszar segregacji jonów/,
- kolektor jonów.

Schemat ideowy takiej głowicy przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat głowicy spektrometru mas o kącie odchylenia 180°
 1 - źródło jonów /K - katoda, A - anoda/,
 2,3,4,5 - szczeliny,
 6 - kolektor jonów,
 KE - kolektor elektronów
 /wg J. Groszkowskiego/

Powszechnie stosowanymi źródłami jonów są źródła jonizacyjne z gorącą katodą /najczęściej z wolframu ale również z renu lub Ir/ThO₂/ typu poprzecznego. Cechą charakterystyczną takiego źródła jest to, że jonizujący strumień elektronów jest prostopadły do kierunku wyciągania jonów. Elektrony emitowane z rozgrzanej katody są przyspieszane napięciem 100+120 V i wchodzi do wnętrza anody w kształcie puszeki. Tutaj następuje jonizacja gazu a elektrony gromadzą się na elektrodzie kolektora elektronów. Powstałe jony opuszczają puszkę jonizacyjną

a następnie poprzez szczelinę wejściową wchodzi do obszaru analizatora. Różnica potencjałów istniejąca między puszką jonizacyjną a szczeliną wejściową, która zwykle jest na potencjale masy, odpowiada wartości napięcia przyspieszającego U .

W głowicach o kącie odchylenia 180° , źródła jonów są "zanurzone" w polu magnetycznym w ten sposób, że kierunek strumienia elektronów jest równoległy do linii sił pola. Wydłuża to drogę elektronów a tym samym zwiększa liczbę powstałych jonów. Drugą korzyścią wynikającą z umieszczenia źródła w polu magnetycznym jest to, że jony wchodzące do analizatora znajdują się już w jednorodnym polu magnetycznym.

Źródła poprzeczne mają niewielkie wymiary, są proste w konstrukcji i rozbieralne /umożliwia to łatwe ich czyszczenie/. Źródła te pracują zwykle z prądem elektronowym wynoszącym kilka mA. Niektóre rozwiązania konstrukcyjne źródeł mają dwie katody umieszczone albo obok siebie albo naprzeciw siebie. Jedna z tych katod spełnia rolę katody zapasowej.

Obszar analizatora spektrometru z odchyleniem 180° jest w postaci puszki całkowicie zanurzonej w polu magnetycznym, stanowiącej próżnioszczelną obudowę spektrometru. Zasadniczym elementem analizatora jest płytką ze szczelinami: wejściową i wyjściową. Szczeliny te są w kształcie prostokąta. Dłuższy bok prostokąta ma długość ok. 10 mm i jest równoległy do linii sił pola magnetycznego. Krótszy bok, tj. szerokość szczeliny, wynosi $0,8+1,0$ mm /szczelina wejściowa/ i $1+1,4$ mm /szczelina wyjściowa/. Zwykle w połowie drogi jonów jest umieszczona specjalna przesłona, której zadaniem jest wychwytywanie jonów dla których $R \neq R_0$. Przesłona ta może być również wykorzystywana do pomiaru prądu tych jonów a tym samym do oceny ciśnienia gazów w głowicy /prąd jonowy tej przesłony nie zawiera składowej pochodzącej od jonów gazu próbnego/.

W niektórych rozwiązaniach głowic na drodze od przesłony do szczeliny wyjściowej znajduje się specjalne elektroda osłaniająca strumień jonów gazu próbnego od jonów innego rodzaju, np. odbitych względnie wtórnych, pochodzących z obudowy. W ten sposób zmniejsza się tzw. prąd jonowy tła, pojawiający się przy pracy głowicy przy ciśnieniu ok. 10^{-2} Pa.

Dla promienia pola R_0 wynoszącego $15+25$ mm w głowicach z odchyleniem 180° , indukcja stosowanego pola magnetycznego wynosi $2000+2500$ Gs, co wymaga zastosowania napięcia przyspieszającego jony helu o wartości $200+250$ V.

W HWN są stosowane również statyczne spektrometry mas z odchyleniem magnetycznym o kącie odchylenia 60° i 90° . W tym przypadku wymiary głowicy wzrastają jak i wzrastają wymagania odnośnie jedno-

rodności pola magnetycznego. Spotyka się również w HWN podwójną separację jonów. Realizuje się to albo przez podwójne odchylenie magnetyczne, albo przez separację magnetyczną połączoną z separacją elektrostatyczną.

Jony gazu próbnego, których $R = R_0$, po przejściu przez obszar analizatora trafiają w szczelinę wyjściową i osiągają kolektor jonów. Kolektor ma kształt płaskiej elektrody lub puszki Faradaya.

W niektórych rozwiązaniach głowic między szczeliną wyjściową a kolektorem znajduje się specjalna elektroda szczelinowa spolaryzowana napięciem o wartości ok. połowy wartości napięcia przyspieszającego. Zadaniem tej elektrody jest wytworzenie pola hamującego dla innych jonów aniżeli jony helu, powstałych w wyniku odbicia od ścianek obudowy względnie od cząstek gazu, w przypadku pracy głowicy przy ciśnieniu ok. 10^{-2} Pa.

Bezpośrednio do kolektora jonów jest podłączony pierwszy stopień wzmacniacza prądu jonowego i opornika o bardzo dużej rezystancji $/10^{10} + 10^{11} \Omega/$. Zwiększa to wprawdzie wymiary głowicy, ale uzyskane korzyści /wzrost stabilności odczytu prądu jonowego, zmniejszenie stałej czasowej/ rekompensują tę niedogodność.

Głowice spektrometrów mas HWN są wykonywane w postaci samodzielnego elementu /wraz z magnesem/ dołączonego do układu próżniowego wykrywacza za pomocą próżniowego złącza rozbieralnego. Elementy wewnętrzne, szczególnie działło jonowe i kolektor, są zwykle łatwo rozbieralne i zapewniają powtarzalność ponownego montażu. Elektrody są zwykle montowane na talerzykach z przepustami wprowadzonymi do obudowy głowicy i uszczelnionymi łatwo rozbieralnymi złączami.

3.2.2. U k ł a d p r ó ż n i o w y

Zadaniem układu próżniowego HWN jest:

- zapewnienie odpowiednich warunków pracy głowicy spektrometru,
- odpompowanie gazu próbnego /helu/ przepływającego przez nieuszczelnność w badanym obiekcie.

Pierwsze z tych zadań sprowadza się do tego, aby ciśnienie gazów szczątkowych jak i gazu próbnego w czasie pracy głowicy nie było wyższe niż ok. 10^{-2} Pa oraz aby zabezpieczyć głowicę przed przedostawaniem się do niej niepożądanych substancji, takich jak np.: oleje, smary, substancje lotne pochodzenia organicznego lub inne zanieczyszczenia mogące pochodzić ze sprawdzanego obiektu.

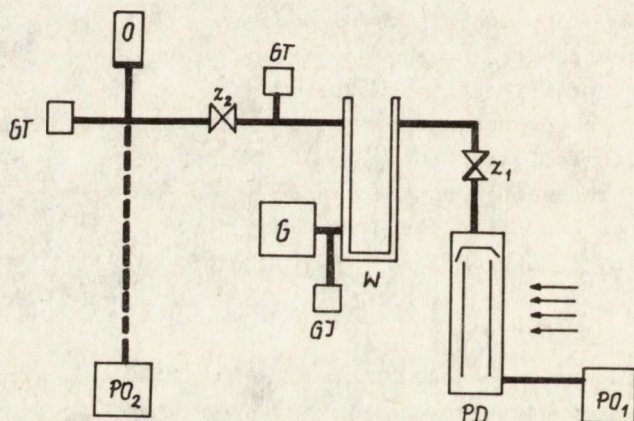
Przedostawanie się do głowicy spektrometru substancji organicznych jest niebezpieczne z tego względu, że pod wpływem strumienia elektronów substancje te tworzą na powierzchni elektrod warstwy polimerów wpływające na rozkład pola elektrycznego w głowicy, a tym

samym zmniejszającą czułość głowicy. Aby zapobiec temu, stosuje się zwykle wymrażarkę wypełnioną ciekłym azotem.

Drugie zadanie układu próżniowego - odpompowanie helu - narzuca określone wymagania temu układowi. W pierwszym rzędzie musi on zapewnić stabilne pompowanie helu w szerokim zakresie ciśnień.

Z teorii pracy pomp dyfuzyjnych wiadomo, że tzw. współczynnik kompresji tych pomp jest mniejszy dla gazów o niewielkim ciężarze molekularnym /wodór, hel/ aniżeli dla gazów "cięższych" /tlen, azot, argon/. Objawia się to zwiększoną dyfuzją wsteczną gazów "lekkich" przez strumień par oleju pompy dyfuzyjnej. W praktyce obserwuje się, w miarę wzrostu strumienia pompowanego gazu "lekkiego", fluktuacje ciśnienia helu i wodoru po stronie wysokiej próżni pompy dyfuzyjnej. Fluktuacje takie utrudniają pomiar, zwłaszcza niewielkich natężeń nieszczelności. Wynika z tego, że wymagania stawiane układowi pompowemu HWN są bardziej rygorystyczne niż wymagania stawiane układom pompowym gazów "ciężkich", np. powietrza.

Schemat ideowy układu próżniowego HWN przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat ideowy układu próżniowego HWN
PO - pompa obrotowa, PD - pompa dyfuzyjna, W - wymrażarka,
G - głowica spektrometru, GJ - głowica jonowa,
GT - głowica ciepłno-pojemnościowa, O - obiekt, Z - zawór

W jego skład wchodzi dwustopniowa pompa obrotowa PO_1 oraz olejowa pompa dyfuzyjna PD. Prędkość pompowania pompy obrotowej wynosi $3 \pm 10 \text{ m}^3/\text{h}$, a pompy dyfuzyjnej $100 \pm 150 \text{ l/s}$ - dla powietrza lub $200 \pm 250 \text{ l/s}$ - dla helu. Duża prędkość pompowania pompy obrotowej wynika z konieczności zapewnienia stabilnej pracy pompy dyfuzyjnej.

Od pozostałej części układu próżniowego pompa dyfuzyjna jest często odłączana zaworem Z_1 . Miernik natężenia nieszczelności jest wyskalowany dla przypadku, gdy zawór Z_1 jest całkowicie otwarty. Przymknięcie zaworu zmniejsza prędkość pompowania helu w głowicy, a tym samym wzrasta ciśnienie helu oraz prąd jonowy na kolektorze. Można w ten sposób zwiększyć czułość danego wykrywacza. Zawór Z_1 jest często określany przez producentów wykrywaczy jako akumulacyjny.

Następnym z kolei elementem układu próżniowego jest wymrażarka W o pojemności $1+4 \text{ dm}^3$, charakteryzująca się dość długim czasem odparowania ciekłego azotu.

Bezpośrednio do wymrażarki jest podłączona głowica spektrometru. Prędkość pompowania helu w głowicy, przy całkowicie otwartym zaworze Z_1 , wynosi od kilku do kilkunastu dm^3/s , w zależności od konstrukcji głowicy i układu pompowego.

Do wymrażarki jest podłączony przewód łączący obiekt z HWN. Przewód ten jest tak usytuowany, aby cząsteczki gazu pompowanego z obiektu, przed przejściem do głowicy spektrometru, trafiały na chłodną powierzchnię wymrażarki.

Na drodze między wymrażarką a przewodem do podłączania obiektu znajduje się zawór odcinający Z_2 . Jego zadaniem jest odłączenie układu pompowego HWN od obiektu wówczas, gdy w tym ostatnim panuje ciśnienie atmosferyczne /w czasie podłączania i odłączania obiektu/. W celu poprawy warunków pracy głowicy spektrometru i przyspieszenia procesu wykrywania nieszczelności, odpompowuje się obiekt za pomocą dodatkowej pompy obrotowej PO_2 , która wytwarza w obiekcie ciśnienie ok. 10^{-1} Pa .

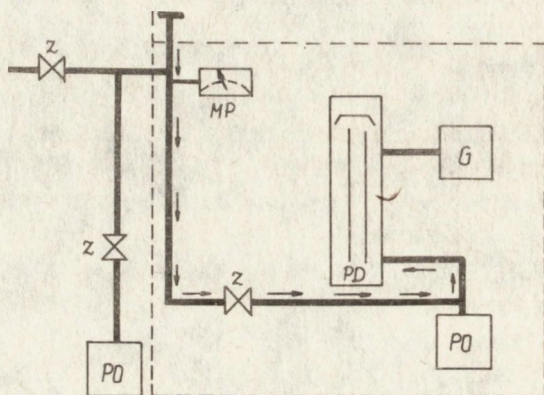
W przypadku gdy:

- badany obiekt ma dużą objętość,
- istnieje duże natężenie nieszczelności /ponad $10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ / - układ pompowy HWN może nie zapewnić wystarczającego ciśnienia dla prawidłowej pracy głowicy spektrometru. Wówczas należy zmniejszyć strumień gazu wpływającego do HWN, przy równoczesnym pompowaniu obiektu pompą PO_2 . Służy do tego zawór Z_2 .

Kontrola ciśnienia w HWN jest niezbędna ze względu na bezpieczeństwo pracy głowicy spektrometru, układu pompowego i jest konieczna w przypadku automatyzacji wykrywania nieszczelności. Ciśnienie próżni wstępnej, wytwarzanej przez pompę PO_2 i PO_1 , kontroluje się za pomocą próżniomierzy ciepłno-przewodnościowych. Informacji o ciśnieniu w głowicy dostarcza próżniomierz jonowy. Dodatkowe mierniki próżni dostarczają sygnałów potrzebnych - w przypadku automatyzacji - do uruchamiania odpowiednich zaworów i innych elementów układu próżniowego.

Od kilku lat na rynku istnieją wykrywacze helowe o innym systemie pracy - z wstecznym przepływem helu. Wykrywacze takie są stosowane do okresowego sprawdzania szczelności instalacji.

Wykrywacz taki składa się z pompy obrotowej, dyfuzyjnej i głowicy spektrometru i nie ma wymrażarki. Złącze do podłączenia obiektu znajduje się po stronie wejściowej pompy dyfuzyjnej. Hel dyfunduje do głowicy spektrometru zwrótnie, poprzez strumień par oleju /rys. 4/.



Rys. 4. Schemat HWN z wstecznym przepływem helu
PO - pompa obrotowa, PD - pompa dyfuzyjna, G - głowica spektrometru,
MP - miernik ciepłoprzewodnościowy, Z - zawór

Zaletami tego typu wykrywaczy są:

- eliminacja wymrażarki,
- ciśnienie na wejściu rzędu 1 Pa,
- zawór wejściowy jest niepotrzebny,
- filtrowanie gazów ciężkich przez pompę dyfuzyjną.

Wadami tego typu wykrywaczy są:

- powolne zanieczyszczanie głowicy przez pary olejów,
- zła stabilność sygnału helu, zależna od wahań prędkości pompowania pompy dyfuzyjnej, pracującej w nominalnych warunkach,
- skalowanie detektora zależne od pompy obrotowej,
- brak możliwości odpompowania badanej objętości do wysokiej próżni.

Na rynku spotyka się też wykrywacze helowe standardowe ale bez wymrażarki. Wówczas jednak stosuje się systemy stałego oczyszczania głowicy i ciągłej pracy /całodobowej/ układu próżniowego /np. w wykrywaczu typu MS-20 firmy Veeco/.

Firma CIT-Alcatel wprowadziła na rynek wykrywacz, w którym zastąpiono pompę dyfuzyjną pompą turbo-molekularną. Wymrażarka jest

w tym układzie zbędna. Wykrywacz typu ASM 110-Turbo ma czas rozruchu 2 minuty!

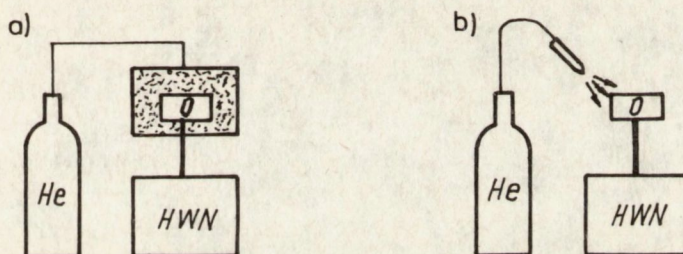
4. TECHNIKI WYKRYWANIA NIESZCZELNOŚCI ZA POMOCĄ HWN

W zależności od rodzaju obiektu jak i wielkości występującej nieszczelności stosuje się różne techniki wykrywania nieszczelności za pomocą HWN. Powszechnie są znane trzy metody:

- próżniowa,
- nadciśnieniowa,
- nadciśnieniowo-próżniowa.

4.1. Metoda próżniowa

Metoda ta jest stosowana do obiektów, z których, po podłączeniu do HWN, może być odpompowane powietrze. Z drugiej strony obiektu jest wprowadzany hel, zwykle pod ciśnieniem atmosferycznym. Istnieją dwie wersje tej metody. W pierwszej cały obiekt jest otoczony helem, w drugiej natomiast wąski strumień helu kolejno odmuchiwa poszczególne fragmenty obiektu. W obu przypadkach hel przepływa przez ewentualną nieszczelność i dostaje się do HWN /rys. 5/.



Rys. 5. Metoda próżniowa wykrywania nieszczelności
a/ obiekt badany O jest otoczony helem
b/ obiekt badany O jest odmuchiwany helem

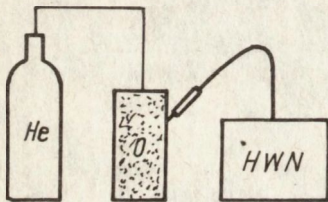
Metoda próżniowa jest powszechnie stosowana do kontroli szczelności elementów, podzespołów i urządzeń próżniowych, elementów konstrukcyjnych podzespołów elektronicznych /podstawki, przepusty, obudowy/, elementów czynnych przetworników automatyki.

Podstawową zaletą tej metody jest to, że w sposób jednoznaczny pozwala wyznaczyć wielkość natężenia nieszczelności, gdyż dla danej nieszczelności jest ona tylko funkcją ciśnienia helu. Ciśnienie to

może być łatwo zdefiniowane - jest to najczęściej ciśnienie atmosferyczne. Poza tym metoda ta /w wersji z odmuchiwaniem/ pozwala na dokładną lokalizację miejsca nieszczelności. Czułość tej metody zależy od minimalnego wykrywalnego natężenia nieszczelności danego wykrywacza /ok. 10^{-11} Pa·m³/s/, a poprzez zastosowanie metody akumulacji może być zwiększona do 10^{-12} - 10^{-13} Pa·m³/s.

4.2. Metoda nadciśnieniowa

W metodzie tej wykorzystuje się wypływ helu z obiektu, w którym uprzednio wytworzono odpowiednie nadciśnienie tego gazu. Po powierzchni obiektu wodzi się specjalnym próbnikiem /tzw. "nos helowy"/, zasysającym gaz do HWN. W miejscu nieszczelnym w zasysanym gazie /którym jest powietrze atmosferyczne/, wzrasta koncentracja helu rejestrowana przez spektrometr /rys. 6/.



Rys. 6. Metoda nadciśnieniowa wykrywania nieszczelności
W obiekcie badanym O znajduje się hel pod ciśnieniem. Próbnik /"nos helowy"/ jest połączony z HWN.

Metoda nadciśnieniowa znajduje szczególne zastosowanie do oceny szczelności obiektów o dużych wymiarach względnie takich, które nie mogą być odpompowane.

Wadą metody jest to, że nie pozwala ona bezpośrednio, tzn. z odczytu sygnału wykrywacza, określić wielkość nieszczelności. Aby tego dokonać, należy obszar nieszczelności otoczyć większym zbiornikiem /o objętości V/ tak, aby wypływający hel zbierał się w nim przez czas t. Natężenie nieszczelności może być wówczas obliczone z zależności

$$J = p_{He} \frac{R_2 V}{R_1} \cdot t \quad /12/$$

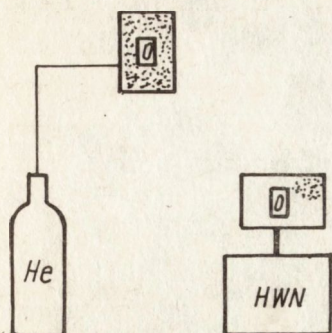
gdzie:

p_{He} - ciśnienie helu w powietrzu / $3,8 \cdot 10^{-3}$ Tr/.

R_1, R_2 - sygnały wykrywacza odpowiednio przy zasysaniu powietrza atmosferycznego i gazu z objętości V po czasie t.

4.3. Metoda nadciśnieniowo-próżniowa

Metoda ta polega na tym, że badany obiekt, do którego uprzednio wprowadzono hel, jest umieszczany w HWN /rys. 7/.



Rys. 7. Metoda nadciśnieniowo-próżniowa wykrywania nieszczelności
Nasycony uprzednio helem obiekt umieszcza się w pojemniku połączonym z HWN

Metoda ta w zasadzie nie pozwala zlokalizować miejsca nieszczelnego, a pozwala tylko określić sumaryczne natężenie nieszczelności. Ma ona szczególne znaczenie dla oceny szczelności niewielkich obiektów całkowicie zamkniętych, np. hermetycznych obudów z wmontowanym układem scalonym.

Techniczna realizacja metody nadciśnieniowo-próżniowej jest dokonywana w wyniku trzech kolejnych operacji:

- nasykania obiektu gazem próbnym /helem/,
- leżakowania obiektu /aeryzacji/,
- właściwego badania szczelności.

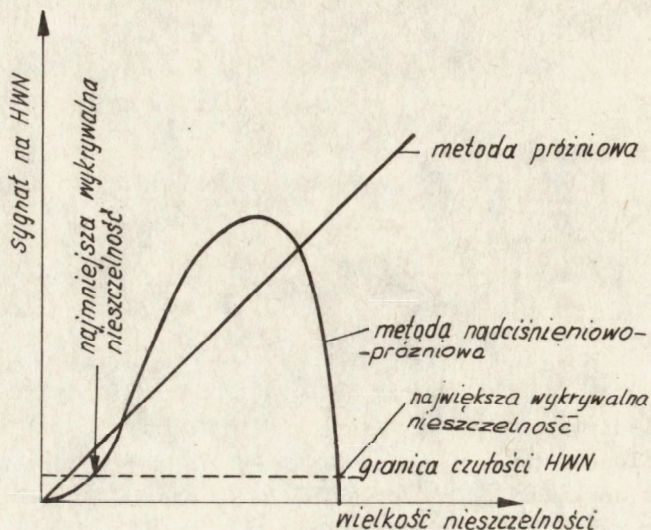
W czasie pierwszej z tych operacji, obiekty badane są umieszczane w specjalnym pojemniku, z którego odpompowuje się powietrze. Po wprowadzeniu do pojemnika helu o ciśnieniu kilku atmosfer^{x/} przeprowadza się nasykanie przez okres od jednej do kilku godzin, w zależności od objętości obiektu. W tym czasie następuje napływ helu do nieszczelnych obiektów.

Następną operacją, jakiej podlegają nasycone obiekty, jest leżakowanie. Jego zadaniem jest desorpcja helu z powierzchni obiektu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy w skład obudowy wchodzi takie materiały, jak: szkło, substancje porowate, tworzywa sztuczne. W czasie leżakowania następuje również częściowy wypływ helu z nieszczelnych obiektów.

Ostatnią operacją jest umieszczenie obiektu w HWN i właściwy proces kontroli. Interpretacja wyniku pomiaru nie jest jednakże jedno-

^{x/} 1 atm = $1,01325 \cdot 10^5$ Pa / przeliczenie dotyczy całego artykułu/

znaczna /jak to ma miejsce w metodzie próżniowej/, lecz zależy od kilku parametrów: warunków nasycania, czasu leżakowania, wielkości obiektu.



Rys. 8. Zależność wskazań HWN od wielkości nieszczelności dla metody próżniowej i nadciśnieniowo-próżniowej

Na rys. 8 przedstawiono zależność wskazań HWN od wielkości nieszczelności dla metody próżniowej i nadciśnieniowo-próżniowej.

Ciśnienie helu jak i czas nasycania decydują o ciśnieniu, jakie się ustali wewnątrz obiektu. Czas leżakowania jak i czas pompowania wstępnego, gdy obiekt znajduje się w HWN, decydują o ilości helu usuniętego z obiektu przed rozpoczęciem pomiaru. Wpływają więc na wskazania HWN. Jeżeli czas leżakowania jest wynikiem wielkości adsorpcji helu przez materiał obiektu, to czas odpompowania zależy od stosowanej aparatury.

W przypadku obiektów nieszczelnych mamy więc do czynienia z sytuacją, w której w czasie leżakowania i odpompowania wstępnego może nastąpić taki ubytek helu, że mierzone przez HWN natężenie nieszczelności będzie poniżej przyjętego za graniczne, gdy tymczasem rzeczywista wartość natężenia nieszczelności istniejąca w obiekcie jest znacznie większa. Takie niebezpieczeństwo istnieje zwłaszcza, gdy obiekt ma małą objętość zaś nieszczelność jest duża. Wynika stąd wniosek, że w pewnych przypadkach badania za pomocą HWN metodą nadciśnieniowo-próżniową nie dają jednoznacznej odpowiedzi, czy obiekt

jest szczelny.

Bardziej szczegółowe omówienie doboru warunków badania i interpretacji wyników znajduje się w rozdz. 7.

5. HELOWE WYKRYWACZE NIESZCZELNOŚCI I ICH WYPOSAŻENIE

HWN powinien spełniać następujące warunki:

- niska wartość najmniejszego wykrywalnego natężenia nieszczelności,
- krótki czas odpowiedzi - poniżej 1 s,
- krótki czas powrotu do gotowości do pracy po dużym sygnale helu,
- łatwa obsługa.

W przypadku wykrywaczy wyspecjalizowanych^{x/} dochodzi dodatkowy ważny warunek - duża wydajność przy krótkim czasie trwania cyklu roboczego.

Współczesne wykrywacze nieszczelności mają czułość rzędu 10^{-12} Pa·m³/s, czas odpowiedzi wynosi 0,5 s, przy ciśnieniu rzędu 10^{-9} Pa·m³/s, a daleko posunięta automatyzacja sprowadza obsługę do operowania przyciskami. Wydajność wykrywaczy wyspecjalizowanych jest znaczna a cykle robocze - w przypadku małych obiektów - sekundowe.

Na ogół czułość HWN znacznie przekracza wymagania użytkowników: w technice próżni i atomistyce graniczne natężenie nieszczelności jest na poziomie 10^{-11} + 10^{-10} Pa·m³/s, w przemyśle podzespołów elektronicznych 10^{-9} + 10^{-7} Pa·m³/s, w przemyśle spożywczym 10^{-7} + 10^{-6} Pa·m³/s.

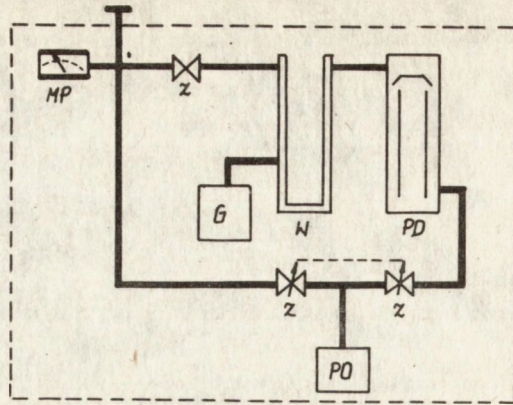
Poniżej przedstawiono schematy różnych wersji HWN, najczęściej oferowanych przez wyspecjalizowane firmy oraz omówiono niezbędne wyposażenie, umożliwiające stosowanie różnych metod wykrywania nieszczelności.

Na rys. 9 przedstawiono dla przykładu schemat standardowego wykrywacza nieszczelności typu ASM 10 firmy Alcatel. Przy operacjach wykrywania nieszczelności konieczne jest jednak dodatkowe wyposażenie. Zależy ono od rodzaju obiektów do sprawdzenia.

Jeżeli objętość obiektu jest mała /poniżej 0,02 m³/, wyposażenie dodatkowe będzie się składało

- dla metody próżniowej:
 - z przewodu zwykle giętkiego, łączącego wykrywacz z obiektem,
 - z zaworu zapowietrzającego obiekt,
 - z pistoletu nadmuchowego,
 - z nacieku wzorcowego do cechowania HWN;

^{x/} Przez wykrywacz wyspecjalizowany należy rozumieć taki, który mając specjalne wyposażenie służy do powtarzalnej, wysokowydajnej kontroli jednego określonego rodzaju obiektu.



Rys. 9. Schemat standardowego HWN
 PO - pompa obrotowa, PD - pompa dyfuzyjna,
 W - wymrażarka, G - głowica spektrometru,
 MP - miernik ciepłno-przewodnościowy, Z - zawór

- dla metody nadciśnieniowej:

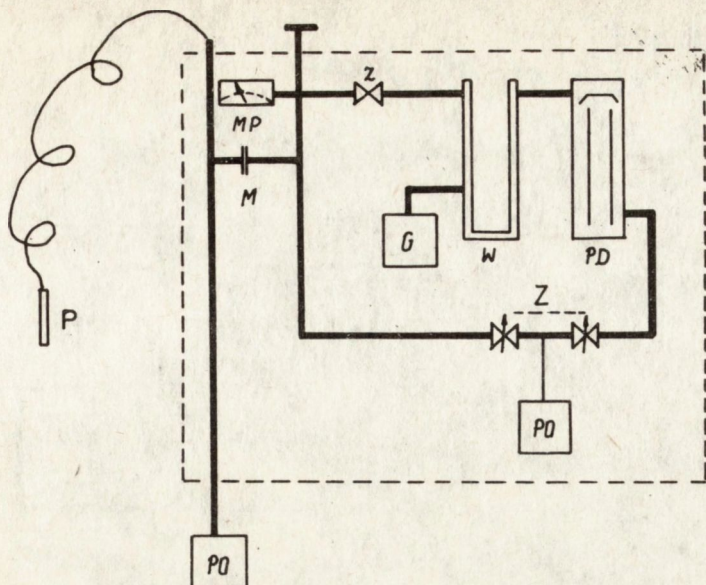
- z próbnika /nosa/ helowego o stałym lub regulowanym przepływie wraz z odpowiednim giętkim połączeniem z HWN /długość przewodu nie powinna przekraczać 1 m/.
- z nacieku wzorcowego.

W przypadku, gdy obiekt badany jest trudno dostępny, standardowy HWN można wyposażyć w układ wykrywający nieszczelność na duże odległości, składający się z dodatkowej pompy obrotowej i membrany przepuszczającej do HWN jedynie hel. W takim przypadku próbnik o nieregulowanym przepływie może być połączony z HWN przewodem o długości wielu metrów a czas odpowiedzi wynosi 0,2 s/m przewodu. Wykorzystuje się w tym przypadku przepływ lepki i tarcie wewnętrzne między częściami gazu w gałęzi układu pompa-próbnik /patrz rys. 10/.

Oczywiście, odczytana w tym przypadku na HWN wartość natężenia nieszczelności nie odpowiada rzeczywistej. Dane dotyczące współczynnika korekcyjnego zwykle podają producenci urządzeń.

Jeżeli objętość badanego obiektu jest większa niż 0,02 m³, wyposażenie dodatkowe dobiera się w zależności od stosowanej metody kontroli.

W przypadku metody nadciśnieniowej wyposażenie będzie podobne do stosowanego dla małych objętości.



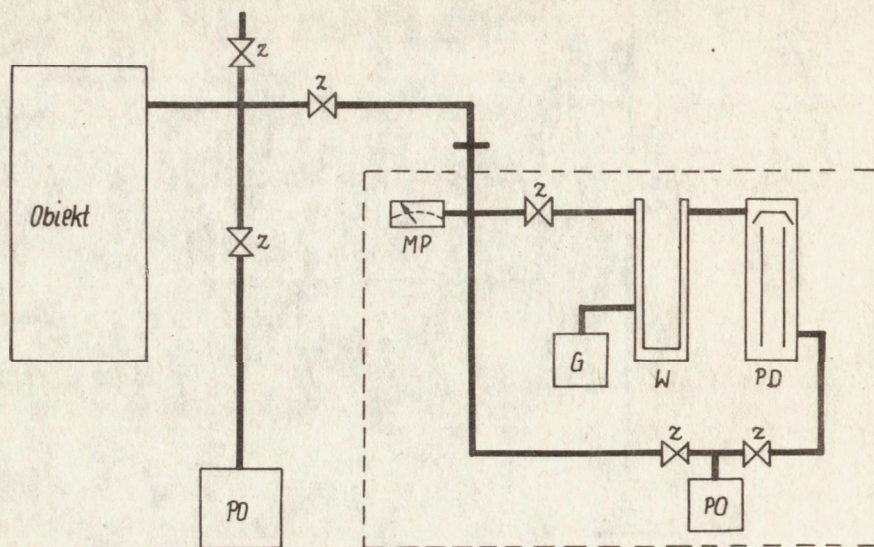
Rys. 10. Schemat HWN z wyposażeniem do badania metodą nadciśnieniową na duże odległości
 PO - pompa obrotowa, PD - pompa dyfuzyjna, W - wymrażarka,
 G - głowica spektrometru, MP - miernik cieplno-przewodnościowy,
 M - membrana, P - próbnik, Z - zawór

W przypadku metody próżniowej konieczne jest następujące dodatkowe wyposażenie:

- pompa obrotowa do odpompowania wstępnego obiektu,
- zawór odcinający pompę obrotową,
- zawór odcinający HWN,
- zawór zapowietrzający,
- głowica miernika próżni wstępnej,
- odpowiednie połączenia HWN z obiektem i wyposażeniem,
- naciek wzorcowy.

Schemat takiego wykrywacza przedstawiono na rys. 11.

Przy doborze pompy obrotowej należy brać pod uwagę objętość badanego obiektu, czas przeznaczony do kontroli obiektu i kryterium dopuszczalnego natężenia nieszczelności. Przy dużych objętościach obiektu i jego znacznym gazowaniu, nie odłącza się obiektu przed pomiarem pompy wstępnej. W takim przypadku /pompowania równoległego/



Rys. 11. Schemat HWN do wykrywania nieszczelności dużych obiektów
 PO - pompa obrotowa, PD - pompa dyfuzyjna, W - wymrażarka,
 G - głowica spektrometru, MP - miernik ciepłno-przewodnościowy,
 Z - zawór

należy zwrócić uwagę na fakt, że wskazania HWN nie będą prawdziwe i muszą być korygowane przez tzw. współczynnik "osłabienia".

Aby poznać ten współczynnik umieszcza się na badanym obiekcie naciek wzorcowy o dużym natężeniu nieszczelności /rzędu 10^{-5} , 10^{-6} Pa·m³/s/. Wartość współczynnika wyznacza się ze stosunku natężenia nieszczelności nacieku i wskazań HWN.

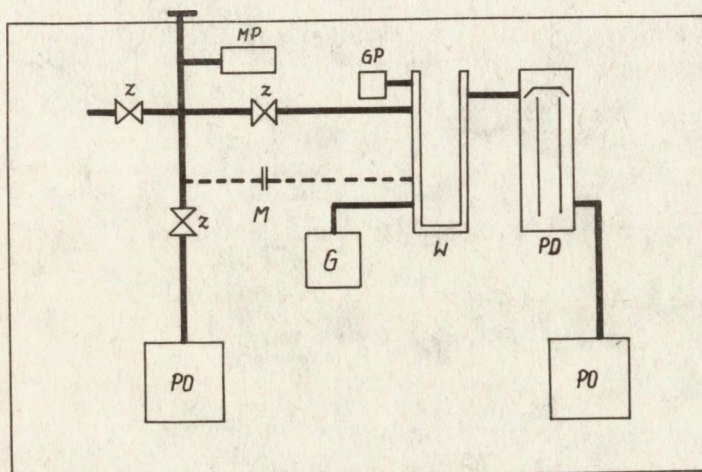
Ważnym elementem przy wykrywaniu nieszczelności w dużych obiektach jest czas odpowiedzi HWN. Wynika on z objętości obiektu i szybkości jego pompowania. Jeśli np. objętość $V = 1 \text{ m}^3$, a prędkość pompowania wynosi $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ / $360 \text{ m}^3/\text{h}$ /, to czas odpowiedzi wyniesie 10 s. W przypadku, gdyby czas odpowiedzi był minutowy, lokalizacja nieszczelności byłaby trudna i zależna od operatora.

W przypadku, gdy w badanej objętości nie można uzyskać ciśnienia poniżej 100 Pa a obiekt ma swój własny system pompowy, umieszcza się zawór na obiekcie. Najlepiej, gdy zawór ma membranę przepuszczającą hel tak umieszczoną, że działa ona gdy zawór jest zamknięty. Zamiast membrany jest stosowany nieraz zawór działający impulsowo /próbkująco/. Wówczas można przeprowadzić badanie metodą odmuchiwania.

Omówione powyżej wersje HWN są zwykle urządzeniami przenośnymi. Obok nich istnieją wersje o identycznych funkcjach, jednak bardziej rozbudowane pod względem próżniowym jak i stosowanej automatyki. Zwykle te wykrywacze są stacjonarne i w dalszym ciągu tak będą określane.

Wykrywacze stacjonarne pozwalają na wykrywanie nieszczelności w bardzo różnych obiektach, badanych metodami próżniowymi lub nadciśnieniowo-próżniowymi. Wykrywacze stacjonarne są, w przeciwieństwie do przenośnych, jednostkami kompletnymi wymagającymi tylko specjalnego wyposażenia w zależności od stosowanej metody kontroli.

Na rys. 12 przedstawiono schemat typowego wykrywacza stacjonarnego.



Rys. 12. Schemat HWN stacjonarnego

PO - pompa obrotowa, PD - pompa dyfuzyjna, W - wymrażarka,
G - głowica spektrometru, MP - miernik ciepłoprzewodnościowy,
GP - głowica ciepłoprzewodnościowa - M - membrana, Z - zawór

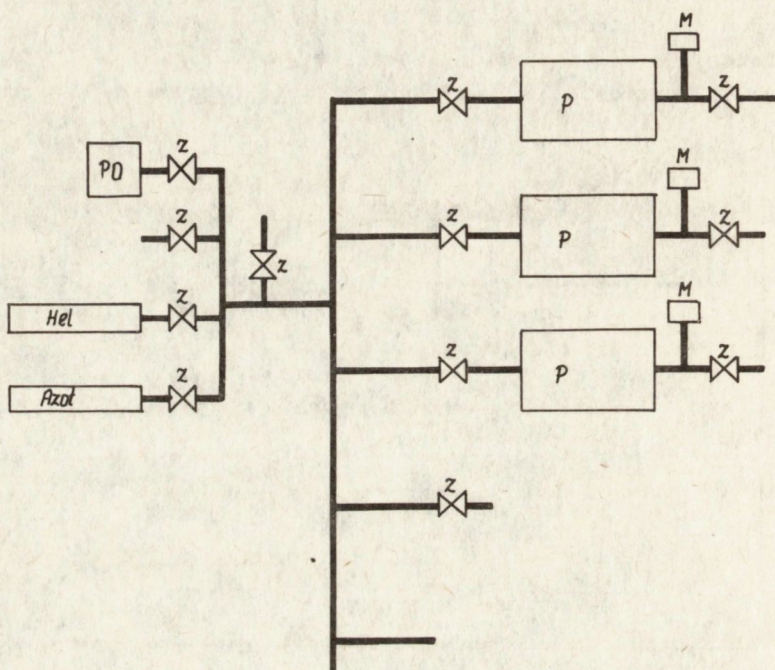
Obecnie produkowane wykrywacze są znacznie zautomatyzowane. Pomiar metodą próżniową polega na umieszczeniu próbki w uchwycie /dodatkowe wyposażenie/ i uruchomieniu automatyki. O gotowości do odmuchiwania helmu sygnalizuje wskaźnik. Po dokonaniu odmuchiwania i odczytanie wartości natężenia nieszczelności, operator przyciskiem doprowadza urządzenie do stanu początkowego.

Przy metodzie próżniowej konieczne jest następujące wyposażenie:

- uchwyt próbek,
- pistolet nadmuchowy,
- naciek wzorcowy do kalibrowania HWN.

Przy metodzie nadciśnieniowo-próżniowej konieczny jest pojemnik, w którym umieszcza się próbki uprzednio nasycone helem. W tym przypadku, obok pojemnika i nacieku wzorcowego niezbędne jest dodatkowe wyposażenie w postaci urządzenia do nasycania próbek helem.

Dla próbek o niewielkich wymiarach, np. elementów elektronicznych, stosuje się zespół komór i zaworów /rys. 13/.



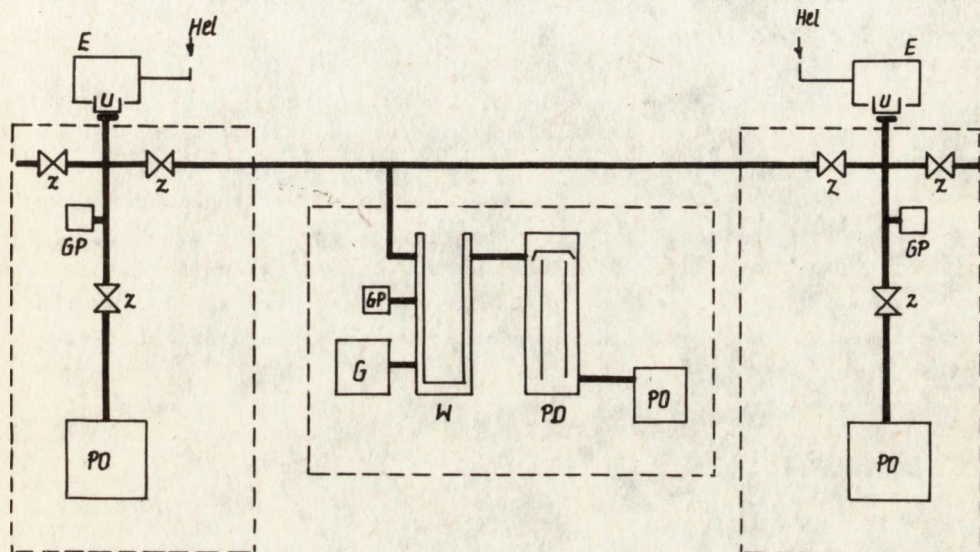
Rys. 13. Urządzenie do nasycania helem
P - pojemnik, M - manometr, Z - zawór, PO - pompa obrotowa
Pojemnik z azotem służy do ewentualnego wytwarzania mieszaniny nasycającej helu z azotem

Współczesne wykrywacze stacjonarne mają zakres pomiaru natężeń nieszczelności $10 \pm 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. W celu wykrycia dużych natężeń nieszczelności wprowadza się dodatkowy zawór działający "pulsowo /próbkująco/ lub membranę przepuszczającą hel a zatrzymującą powietrze, umieszczoną równolegle do wejścia na HWN /patrz rys. 12 - linia przerywana/. W takim układzie wskazania wykrywacza trzeba pomnożyć przez współczynnik będący stosunkiem prędkości pompowania pompy wstępnej do przewodności membrany. Ten współczynnik ma zwykle wartość rzędu 10^7 .

Do sprawdzenia szczelności dużej liczby elementów konieczne są specjalne rozwiązania techniczne HWN. Zasadniczym parametrem jest czas trwania cyklu sprawdzania, czyli czas skontrolowania danej liczby sztuk w ciągu godziny.

Wykrywacze do tego celu, dalej nazywane wyspecjalizowanymi, występują w dwóch wersjach:

- do badań podzespołów przez nadmuch,
- do badań elementów zamkniętych metodą nadciśnieniowo-próżniową.



Rys. 14. Schemat HWN wyspecjalizowanego o dużej wydajności /DGC-20, Alcatel/

PO - pompa obrotowa, PD - pompa dyfuzyjna, W - wymrażarka, Z - zawór, G - głowica spektrometru, GP - głowica ciepłno-przewodnościowa, U - uchwyt próbki, E- element osłonowy próbki

Na rys. 14 przedstawiono schemat wyspecjalizowanego HWN /typ DGC-20 firmy Alcatel/ o dwóch stanowiskach pracy, pracujących przemiennie. Ponieważ czas pomiaru musi być bardzo krótki, całość jest zautomatyzowana a rola operatora sprowadza się do umieszczania próbek, uruchamiania cyklu badania i zdejmowania próbek.

W przypadku stosowania tego wykrywacza w metodzie próżniowej, np. do badania obudów metalowo-ceramicznych, HWN jest wyposażony w odpowiednio sterowany nadmuch helu do objętości otaczającej obudowę. Oczywiście potrzebne są też odpowiednie uchwyty próbek.

W przypadku badania elementów zamkniętych metodą nadciśnieniowo-

-próżniową uchwytę są zastąpione przez pojemnik. Jego zamknięcie zwykle uruchamia cykl badania. Istnieją też rozwiązania pozwalające na automatyczną segregację zbadanych próbek na dobre i złe /typ DGC-20-ressuage, firmy Alcatel/.

Wiadomo, że dla takiego badania konieczne jest współpracujące urządzenie do nasywania próbek /rys. 13/. Współczesne rozwiązania konstrukcyjne tego rodzaju urządzeń pozwalają na odłączanie od stanowiska pojedynczych komór. Liczba komór musi być odpowiednia do wydajności wykrywacza. Dla doboru liczby komór trzeba znać:

- wydajność wykrywacza,
- minimalny czas i ciśnienie nasywania helem,
- maksymalny czas leżakowania próbek.

Współczesne wykrywacze pozwalają na dokonanie 6 cykli badań na minutę czyli 360 na godzinę. W przypadku badania "sztuka po sztuce" można sprawdzić 360 szt/h przy sprawnym i pilnym operatorze. Zazwyczaj jednak elementy zamknięte bada się w porcjach po kilka sztuk jednocześnie. W przypadku nieszczelności, porcję dzieli się na pół i bada ponownie. Postępuje się tak do chwili trafienia na sztukę złą. Wynika stąd wniosek, że przy dużej wadliwości korzystniejsze będzie badanie "sztuka po sztuce" lub w małych porcjach.

Relacja pomiędzy procentem sztuk złych i liczbą sztuk N w porcji jest opisana wzorem

$$N = 1/\sqrt{\eta}$$

Jeżeli np. $\eta = 2\%$ to $N \approx 7$

gdy $\eta = 10\%$ to $N \approx 3$

Jeżeli założymy przypadek najlepszy /brak odpadu/, to przy porcjach 10-sztukowych w ciągu godziny można sprawdzić 3600 szt. Przy 10% odpadzie, wydajność spadnie do ok. 650 szt/h. Producenci wykrywaczy nieszczelności podają często w swych katalogach czysto teoretyczne dane dotyczące wydajności, które w rzeczywistości są znacznie niższe.

Bliższe omówienie kontroli szczelności elementów elektronicznych metodą nadciśnieniowo-próżniową znajdzie czytelnik w rozdz. 7.

6. PROBLEMY ZWIĄZANE Z WYKRYWANIEM NIESZCZELNOŚCI

Wykrywanie nieszczelności za pomocą HWN jest czynnością na ogół rutynową. Obsługa wykrywaczy natrafia jednak nieraz na trudności. O najczęściej spotykanych powiemy w niniejszym rozdziale.

6.1. Połączenia z HWN

Połączenia obiektu z HWN mogą być dwojakiego rodzaju:

- połączenia standardowe,
- uchwyty próbek.

Dla połączeń standardowych stosuje się zwykle przewody metalowe, giętkie lub sztywne z odpowiednimi kołnierzami. Połączenia te są znormalizowane i zamawiając wykrywacz i wyposażenie trzeba zwrócić uwagę na wymiary kołnierzy.

Uchwyty próbek to jeden z podstawowych problemów, które musi rozwiązać użytkownik wykrywacza nieszczelności.

Kształty i wymiary badanych próbek mogą być różne: bardzo małe, np. obudowy diod / \varnothing 3 mm/ lub bardzo duże, np. duże przepusty metalowo-szklane.

Uchwyt musi być niezawodny, tzn. nie może występować naciek na uszczelnieniu uchwytu. W związku z tym do każdego rodzaju próbek konieczny jest dobór uchwytu a następnie staranne sprawdzenie jego niezawodności. Często, dla uszczelnienia styku uszczelka gumowa-próbka stosuje się smar próżniowy. W takim przypadku zaleca się ostrożność, aby smar nie dostał się, zwłaszcza z tłustych rąk, na części próbki podlegające sprawdzeniu /złącza, spoiny/. Nawet bardzo drobna ilość smaru może chwilowo zlikwidować istniejącą nieszczelność.

W wykrywaczach laboratoryjnych, gdy badana próbka ma kołnierz, umieszcza się ją zwykle na płaskiej uszczelce gumowej i przyciska. Obudowy elektroniczne otwarte odwraca się i silnie przyciska do uszczelki gumowej za pomocą śrub. Stosuje się też w różnych przypadkach uchwyty obejmowe. Ścisłana nakrętką uszczelka rozpręża się uszczelniając próbkę.

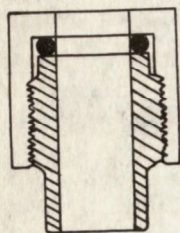
W wykrywaczach wyspecjalizowanych stosuje się konstrukcje uchwytów umożliwiające szybkie włożenie względnie zdjęcie próbki, która w czasie badania jest przyciskana do uszczelki.

Na rys. 15 pokazano szkiecowo różne typy uchwytów.

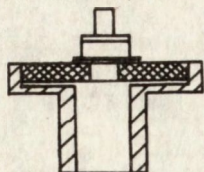
Badania szczelności metodą nadciśnieniowo-próżniową wymagają odpowiednich pojemników. Nie stanowią one problemu technicznego.

W przypadku wykrywaczy z automatyczną segregacją próbek zamkniętych, np. układów scalonych, operator wrzuca do pojemnika po 1 obudowie, a po cyklu badania próbka wypada do specjalnego zbiornika. W takim przypadku należy sprawdzić, czy wrzucanie, a następnie wypadanie próbki nie powoduje gięcia się wyprowadzeń układu. Może okazać się konieczne umieszczanie obudowy przed badaniem w osłonie chroniącej wyprowadzenia.

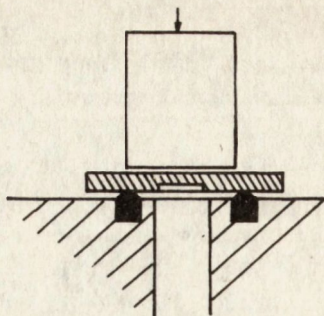
To samo dotyczy pojemników do nasycenia obudów helem. Tutaj stosuje



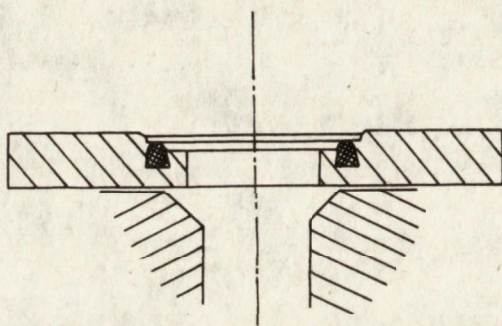
Rys. 15a



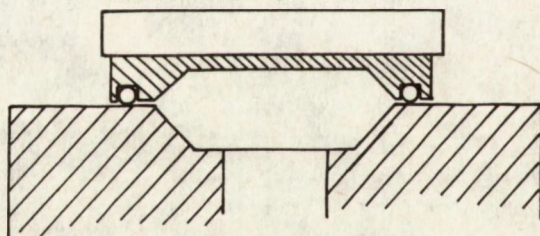
Rys. 15b



Rys. 15c



Rys. 15d



Rys. 15e

Rys. 15. Przykłady uchwytów i pojemnika
 a/ uchwyt obejmowy, b/ uchwyt małej obudowy elementu elektronicznego,
 c/ uchwyt obudowy płaskiej układu scalonego, d/ uchwyt do dużych obudów
 stosowany w HWN wyspecjalizowanym, e/ pojemnik stosowany w metodzie
 nadciśnieniowo-próżniowej do badania szczelności elementów elektronicznych

się zwykle szyny osłaniające obudowy, co narzuca wymagania dotyczące kształtu pojemników do nasycania.

6.2. Pamięć helowa wykrywaczy

Pamięć helowa polega na tym, że w przypadku dużej porcji helu, który wskutek dużego nacieku dostanie się do HWN, następuje absorpcja helu przez elementy składowe wykrywacza. Absorbowany hel kumuluje się i po kilku cyklach badań i po dużej liczbie nieuszczelnionych próbek jego tło w wykrywaczu może być większe od wielkości dopuszczalnego nacieku. W tym okresie wykrywacz jest "ślepy" a zatem nie do użytku.

Głównymi absorbentami helu są gumowe uszczelki, warstwy oleju w przewodach próżniowych /zwłaszcza po stronie wstępnej/, pompa obrotowa, przewody z tworzyw sztucznych, głowice manometrów jarzeniowych.

Jedynym remedium na tło helowe to pompowanie układu próżniowego, a ponadto utrzymywanie w czystości i ewentualna wymiana uszczelek, zwłaszcza w uchwytach próbek.

Pamięć helowa najbardziej zakłóca wykrywacze wyspecjalizowane, bowiem wpływa na wydajność wykrywacza.

Na rys. 16 przedstawiono przykłady małej i dużej pamięci helowej wykrywacza wyspecjalizowanego. Po dużym sygnale helu /duża nieuszczelnność/ oznaczonym jako 0, już po 0,5 minuty /rys. 16a/ wykrywacz jest gotowy do pracy. Oznacza to stratę 3 cykli pracy /cykl w tym przypadku wynosił 15 s/. W przypadku dużej pamięci /rys. 16b/ wykrywacz jest zdolny do pracy dopiero po 6 minutach, co oznacza stratę 24 cykli badania.

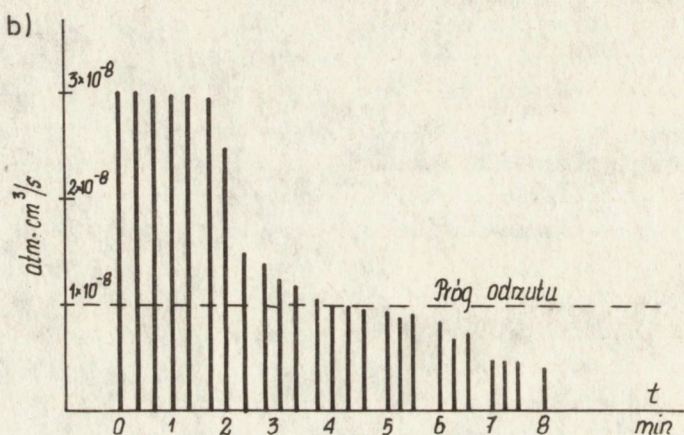
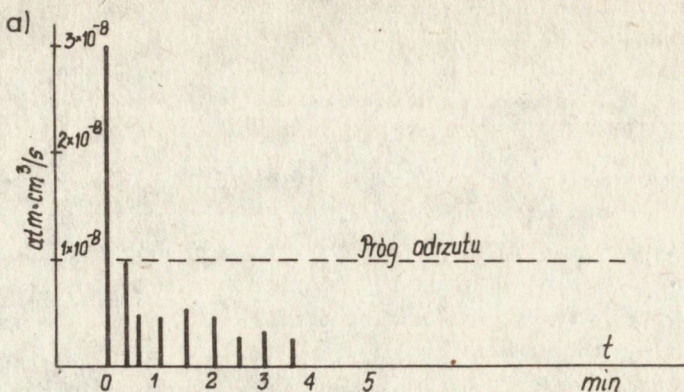
Jak więc widać, duża pamięć helowa ma wpływ na:

- prawidłowość oceny szczelności próbki - istnieje możliwość przekłamania wyników,
- wydajność wykrywacza.

Walka z pamięcią helową jest bardzo trudna. Niektóre firmy zalecają, by wykrywacze a przynajmniej ich część próżniowa, pracowały non-stop, przez całą dobę. W okresie, gdy nie sprawdza się szczelności, następuje desorpcja helu i oczyszczanie urządzenia. Innym sposobem jest wymiana uszczelek w uchwytach. Nadają się one do powtórnego użytku po pewnym okresie. Trzeba jednak zawsze sprawdzić, czy nastąpiła dostateczna desorpcja helu z gumy. Wymiana pompy obrotowej jest zabiegiem trudniejszym ale nieraz koniecznym.

W każdym przypadku stałe pompowanie układu próżniowego jest zabiegiem na pewno wskazanym dla zwalczania pamięci helowej.

Zdarza się, że tło helu w wykrywaczu nie wynika z absorpcji helu przez elementy wykrywacza. Na ten fakt należy zwrócić uwagę,



Rys. 16. Sygnały HWN obrazujące zjawisko pamięci helowej
a/ pamięć krótka, b/ pamięć długa

zwłaszcza przy badaniach dużych zbiorników metodą ciśnieniową, w laboratorium, gdzie bada się duże liczby próbek oraz przy wykrywaczach wyspecjalizowanych.

W powietrzu, w warunkach normalnych, znajduje się ilość helu odpowiadająca sygnałowi na wykrywaczu $5 \cdot 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. Jednak w przypadku braku wentylacji, hel pochodzący z odmuchu gromadzi się w pomieszczeniu i jego koncentracja w powietrzu może tak wzrosnąć, że każde zapowietrzenie układu wywołuje tło helu w wykrywaczu na poziomie nawet dwa rzędy wyższym.

Niektóre firmy zalecają przed wyjęciem próbki z uchwytu, zapowiet-

rzanie układu próżniowego azotem. Należy jednak sprawdzić, czy poziom helu w azocie jest dostatecznie niski.

Aby więc uniknąć nadmiernego tła helowego, pomieszczenie, w którym pracuje wykrywacz, powinno być wentylowane.

6.3. Czułość wykrywaczy

Czułość wykrywaczy gwarantowanych przez producenta jest dla helu zwykle na poziomie 10^{-12} Pa·m³/s. Czułość wykrywacza może się zmieniać w czasie jego eksploatacji. Instrukcje producentów podają szczegółowe postępowanie w przypadku spadku czułości.

W tym miejscu natomiast warto wspomnieć o sprawdzaniu czułości w sposób rutynowy. Służą do tego celu nacieki wzorcowe, które wydzielają określone ilości helu. W handlu spotyka się zwykle nacieki o zakresie natężenia nieszczelności 10^{-8} + 10^{-9} Pa·m³/s. Dokładna wartość jest podana na nacieku jak również temperatura, w której dokonano kalibracji. Naciek umieszcza się na wejściu wykrywacza i sprawdza wskazania HWN.

Należy zwrócić uwagę na następujące dane, zwykle podawane przez producenta nacieku /np. przez firmę Alcatel/:

- dokładność nacieku $\pm 10\%$,
- współczynnik temperaturowy $3\%/^{\circ}\text{C}$,
- roczny ubytek wartości 2% .

Jeżeli więc naciek był wyprodukowany kilka lat wcześniej, to - w danej temperaturze kalibracji - wartość natężenia jego nieszczelności należy odpowiednio skorygować.

Istnieją też na rynku nacieki wzorcowe na zakres 10^{-4} + 10^{-5} Pa·m³/s. Działają one zgodnie z zasadą nadmuchu helu i służą do kalibracji aparatury w metodzie próżniowej przy badaniu dużych obiektów /pompowanie równoległe/.

Warto również zwrócić uwagę na niestabilność wskazań wykrywacza. Jest to zwykle spowodowane nierównomiernym pompowaniem helu przez pompę dyfuzyjną. Aby poprawić stabilność pompowania, producenci stosują rozmaite metody, np. podnoszą temperaturę grzałki w pompie dyfuzyjnej zwiększając jej moc o $30+40\%$. W miarę eksploatacji pompy, mogą występować zmiany w grzejniku pompy, co może pociągnąć spadek szybkości pompowania, a więc również zmiany czułości spektrometru.

Aby być pewnym, czy wykrywacz prawidłowo pokazuje natężenie nieszczelności, należy codziennie kontrolować jego wskazania za pomocą nacieku wzorcowego.

6.4. Przygotowanie próbek

Próbki przed badaniami powinny być czyste, wolne od zatłuszczeń, pyłów, wody. Znane jest w praktyce pojawianie się i zanikanie nieszczelności w tej samej próbce podczas kolejnych testów. Dotyczy to zwłaszcza próbek, które są badane na nacieki o bardzo małych natężeniach nieszczelności, np. 10^{-10} Pa·m³/s.

Przed sprawdzeniem szczelności należy unikać mycia elementów wodą lub innymi cieczami. Wiadomo, że woda w cienkich kapilarach jest bardzo trudna do usunięcia nawet w próżni i w podwyższonej temperaturze. Jeżeli ze względów technologicznych płukanie jest konieczne, to trzeba tego dokonać w cieczach lotnych i suszyć w strumieniu gorącego powietrza.

Uzupełniające testy na duże nieszczelności obudów elementów elektronicznych, w których wykorzystuje się obserwacje pęcherzyków powietrza wydzielających się z obudowy po jej zanurzeniu w cieczy, wykonuje się zawsze po badaniach na HWN a nigdy wcześniej.

7. WYKRYWANIE NIESZCZELNOŚCI W OBUDOWACH ELEMENTÓW ELEKTRONICZNYCH

7.1. Podstawowe określenia

Elementy elektroniczne są hermetyzowane dla uniknięcia wpływu atmosfery na ich pracę. Hermetyzacji dokonuje się najczęściej stosując tworzywa sztuczne. Te elementy, które muszą być odporne na wyjątkowo surowe warunki otoczenia, hermetyzuje się umieszczając je w obudowach metalowo-ceramicznych lub metalowo-szklanych. Przyjęta powszechnie nomenklatura określa takie obudowy jako hermetyczne. W związku z tym podlegają one kontroli szczelności i pomiary kontrolne prowadzi się za pomocą wykrywaczy nieszczelności, najczęściej HWN.

Na ogół graniczne wartości natężenia nieszczelności są zawarte w przedziale 10^{-9} – 10^{-7} Pa·m³/s / 10^{-8} – 10^{-6} atm·cm³/s/.

Ponieważ sygnał na HWN zależy od warunków przygotowania obiektów /ciśnienie, czas nasycania, czas leżakowania/, wprowadzono pojęcie równoważnego natężenia nieszczelności dla warunków standardowych.

Powszechnie stosowana w świecie norma amerykańska MIL STD 833, met. 1013 definiuje:

- standardowe natężenie nieszczelności jako ilość suchego powietrza wyrażonego w cm³, w 25°C, przepływającego przez nieszczelność w czasie 1 s, jeśli po jednej stronie panuje ciśnienie 1 atm, zaś po drugiej ciśnienie jest mniejsze niż 1 Tr;

- mierzone natężenie nieszczelności /R/ jako natężenie nieszczelności danej obudowy w określonych warunkach, zmierzone za pomocą HWN;
- równoważne standardowe natężenie nieszczelności L danej obudowy o zmierzonej wartości R, jako natężenie nieszczelności w warunkach standardowych.

Zależność pomiędzy R i L określa wzór

$$R = \frac{L P_E}{P_0} \left(\frac{M_A}{M} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{L t_1}{V P_0} \left(\frac{M_A}{M} \right)^{1/2} \right] \right\} \exp \left[- \frac{L t_2}{V P_0} \left(\frac{M_A}{M} \right)^{1/2} \right] \quad /13/$$

gdzie:

- R - mierzone natężenie nieszczelności [atm·cm³/s],
- L - równoważne standardowe natężenie nieszczelności [atm·cm³/s],
- P_E - ciśnienie nasycenia helum [atm],
- P₀ - ciśnienie atmosferyczne [1 atm],
- M_A - ciężar molekularny powietrza - 28,7,
- M - ciężar molekularny helu - 4,
- t₁ - czas nasycania [s],
- t₂ - czas leżakowania [s],
- V - objętość komory obudowy [cm³].

Wyżej wspomniana norma podaje dwa kryteria:

- A₁ - dla obudów o objętości V ≤ 0,1 cm³ wartość sygnału R na HWN nie powinna przekraczać 5·10⁻⁸ atm·cm³/s.

Dla tego kryterium norma określa następujące warunki:

- P_{E min.} = 5 atm,
- t_{1 min.} = 3600 s,
- t₂ = 1800 s.

- A₂ - dla obudów o objętości V ≤ 0,1 cm³ maksymalne równoważne natężenie nieszczelności wynosi 5·10⁻⁷ atm·cm³/s.

Dla tego kryterium warunki dobiera się w sposób podany w rozdz. 7.2. Odpowiednie wartości dla obudów o objętości V > 0,1 cm³ określa się na poziomie 5·10⁻⁷ i 5·10⁻⁶ atm·cm³/s.

Czy można normę MIL i podane przez nią kryteria odrzutu uznać za zawsze ważne?

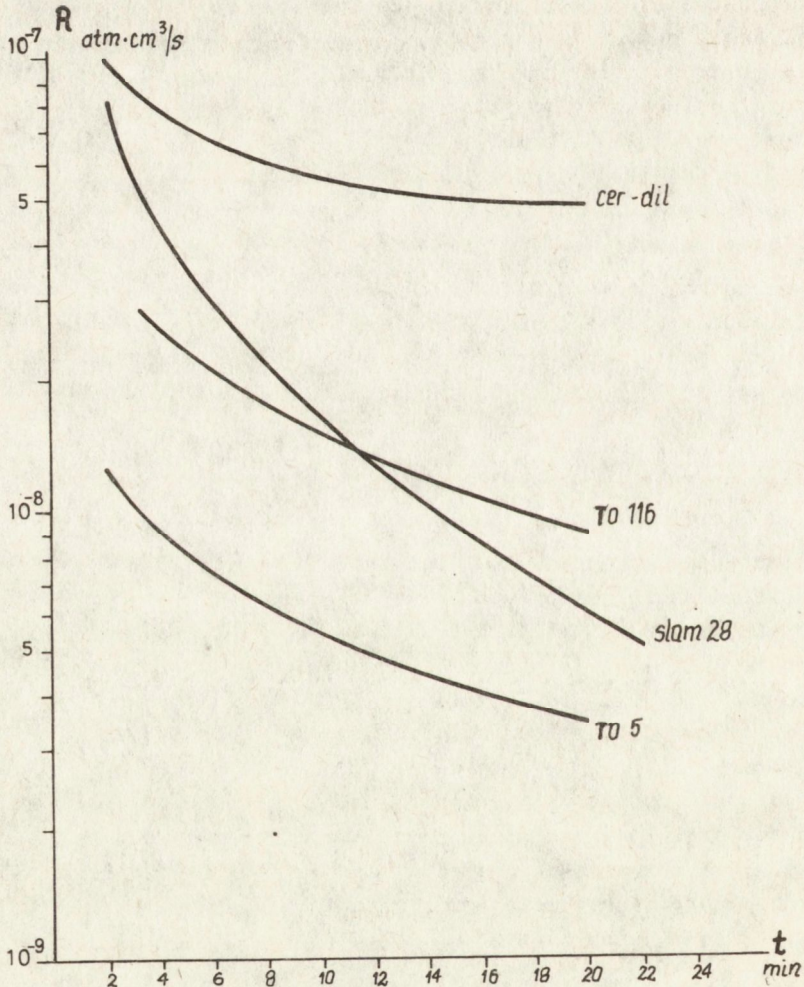
Trzeba sobie zdać sprawę, że mogą zaistnieć takie warunki, że granica dopuszczalnego natężenia nieszczelności musi być przesunięta w stronę wyższych wartości. Powodem tego może być tło helowe pochodzące z zaabsorbowanego helu przez materiał obudowy w czasie jej nasycania.

7.2. Wyznaczanie parametrów kontroli szczelności obudów

Pierwszą czynnością przy wyznaczaniu charakterystycznych parametrów procesu kontroli szczelności elementów elektronicznych jest pomiar tła helowego. W tym celu:

- umieszcza się niezahermetyzowane obudowy w zbiorniku z helem pod ciśnieniem 1 ± 3 atm i pozostawia przez 1 ± 3 h,
- dokonyje się pomiaru wartości sygnału helu pochodzącego z obudowy w funkcji czasu upływającego od wyciągnięcia obudowy z atmosfery helu.

Jako wynik otrzymuje się krzywe desorpcji helu w funkcji czasu leżakowania na powietrzu.



Rys. 17. Krzywe desorpcji helu z różnych obudów

Na rys. 17 pokazano krzywe desorpcji helu z różnych obudów. Weźmy jako przykład obudowę cer-dil. Odnacza się ona powolną desorpcją helu. Początkowo tło jest na poziomie 10^{-7} atm·cm³/s, po 15 minutach spada do $5 \cdot 10^{-8}$ atm·cm³/s. Dalszy spadek jest bardzo powolny.

Z krzywej można wywnioskować, że kryterium A_1 /MIL/ jest niemożliwe do przyjęcia, bo sygnał tła jest równy po 15 minutach wartości dopuszczalnego nacieku.

Tymczasem przyjmuje się, że tło powinno być oddalone od granicy co najmniej o 1/2 rzędu.

Wobec tego należy sprawdzić, czy jest możliwe zastosowanie kryterium A_2 /MIL/.

W tym celu trzeba znaleźć zależność pomiędzy sygnałem zmierzonym R na HWN, a równoważną standardową wartością natężenia nieszczelności L /wzór 13/.

W praktyce dla znalezienia tej zależności korzysta się z tablic /patrz załącznik do niniejszego opracowania/.

Na rys. 18 przedstawiono krzywe $R = f/L$ dla omawianej obudowy. Przyjęto $P_E = 3$ atm, $t_1 = 10800$ s /3 h/, $t_2 = 900, 1200$ i 1800 s. Objętość komory obudowy wynosi $0,030$ cm³.

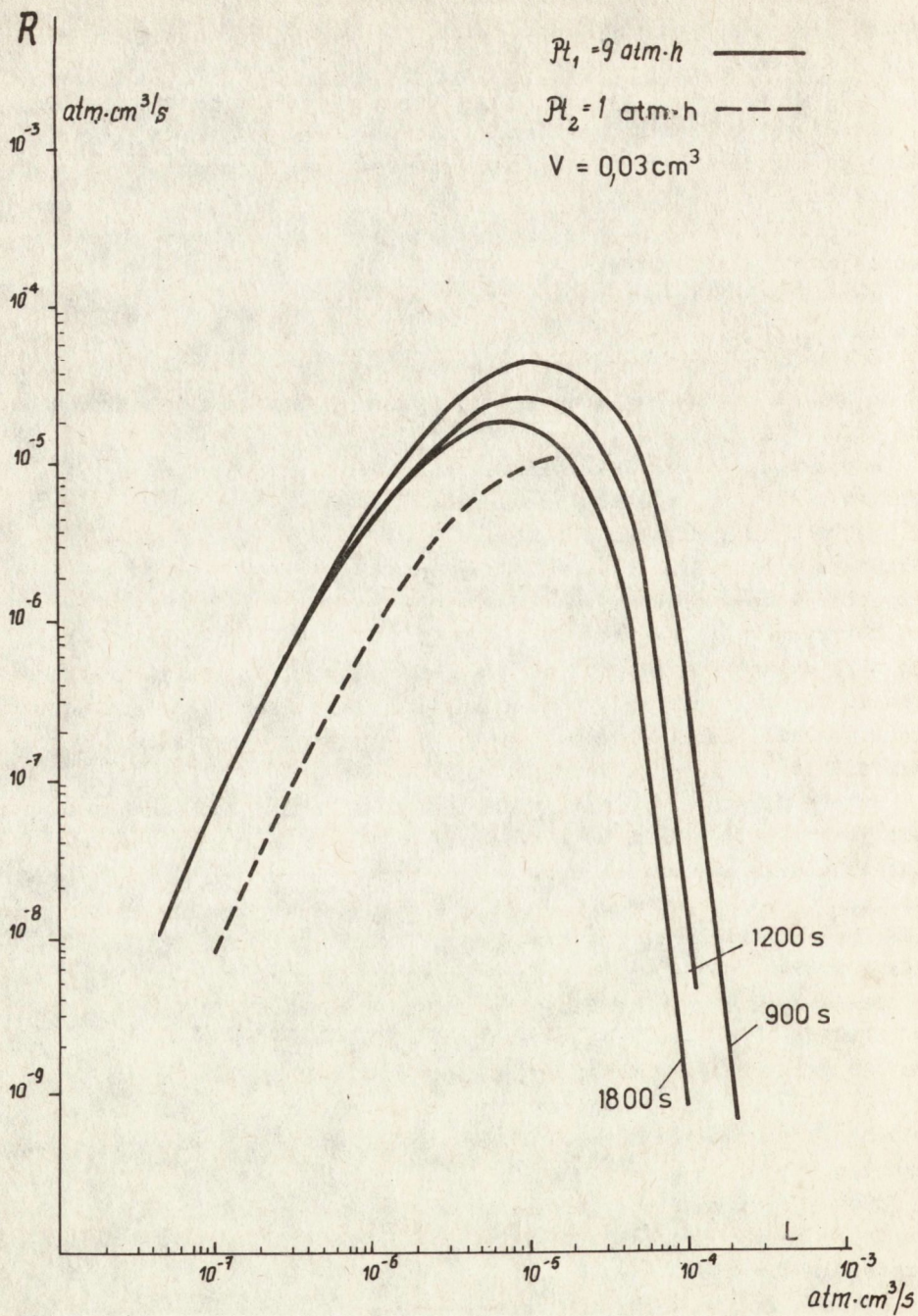
Z krzywych wynika, że dla $L = 5 \cdot 10^{-7}$ atm·cm³/s /granica odrzutu wg A_2 /, sygnał HWN $R = 1,5 \cdot 10^{-6}$ atm·cm³/s, a zatem powyżej tła /po 15 min leżakowania/. Wynika stąd, że kryterium A_2 może mieć zastosowanie. Każda obudowa o zmierzonej nieszczelności większej niż $1,5 \cdot 10^{-6}$ atm·cm³/s jest więc zła.

Jeżeli równocześnie bada się 10 obudów, to tło odpowiednio wzrasta ale jest ciągle niższe od granicznej wartości mierzonego nacieku. Istnieje więc odpowiedni margines swobody. Krzywe na rys. 18 zostały obliczone dla $t_1 = 10800$ s /3 h/. Ze względów praktycznych, wskazane jest jednak skrócenie czasu nasycania helem, zwłaszcza gdy dysponuje się HWN wyspecjalizowanym o bardzo dużej wydajności.

Jak wpływa skrócenie czasu nasycania t_1 pokazano na rys. 18 linią przerywaną. Przyjęto $P_E = 1$ atm i $t_1 = 3600$ s /1 h/. Z krzywej wynika, że granicznej wartości wg kryterium A_2 odpowiada wartość $R = 2,5 \cdot 10^{-7}$ atm·cm³/s. Wynika stąd wniosek, że przy jednoczesnym badaniu 3 obudów tło helowe zbliża się do wartości granicznej mierzonego sygnału.

Zyskując więc na czasie nasycania /co jest związane z liczbą komór do nasycania/ tracimy na liczbie sztuk obudów, które jednocześnie można badać.

Przeanalizujmy teraz jaka jest swoboda w dysponowaniu czasem t_2 leżakowania. Wiemy już, że najkrótszy czas t_2 min. wynosi 15 minut /odczytane z krzywej desorpcji/. Jaki jest możliwy najdłuższy czas leżakowania?



Rys. 18. Zależność $R = f/L$

Z krzywych na rys. 18 wynika, że dla zmierzonego sygnału $R = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ /wartość graniczna/ mamy trzy wartości L , które wynoszą odpowiednio $1 \cdot 10^{-4} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ - dla $t_2 = 900 \text{ s}$, $7 \cdot 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ - dla $t_2 = 1200 \text{ s}$ i $5 \cdot 10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ - dla $t_2 = 1800 \text{ s}$.

Z powyższych wywodów widać, że pomiar za pomocą HWN nie daje jednoznacznej odpowiedzi o wartości realnego nacieku /o czym mówiono już poprzednio/ i musi być uzupełniony testem dodatkowym, który wyeliminuje obudowy o dużych nieszczelnościach. Może to być popularny test pęcherzykowy polegający na umieszczeniu obudowy w gorącej cieczy i obserwowaniu wydzielania się pęcherzyków.

Test pęcherzykowy, przy znacznych trudnościach eksperymentalnych, sięga swoją czułością do zakresu $10^{-5} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$. Z analizowanych krzywych wynika, że czas leżakowania na pewno nie powinien być dłuższy niż 30 min. W przypadku dłuższego czasu, powstanie luka między zakresem pomiaru HWN i zakresem skuteczności testu pęcherzykowego.

Mamy więc określone dwa czasy leżakowania: minimalny 15 minut i maksymalny 30 minut. Na badanie za pomocą HWN pozostaje więc 15 minut czasu.

Jak widzieliśmy, wzrost wartości P_E i t_1 lub inaczej mówiąc wzrost wartości iloczynu $P_E t_1$ wpływa na przesunięcie się lewej gałęzi krzywej $R = f/L$ w stronę niższych wartości L .

Wprowadźmy pojęcie najmniejszego równoważnego natężenia nieszczelności L_m . Jeżeli założymy istnienie granicznej wartości $t_{\lambda} R$, to po przekształceniu i przyjęciu założeń upraszczających wzoru /13/ dla przepływu molekularnego, otrzymuje się zależność $P_E t_1 = f/L_m$

$$P_E t_1 = \frac{RV}{L_m^2} \cdot \frac{M}{MA} \quad /14/$$

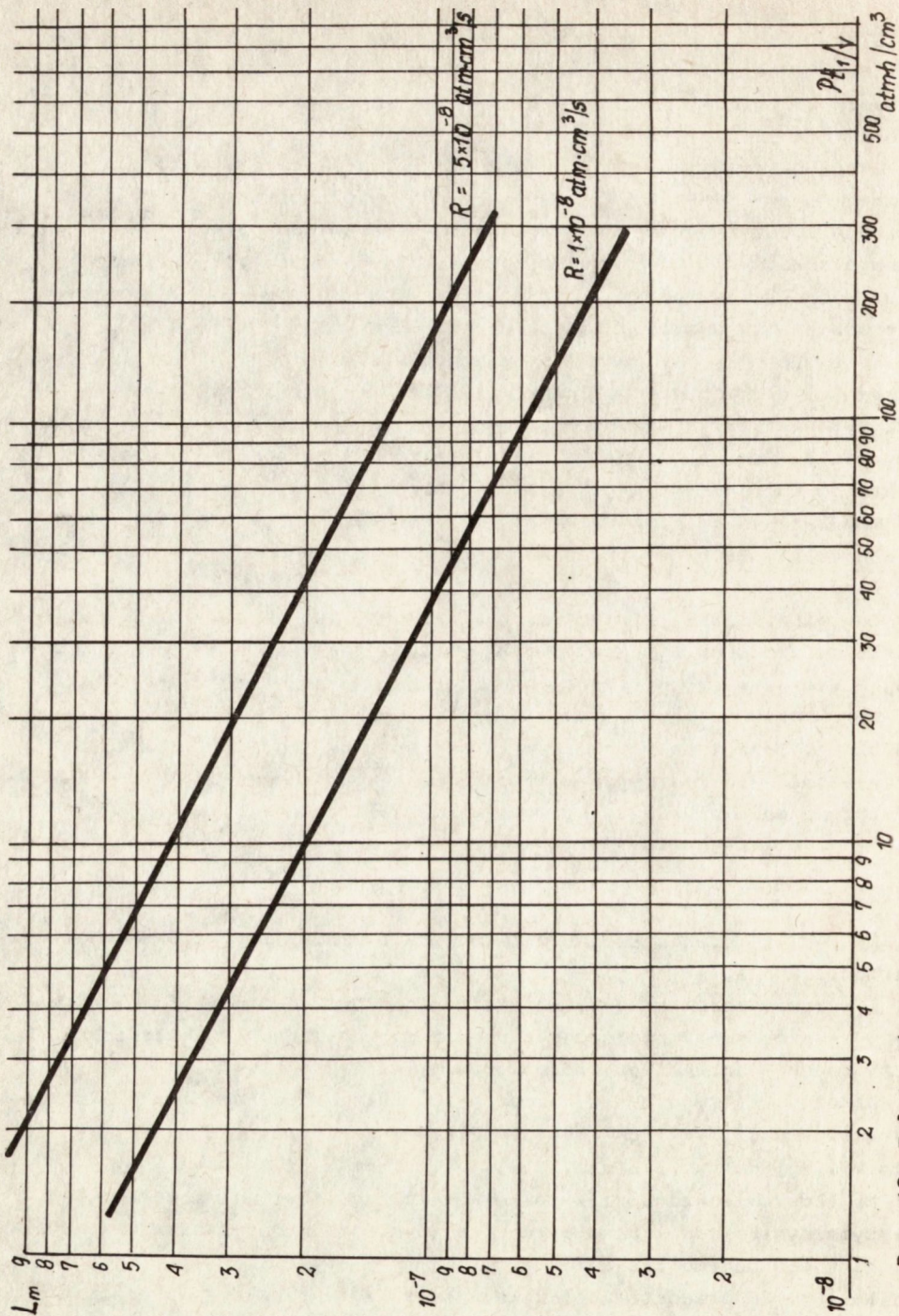
Na rys. 19 przedstawiono zależność $P_E t_1 / V = f/L_m$ dla dwóch wartości R przyjętych jako granicę $t_{\lambda} R$ $5 \cdot 10^{-8}$ i $1 \cdot 10^{-8} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$.

Z wykresu można odczytać, jaka powinna być wartość $P_E t_1$ dla przyjętej wartości najmniejszego równoważnego natężenia nieszczelności L_m przy znanej wartości objętości obudowy V .

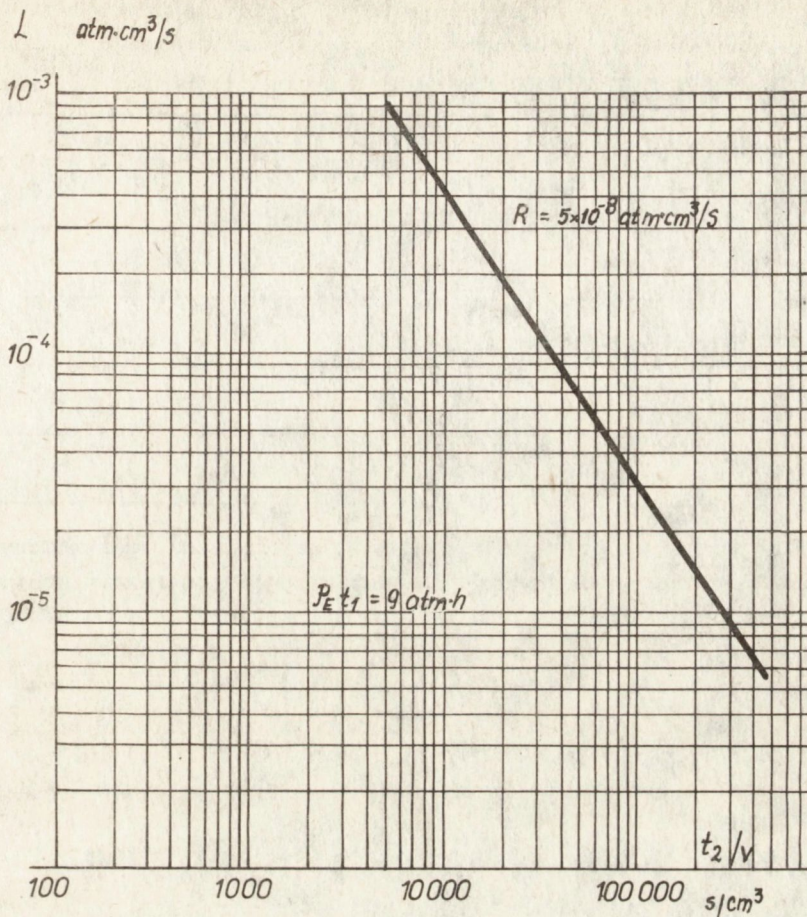
Założmy, że sygnał $t_{\lambda} R$ wynosi $1 \cdot 10^{-8} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$. Wówczas dla obudowy o objętości $V = 1 \text{ cm}^3$ wartość $P_E t_1$ wyniesie ok. 120 atm·h, dla $V = 0,1 \text{ cm}^3$ - 12 atm·h, dla $V = 0,01 \text{ cm}^3$ - 1,2 atm·h.

Na podstawie wzoru /13/ można również obliczyć zależność pomiędzy maksymalnym czasem leżakowania t_2 a równoważnym natężeniem nieszczelności L dla danego $t_{\lambda} R$.

Na rys. 20 przedstawiono zależność $t_2 / V = f/L$ dla wartości $t_{\lambda} R$ $5 \cdot 10^{-8} \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{s}$ i dla wartości $P_E t_1 = 9 \text{ atm} \cdot \text{h}$.



Rys. 19. Zależność najmniejszego równowaznego natężenia nieszczelności L_m od warunków nasycania



Rys. 20. Zależność pomiędzy czasem leżakowania t_2 a wielkością równoważnego natężenia nieszczelności L^2

Tabela 4 uwidacznia swobodę w dysponowaniu czasem leżakowania t_2 w zależności od wartości L i objętości V .

Z tabeli widać, że dla małych objętości obudów, dla wartości L powyżej $10^{-4} \text{ atm}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$ swoboda ta nie istnieje, zaś dla niższych wartości L jest bardzo ograniczona. Pomiar nieszczelności obudów o bardzo małych objętościach, metodą nadciśnieniowo-próżniową, jest więc obciążony znaczną niepewnością.

Tabela 4. Maksymalny czas leżakowania t_2 obudowy w zależności od wielkości równoważnego natężenia nieszczelności L dla różnych objętości obudowy

V [cm ³] L [atm·cm ³ /s]	t ₂ [s]		
	1	0,1	0,01
1·10 ⁻³	4600	460	46
5·10 ⁻⁴	9000	900	90
1·10 ⁻⁴	40000	4000	400
5·10 ⁻⁵	60000	6000	600

Powyżej pokazano tok rozumowania przy wyznaczaniu zasadniczych parametrów koniecznych do kontroli szczelności obudów zamkniętych. Takie postępowanie należy wykonać dla każdego nowego typu obudowy.

Zreasumujmy powyższe wywody. Postępowanie dla wyznaczania parametrów kontroli obudów zamkniętych sprowadza się do następujących czynności:

- określenie objętości obudowy,
- wyznaczenie krzywej desorpcji helu i określenie minimalnej wartości t_2 ,
- sprawdzenie, czy da się zastosować kryterium A_1 /MIL/, jeżeli nie to:
- wyznaczenie dla wartości t_2 R po czasie t_2 min. i dla L równego $5 \cdot 10^{-7}$ atm·cm³/s odpowiedniej wartości $P_{E t_1}$,
- wyznaczenie krzywej $R = f/L$ /patrz tablice/ i sprawdzenie, czy jest możliwe zastosowanie kryterium A_2 /MIL/,
- wyznaczenie progu odrzutu R /sygnału na HWN/ odpowiadającego wartości równoważnej $L = 5 \cdot 10^{-7}$ atm·cm³/s.

Jeżeli kryterium A_2 nie może być przyjęte, wyznaczenie innego kryterium odrzutu;

- wyznaczenie wartości maksymalnego czasu leżakowania $t_{2 \max}$.

Trzeba zaznaczyć, że obliczenia wyżej przytoczone są oparte o szereg upraszczających założeń. Podane więc wartości mają charakter orientacyjny i wymagają zawsze eksperymentalnej weryfikacji.

Należy zwrócić specjalną uwagę na parametry badania w przypadku obudów o bardzo małej objętości, np. rzędu 10^{-3} cm³. Krzywa $R = f/L$ dla małych V przesuwają się w lewo i w dół /patrz tablice przeliczeń/.

W efekcie dysponuje się znikomym marginesem czasu dla pomiaru za pomocą HWN. Może się zdarzyć, że wobec tła helowego spowodowanego obudową, pomiędzy zakresem HWN a zakresem testu pęcherzykowego wytwarza się luka dochodząca do dwóch rzędów. W takim przypadku test na HWN staje się mało przydatny i do kontroli szczelności należy poszukiwać innych, pośrednich metod.

7.3. Wykrywanie nieszczelności metodami pęcherzykowymi

W poprzednim rozdziale wspomniano, że dla określenia szczelności obudów elementów elektronicznych konieczne jest stosowanie uzupełniających metod wykrywania dużych nieszczelności. Do takich, powszechnie stosowanych metod należy tzw. test pęcherzykowy.

Metody pęcherzykowe polegają na umieszczeniu badanej obudowy w cieczy i obserwowaniu, czy wydzielają się pęcherzyki gazu. Niezależnie od warunków badania, tzn. użytej cieczy, jej temperatury czy uprzedniego potraktowania obudowy, metoda polega na obserwacji wzrokowej lub przy zastosowaniu szkła powiększającego.

Czułość metody zależy od:

- napięcia powierzchniowego cieczy,
 - różnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem obudowy a ciśnieniem nad cieczą.
- Amerykańska norma ASTM /Des.F 98-72/ podaje ciecze i warunki badania.

W tabeli 5 podano niektóre ciecze podane przez powyższą normę.

Warunek A oznacza: element zanurza się w cieczy,

warunek B oznacza: element uprzednio nasycony helem zanurza się w cieczy,

warunek C oznacza: nad cieczą wytwarza się próżnię.

Woda dejonizowana ze zmiękczaczem, freony i oleje silikonowe należą do najczulszych cieczy. Alkohol jest w drugiej kolejności. Najpowszechniej są stosowane freony.

Norma MIL STD 833 sugeruje stosowanie freonów FC-40, FC-43, FC-48, PP-7, PP-9, FR-E4. Badanie przeprowadza się w 125°C zanurzając obudowę o 5 cm poniżej powierzchni cieczy i przeprowadza obserwację przez 30 sekund /badanie C₁/. Druga metoda proponowana przez normę polega na nasycaniu obudów niskowrzącym freonem /np. FC-77, FC-78, FR-E2/ pod ciśnieniem przez kilka godzin a następnie zanurzanie w freonie wysokowrzącym /np. FC-43/ w temperaturze 125°C.

Norma określa czułość w pierwszym przypadku na 10⁻³ atm·cm³/s, w drugim przypadku 10⁻⁵ atm·cm³/s. Można uczulić metodę C₁ o ponad jeden rząd poprzez nasycanie obudów helem lub, co jest bardziej ekonomiczne, mieszaniną helu i azotu. Stwierdzono, że nasycanie obudowy helem i stosowanie jako cieczy alkoholu w podwyższonej temperaturze

Tabela 5. Ciecze i warunki badania zalecane do wykrywania nieszczelności metodami pęcherzykowymi

Ciecz	Warunki badania		
	A	B	C
Olej silikonowy, 120°C	x	x	
Dejonizowana woda + 1÷2% zmiękczacza, 80°C	x	x	
Denaturowany alkohol, 25°C		x	
Freon FC-43, 125°C	x	x	
Freon FC-78, 25°C		x	
Olej silikonowy, 25°C			x

x - zalecane warunki badania.
 Warunek A oznacza: element zanurza się w cieczy,
 B oznacza: element uprzednio nasycony helem zanurza się w cieczy,
 C oznacza: nad cieczą wytwarza się próżnię.

/50±60°C/ uczuła bardzo metodę tak, że sięga ona czułością do zakresu 10^{-5} atm·cm³/s.

Stosowanie oleju silikonowego jest niepraktyczne ze względu na konieczność odmywania obudów po badaniu.

Dla wiarygodnego testu pęcherzykowego jest konieczne:

- stosowanie filtrowanych cieczy celem uwolnienia się od zawiesin,
- stałe utrzymywanie temperatury cieczy w granicach 5°C,
- stosowanie temperatur cieczy dostatecznie oddalonych od ich temperatury wrzenia,
- odpowiednie oświetlenie naczynia, w którym wykonuje się badanie,
- dobry wzrok operatora.

Uczulanie metod przez nasywanie helem pod ciśnieniem pociąga za sobą konieczność odpowiedniego wyposażenia oraz przestrzegania czasu leżakowania. Czas ten należy przyjmować podobnie jak to pokazano w rozdziale 7.2. Trzeba jednak zwrócić uwagę, że czas t_1 min. w tym przypadku nas nie obowiązuje, natomiast dopuszczalny czas trwania badania na pęcherzyki określa wartość t_2 max.

Na rynku są znane wyspecjalizowane firmy produkujące urządzenia do wykrywania nieszczelności za pomocą pęcherzyków /np. Trio-Tech, USA/. Urządzenia takie mają systemy stabilizacji temperatury, mierniki temperatury, specjalne rozwiązania oświetlenia, systemy skraplania par

freonu. W urządzeniach takich jednocześnie sprawdza się kilkadziesiąt obudów.

/Tekst dostarczone 1985.10.18./

8. TABLICE^{x/} WARTOŚCI $R = f/L/$

Niniejsze tablice obliczono na podstawie wzoru

$$R = \frac{L P_E}{P_0} \left(\frac{M_A}{M} \right)^{1/2} \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{L t_1}{V P_0} \left(\frac{M_A}{M} \right)^{1/2} \right] \right\} \exp \left[- \frac{L t_2}{V P_0} \left(\frac{M_A}{M} \right)^{1/2} \right]$$

dla wartości:

t_1 - 3600, 7200, 10800 s

t_2 - 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800 s

V - 0,005, 0,01, 0,02, 0,03, 0,04, 0,05, 0,07, 0,1, 0,5 cm³

P_E - 1 atm

L - od $1 \cdot 10^{-7}$ do $1 \cdot 10^{-3}$ atm·cm³/s

M_A - 28,7

M - 4

Na każdej stronie znajdują się wartości dla jednej objętości obudowy. W przypadku przyjęcia $P_E \neq 1$, znalezionej wartości R należy pomnożyć przez przyjętą wartość P_E .

^{x/} Program komputerowy i tablice opracował dr Mariusz Jarosz, za co autorzy wyrażają podziękowanie.

$$V = 0,005 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	4,62E-08	4,54E-08	4,47E-08	4,40E-08	4,33E-08	4,26E-08
5E-7	7,64E-07	7,05E-07	6,51E-07	6,00E-07	5,54E-07	5,12E-07
1E-6	1,94E-06	1,65E-06	1,41E-06	1,20E-06	1,02E-06	8,72E-07
5E-6	5,99E-06	2,68E-06	1,20E-06	5,38E-07	2,40E-07	1,07E-07
1E-5	5,36E-06	1,07E-06	2,15E-07	4,32E-08	8,66E-09	1,73E-09
5E-5	4,33E-08	1,40E-11	4,54E-15	1,46E-18		
1E-4	2,80E-11	2,93E-18				
5E-4	1,68E-38					
1E-3	0,0					

$$V = 0,005 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	8,43E-08	8,30E-08	8,16E-08	8,03E-08	7,91E-08	7,78E-08
5E-7	1,05E-06	9,74E-07	8,99E-07	8,29E-07	7,65E-07	7,06E-07
1E-6	2,23E-06	1,90E-06	1,61E-06	1,37E-06	1,17E-06	9,99E-07
5E-6	5,99E-06	2,68E-06	1,20E-06	5,38E-07	2,40E-07	1,07E-07
1E-5	5,36E-06	1,07E-06	2,15E-07	4,32E-08	8,66E-09	1,73E-09
5E-5	4,33E-08	1,40E-11	4,54E-15	1,46E-18		
1E-4	2,80E-11	2,93E-18				
5E-4	1,68E-38	0,0				

$$V = 0,005 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,15E-07	1,13E-07	1,12E-07	1,10E-07	1,08E-07	1,06E-07
5E-7	1,16E-06	1,07E-06	9,94E-07	9,17E-07	8,46E-07	7,81E-07
1E-6	2,27E-06	1,93E-06	1,64E-06	1,40E-06	1,19E-06	1,01E-06
5E-6	5,99E-06	2,68E-06	1,20E-06	5,38E-07	2,40E-07	1,07E-07
1E-5	5,36E-06	1,07E-06	2,15E-07	4,32E-08	8,66E-09	1,73E-09
5E-5	4,33E-08	1,40E-11	4,54E-15			

$$V = 0,01 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	2,44E-08	2,42E-08	2,40E-08	2,38E-08	2,36E-08	2,34E-08
5E-7	4,92E-07	4,72E-07	4,54E-07	4,36E-07	4,19E-07	4,02E-07
1E-6	1,52E-06	1,41E-06	1,30E-06	1,20E-06	1,10E-06	1,02E-06
5E-6	8,88E-06	5,94E-06	3,97E-06	2,66E-06	1,78E-06	1,19E-06
1E-5	1,19E-05	5,36E-06	2,40E-06	1,07E-06	4,81E-07	2,15E-07
5E-5	2,40E-06	4,33E-08	7,79E-10	1,40E-11	2,52E-13	4,54E-15
1E-4	8,66E-08	2,80E-11	9,08E-15			
5E-4	4,75E-21					

$$V = 0,01 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	4,66E-08	4,62E-08	4,58E-08	4,54E-08	4,51E-08	4,47E-08
5E-7	7,96E-07	7,64E-07	7,34E-07	7,05E-07	6,77E-07	6,51E-07
1E-6	2,11E-06	1,94E-06	1,79E-06	1,65E-06	1,53E-06	1,41E-06
5E-6	8,96E-06	5,99E-06	4,01E-06	2,68E-06	1,79E-06	1,20E-06
1E-5	1,19E-05	5,36E-06	2,40E-06	1,07E-06	4,81E-07	2,15E-07
5E-5	2,40E-06	4,33E-08	7,79E-10	1,40E-11	2,52E-13	4,54E-15
1E-4	8,66E-08	2,80E-11				
5E-4	4,75E-21					

$$V = 0,01 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	6,67E-08	6,62E-08	6,56E-08	6,51E-08	6,46E-08	6,41E-08
5E-7	9,83E-07	9,44E-07	9,07E-07	8,71E-07	8,37E-07	8,04E-07
1E-6	2,33E-06	2,15E-06	1,98E-06	1,83E-06	1,69E-06	1,56E-06
5E-6	8,96E-06	5,99E-06	4,01E-06	2,68E-06	1,79E-06	1,20E-06
1E-5	1,19E-05	5,36E-06	2,40E-06	1,07E-06	4,81E-07	2,15E-07
5E-5	2,40E-06	4,33E-08	7,79E-10	1,40E-11	2,52E-13	4,54E-15
1E-4	8,66E-08	2,80E-11				
5E-4	7,75E-21					

$$V = 0,02 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,25E-08	1,25E-08	1,24E-08	1,24E-08	1,23E-08	1,23E-08
5E-7	2,81E-07	2,75E-07	2,70E-07	2,64E-07	2,59E-07	2,54E-07
1E-6	9,84E-07	9,45E-07	9,08E-07	8,72E-07	8,38E-07	8,05E-07
5E-6	9,97E-06	8,15E-06	6,67E-06	5,45E-06	4,46E-06	3,65E-06
1E-5	1,77E-05	1,18E-05	7,95E-06	5,32E-06	3,56E-06	2,38E-06
5E-5	1,79E-05	2,40E-06	3,23E-07	4,33E-08	5,81E-09	7,79E-10
1E-4	4,81E-06	8,66E-08	1,55E-09	2,80E-11	5,04E-13	
5E-4	2,52E-12	4,75E-21	8,96E-30			

$$V = 0,02 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	2,45E-08	2,44E-08	2,43E-08	2,42E-08	2,41E-08	2,40E-08
5E-7	5,02E-07	4,92E-07	4,82E-07	4,72E-07	4,63E-07	4,54E-07
1E-6	1,59E-06	1,52E-06	1,46E-06	1,41E-06	1,35E-06	1,30E-06
5E-6	1,08E-05	8,88E-06	7,27E-06	5,94E-06	4,86E-06	3,97E-06
1E-5	1,79E-05	1,19E-05	8,02E-06	5,36E-06	3,59E-06	2,40E-06
5E-5	1,79E-05	2,40E-06	3,23E-07	4,33E-08	5,81E-09	7,79E-10
1E-4	4,81E-06	8,66E-08	1,55E-09	2,80E-11	5,04E-13	9,08E-15
5E-4	2,52E-12	4,75E-21				

$$V = 0,02 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	3,59E-08	3,57E-08	3,56E-08	3,54E-08	3,53E-08	3,52E-08
5E-7	6,75E-07	6,62E-07	6,49E-07	6,36E-07	6,23E-07	6,11E-07
1E-6	1,96E-06	1,88E-06	1,81E-06	1,74E-06	1,67E-06	1,60E-06
5E-6	1,09E-05	8,95E-06	7,32E-06	5,99E-06	4,90E-06	4,00E-06
1E-5	1,79E-05	1,19E-05	8,02E-06	5,36E-06	3,59E-06	2,40E-06
5E-5	1,79E-05	2,40E-06	2,23E-07	4,33E-08	5,81E-09	7,79E-10
1E-4	4,81E-06	4,86E-08	1,55E-09	2,80E-11	5,04E-13	
5E-4	2,52E-12	4,75E-21				

$$V = 0,03 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	8,45E-09	8,42E-09	8,40E-09	8,38E-09	8,36E-09	8,33E-09
5E-7	1,96E-07	1,93E-07	1,91E-07	1,88E-09	1,85E-07	1,83E-07
1E-6	7,16E-07	6,97E-07	6,79E-07	6,61E-07	6,44E-07	6,27E-07
5E-6	9,36E-06	8,19E-06	7,16E-06	6,26E-06	5,48E-06	4,79E-06
1E-5	1,96E-05	1,50E-05	1,15E-05	8,80E-06	6,73E-06	5,15E-06
5E-5	3,50E-05	9,19E-06	2,40E-06	6,31E-07	1,65E-07	4,33E-08
1E-4	1,83E-05	1,26E-06	8,66E-08	5,95E-09	4,08E-10	2,80E-11
5E-4	2,04E-09	3,11E-15	4,75E-21			
1E-3	6,23E-15					

$$V = 0,03 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,66E-08	1,65E-08	1,65E-08	1,65E-08	1,64E-08	1,64E-08
5E-7	3,63E-07	3,58E-07	3,53E-07	3,45E-07	3,44E-07	3,39E-07
1E-6	1,23E-06	1,20E-06	1,17E-06	1,14E-06	1,11E-06	1,08E-06
5E-6	1,12E-05	9,83E-06	8,60E-06	7,52E-06	6,58E-06	5,75E-06
1E-5	2,04E-05	1,56E-05	1,19E-05	9,15E-06	7,00E-06	5,36E-06
5E-5	5,50E-05	9,19E-06	2,40E-06	6,31E-07	1,65E-07	4,33E-08
1E-4	1,83E-05	1,26E-06	8,66E-08	5,95E-09	4,08E-10	2,80E-11
5E-4	2,04E-09	3,11E-15				
1E-3	6,23E-15					

$$V = 0,03 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	2,45E-08	2,44E-08	2,44E-08	2,43E-08	2,42E-08	2,42E-08
5E-7	5,05E-07	4,98E-07	4,92E-07	4,85E-07	4,79E-07	4,72E-07
1E-6	1,61E-06	1,57E-06	1,52E-06	1,48E-06	1,44E-06	1,41E-06
5E-6	1,16E-05	1,01E-05	8,88E-06	7,77E-06	6,80E-06	5,94E-06
1E-5	2,04E-05	1,56E-05	1,19E-05	9,17E-06	7,01E-06	5,36E-06
5E-5	3,50E-05	9,19E-06	2,40E-06	6,31E-07	1,65E-07	4,33E-08
1E-4	1,83E-05	1,26E-06	8,66E-08	5,95E-09	4,08E-10	2,80E-11
5E-4	2,04E-09	3,11E-15	4,75E-21			
1E-3	6,23E-15					

$$V = 0,04 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	6,36E-09	6,35E-09	6,34E-09	6,32E-09	6,31E-09	6,30E-09
5E-7	1,50E-07	1,49E-07	1,47E-07	1,46E-07	1,44E-07	1,43E-07
1E-6	5,62E-07	5,51E-07	5,40E-07	5,29E-07	5,18E-07	5,08E-07
5E-6	8,48E-06	7,67E-06	6,94E-06	6,27E-06	5,67E-06	5,13E-06
1E-5	1,99E-05	1,63E-05	1,33E-05	1,09E-05	8,92E-06	7,30E-06
5E-5	4,90E-05	1,79E-05	6,57E-06	2,40E-06	8,82E-07	3,23E-07
1E-4	3,59E-05	4,81E-06	6,46E-07	8,66E-08	1,16E-08	1,55E-09
5E-4	5,81E-08	2,52E-12	1,09E-16	4,75E-21	2,06E-25	
1E-3	5,04E-12					

$$V = 0,04 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,25E-08	1,25E-08	1,25E-08	1,25E-08	1,24E-08	1,24E-08
5E-7	2,84E-07	2,81E-07	2,78E-07	2,75E-07	2,72E-07	2,70E-07
1E-6	1,00E-06	9,84E-07	9,64E-07	9,45E-07	9,26E-07	9,08E-07
5E-6	1,10E-05	9,96E-06	9,01E-06	8,15E-06	7,37E-06	6,67E-06
1E-5	2,17E-05	1,77E-05	1,45E-05	1,18E-05	9,73E-06	7,95E-06
5E-5	4,90E-05	1,79E-05	6,57E-06	2,40E-06	8,82E-07	3,23E-07
1E-4	3,59E-05	4,81E-06	6,46E-07	8,66E-08	1,16E-08	1,55E-09
5E-4	5,81E-08	2,52E-12	1,09E-16	4,75E-21	2,06E-25	
1E-3	5,04E-12					

$$V = 0,04 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,85E-08	1,85E-08	1,85E-08	1,85E-08	1,85E-08	1,84E-08
5E-7	4,02E-07	3,98E-07	3,94E-07	3,90E-07	3,86E-07	3,82E-07
1E-6	1,35E-06	1,32E-06	1,29E-06	1,27E-06	1,24E-06	1,22E-06
5E-6	1,17E-05	1,06E-05	9,64E-06	8,72E-06	7,88E-06	7,13E-06
1E-5	2,18E-05	1,79E-05	1,46E-05	1,19E-05	9,80E-06	8,01E-06
5E-5	4,90E-05	1,79E-05	6,57E-06	2,40E-06	8,82E-07	3,23E-07
1E-4	3,59E-05	4,81E-06	6,46E-07	8,66E-08	1,16E-08	1,55E-09
5E-4	5,81E-08	2,52E-12	1,09E-16	4,75E-21	2,06E-25	8,96E-30
1E-3	5,04E-12					

$$V = 0,05 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	5,10E-09	5,10E-09	5,09E-09	5,08E-09	5,07E-09	5,06E-09
5E-7	1,22E-07	1,21E-07	1,20E-07	1,19E-07	1,18E-07	1,17E-07
1E-6	4,62E-07	4,54E-07	4,47E-07	4,40E-07	4,33E-07	4,26E-07
5E-6	7,64E-06	7,05E-06	6,51E-06	6,00E-06	5,54E-06	5,11E-06
1E-5	1,94E-05	1,65E-05	1,41E-05	1,20E-05	1,02E-05	8,72E-06
5E-5	5,99E-05	2,68E-05	1,20E-05	5,38E-06	2,40E-06	1,07E-06
1E-4	5,36E-05	1,07E-05	2,15E-06	4,32E-07	8,66E-08	1,73E-08
5E-4	4,33E-07	1,40E-10	4,54E-14	1,46E-17	4,75E-21	1,53E-24
1E-3	2,80E-10					

$$V = 0,05 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,01E-08	1,01E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
5E-7	2,33E-07	2,31E-07	2,29E-07	2,27E-07	2,25E-07	2,23E-07
1E-6	8,43E-07	8,30E-07	8,16E-07	8,03E-07	7,91E-07	7,78E-07
5E-6	1,05E-05	9,74E-06	8,99E-06	8,29E-06	7,65E-06	7,06E-06
1E-5	2,23E-05	1,90E-05	1,61E-05	1,37E-05	1,17E-05	9,99E-06
5E-5	5,99E-05	2,68E-05	1,20E-05	5,38E-06	2,40E-06	1,07E-06
1E-4	5,36E-05	1,07E-05	2,15E-06	4,32E-07	8,66E-08	1,73E-08
5E-4	4,33E-07	1,40E-10	4,54E-14	1,46E-17	4,75E-21	1,53E-24
1E-3	2,80E-10					

$$V = 0,05 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,50E-08	1,50E-08	1,49E-08	1,49E-08	1,49E-08	1,49E-08
5E-7	3,33E-07	3,31E-07	3,28E-07	3,25E-07	3,23E-07	3,20E-07
1E-6	1,15E-06	1,13E-06	1,12E-06	1,10E-06	1,08E-06	1,06E-06
5E-6	1,16E-05	1,07E-05	9,94E-06	9,17E-06	8,46E-06	7,81E-06
1E-5	2,27E-05	1,93E-05	1,64E-05	1,40E-05	1,19E-05	1,01E-05
5E-5	5,99E-05	2,68E-05	1,20E-05	5,38E-06	2,40E-06	1,07E-06
1E-4	5,36E-05	1,07E-05	2,15E-06	4,32E-07	8,66E-08	1,73E-08
5E-4	4,33E-07	1,40E-10	4,54E-14	1,46E-17	4,75E-21	1,53E-24
1E-3	2,80E-10					

$$V = 0,07 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	3,66E-09	3,65E-09	3,65E-09	3,64E-09	3,64E-09	3,63E-09
5E-7	8,86E-08	8,81E-08	8,76E-08	8,71E-08	8,66E-08	8,61E-08
1E-6	3,40E-07	3,36E-07	3,33E-07	3,29E-07	3,25E-07	3,21E-07
5E-6	6,29E-06	5,94E-06	5,61E-06	5,29E-06	5,00E-06	4,72E-06
1E-5	1,78E-05	1,59E-05	1,41E-05	1,26E-05	1,12E-05	1,00E-05
5E-5	7,53E-05	4,24E-05	2,39E-05	1,34E-05	7,58E-06	4,27E-06
1E-4	8,49E-05	2,69E-05	8,55E-06	2,71E-06	8,61E-07	2,73E-07
5E-4	4,30E-06	1,38E-08	4,45E-11	1,43E-13	4,60E-16	1,47E-18
1E-3	2,76E-08	2,86E-13				

$$V = 0,07 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	7,27E-09	7,26E-09	7,25E-09	7,24E-09	7,23E-09	7,22E-09
5E-7	1,71E-07	1,70E-07	1,69E-07	1,68E-07	1,67E-07	1,66E-07
1E-6	6,37E-07	6,30E-07	6,23E-07	6,16E-07	6,09E-07	6,02E-07
5E-6	9,45E-06	8,92E-06	8,34E-06	7,96E-06	7,51E-06	7,09E-06
1E-5	2,23E-05	1,99E-05	1,77E-05	1,58E-05	1,41E-05	1,25E-05
5E-5	7,54E-05	4,24E-05	2,39E-05	1,32E-05	7,59E-06	4,27E-06
1E-4	8,49E-05	2,69E-05	8,55E-06	2,71E-06	8,61E-07	2,73E-07
5E-4	4,30E-06	1,38E-08	4,45E-11	1,43E-13	4,60E-16	1,47E-18
1E-3	2,76E-08	2,86E-13				

$$V = 0,07 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,08E-08	1,08E-08	1,08E-08	1,07E-08	1,07E-08	1,07E-08
5E-7	2,48E-07	2,47E-07	2,45E-07	2,44E-07	2,42E-07	2,41E-07
1E-6	8,96E-07	8,86E-07	8,76E-07	8,66E-07	8,56E-07	8,46E-07
5E-6	1,10E-05	1,04E-05	9,84E-06	9,29E-06	8,77E-06	8,28E-06
1E-5	2,34E-05	2,09E-05	1,86E-05	1,66E-05	1,48E-05	1,32E-05
5E-5	7,54E-05	4,24E-05	2,39E-05	1,34E-05	7,59E-06	4,27E-06
1E-4	8,49E-05	2,69E-05	8,55E-06	2,71E-06	8,61E-07	2,73E-07
5E-4	4,39E-06	1,38E-08	4,45E-11	1,43E-13	4,60E-16	1,47E-18
1E-3	2,76E-08	2,86E-13				

$$V = 0,1 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	2,56E-09	2,56E-09	2,56E-09	2,56E-09	2,56E-09	2,55E-09
5E-7	6,27E-08	6,25E-08	6,22E-08	6,20E-08	6,17E-08	6,15E-08
1E-6	2,44E-07	2,42E-07	2,40E-07	2,38E-07	2,36E-07	2,34E-07
5E-6	4,92E-06	4,72E-06	4,54E-06	4,36E-06	4,19E-06	4,02E-06
1E-5	1,52E-05	1,41E-05	1,30E-05	1,20E-05	1,10E-05	1,02E-05
5E-5	8,88E-05	5,94E-05	3,97E-05	2,66E-05	1,78E-05	1,19E-05
1E-4	1,19E-04	5,36E-05	2,40E-05	1,07E-05	4,81E-06	2,15E-06
5E-4	2,40E-05	4,33E-07	7,79E-09	1,40E-10	2,52E-12	4,54E-14
1E-3	8,66E-07	2,80E-10	9,08E-14			

$$V = 0,1 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	5,11E-09	5,10E-09	5,10E-09	5,10E-09	5,09E-09	5,09E-09
5E-7	1,22E-07	1,22E-07	1,21E-07	1,21E-07	1,20E-07	1,20E-07
1E-6	4,66E-07	4,62E-07	4,58E-07	4,54E-07	4,51E-07	4,47E-07
5E-6	7,96E-06	7,64E-06	7,34E-06	7,05E-06	6,77E-06	6,51E-06
1E-5	2,11E-05	1,94E-05	1,79E-05	1,65E-05	1,53E-05	1,41E-05
5E-5	8,96E-05	5,99E-05	4,01E-05	2,68E-05	1,79E-05	1,20E-05
1E-4	1,19E-04	5,36E-05	2,40E-05	1,07E-05	4,81E-06	2,15E-06
5E-4	2,40E-05	4,33E-07	7,79E-09	1,40E-10	2,52E-12	4,54E-14
1E-3	8,66E-07	2,80E-10	9,08E-14			

$$V = 0,1 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	7,63E-09	7,62E-09	7,61E-09	7,61E-09	7,60E-09	7,60E-09
5E-7	1,79E-07	1,78E-07	1,78E-07	1,77E-07	1,76E-07	1,76E-07
1E-6	6,67E-07	6,62E-07	6,56E-07	6,51E-07	6,46E-07	6,41E-07
5E-6	9,83E-06	9,44E-06	9,07E-06	8,71E-06	8,37E-06	8,04E-06
1E-5	2,33E-05	2,15E-05	1,98E-05	1,83E-05	1,69E-05	1,56E-05
5E-5	8,96E-05	5,99E-05	4,01E-05	2,68E-05	1,79E-05	1,20E-05
1E-4	1,19E-04	5,36E-05	2,40E-05	1,07E-05	4,81E-06	2,15E-06
5E-4	2,40E-05	4,33E-07	7,79E-09	1,40E-10	2,52E-12	4,54E-14
1E-3	8,66E-07	2,80E-10	9,08E-14			

$$V = 0,5 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 3600 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	5,16E-10	5,15E-10	5,15E-10	5,15E-10	5,15E-10	5,15E-10
5E-7	1,28E-08	1,28E-08	1,28E-08	1,28E-08	1,28E-08	1,27E-08
1E-6	5,10E-08	5,10E-08	5,09E-08	5,08E-08	5,07E-08	5,06E-08
5E-6	1,22E-06	1,21E-06	1,20E-06	1,19E-06	1,18E-06	1,17E-06
1E-5	4,62E-06	4,54E-06	4,47E-06	4,40E-06	4,33E-06	4,26E-06
5E-5	7,64E-05	7,05E-05	6,51E-05	6,00E-05	5,54E-05	5,11E-05
1E-4	1,94E-04	1,65E-04	1,41E-04	1,20E-04	1,02E-04	8,72E-05
5E-4	5,99E-04	2,68E-04	1,20E-04	5,38E-05	2,40E-05	1,07E-05
1E-3	5,36E-04	1,07E-04	2,15E-05	4,32E-06	8,66E-07	1,73E-07

$$V = 0,5 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 7200 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09
5E-7	2,55E-08	2,55E-08	2,55E-08	2,55E-08	2,54E-08	2,54E-08
1E-6	1,01E-07	1,01E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07	1,00E-07
5E-6	2,33E-06	2,31E-06	2,29E-06	2,27E-06	2,25E-06	2,23E-06
1E-5	8,43E-06	8,30E-06	8,16E-06	8,03E-06	7,91E-06	7,78E-06
5E-5	1,05E-04	9,74E-05	8,99E-05	8,29E-05	7,65E-05	7,06E-05
1E-4	2,23E-04	1,90E-04	1,61E-04	1,37E-04	1,17E-04	9,99E-05
5E-4	5,99E-04	2,68E-04	1,20E-04	5,38E-05	2,40E-05	1,07E-05
1E-3	5,36E-04	1,07E-04	2,15E-05	4,31E-06	8,66E-07	1,73E-07

$$V = 0,5 \text{ cm}^3, \quad t_1 = 10800 \text{ s}, \quad P_E = 1 \text{ atm}$$

t_2	300 s	600 s	900 s	1200 s	1500 s	1800 s
L						
1E-7	1,54E-09	1,54E-09	1,54E-09	1,54E-09	1,54E-09	1,54E-09
5E-7	3,81E-08	3,81E-08	3,80E-08	3,80E-08	3,80E-08	3,80E-08
1E-6	1,50E-07	1,50E-07	1,49E-07	1,49E-07	1,49E-07	1,49E-07
5E-6	3,33E-06	3,31E-06	3,28E-06	3,25E-06	3,23E-06	3,20E-06
1E-5	1,15E-05	1,13E-05	1,12E-05	1,10E-05	1,08E-05	1,06E-05
5E-5	1,16E-04	1,07E-04	9,94E-05	9,17E-05	8,46E-05	7,81E-05
1E-4	2,27E-04	1,93E-04	1,64E-04	1,40E-04	1,19E-04	1,01E-04
5E-4	5,99E-04	2,68E-04	1,20E-04	5,38E-05	2,40E-05	1,07E-05
1E-3	5,36E-04	1,07E-04	2,15E-05	4,31E-06	8,66E-07	1,73E-07

9. TERMINY ZWIĄZANE Z WYKRYWANIEM NIESZCZELNOŚCI

polskie	angielskie	francuskie
nieszczelność	leak	fuite
duża nieszczelność	gross leak	grosse fuite
wykrywanie nieszczelności	leak detection	détection de fuite
natężenie nieszczelności	leak rate	flux
wykrywacz nieszczelności	leak detector	detecteur de fuites
gaz próbny	tracer gas	gas traceur
czas odpowiedzi	response time	temps de réponse
czułość	sensitivity	sensibilité
zakres pomiarowy	leak range	plage de mesure
metoda próżniowa	vacuum testing	méthode d'aspersion
metoda nadciśnieniowa	pressure testing	méthode de reniflage
metoda nadciśnieniowo-próżniowa	pressure-vacuum testing	méthode de ressuage
pamięć helowa	helium memory	memoire d'hélium
pompa obrotowa	mechanical pump	pompe mecanique
pompa wstępna	fore pump	pompe primaire
pompa pomocnicza	roughing pump	pompe de prévidage
pompa dyfuzyjna	diffusion pump	pompe à diffusion
wymrażarka	cold trap	piege
zawór	valve	vanne
zawór wejściowy	test valve	vanne de prélèvement
zawór zapowietrzający	vent valve	vanne d'entrée d'air
głowica spektrometru	massspectrometer tube	cellule d'analyse
sonda	gauge	jauge
naciek wzorcowy	standard calibrated leak	fuite calibré
pistolet nadmuchu	helium probe	pistolet aspergeur
próbnik /nos/ helowy	sniffer	pistolet renifleur
urządzenie do nasycania	bombing station	poste de pressurisation
test pęcherzykowy	bubble test	détection à la bulle d'air

	Str.
Streszczenia	3
1. Wstęp	5
2. Przepływ gazu przez nieszczelności	6
2.1. Nieszczelność przewodnościowa	7
2.2. Nieszczelność przenikalnościowa	8
2.3. Porównanie własności nieszczelności przewodnościowej i przenikalnościowej	9
3. Metody wykrywania nieszczelności	10
3.1. Spektrometryczna metoda wykrywania nieszczelności	10
3.2. Zasada pracy i budowa helowego wykrywacza nieszczelności	11
3.2.1. Głowica spektrometru mas	11
3.2.2. Układ próżniowy	15
4. Techniki wykrywania nieszczelności za pomocą helowego wykrywacza nieszczelności	19
4.1. Metoda próżniowa	19
4.2. Metoda nadciśnieniowa	20
4.3. Metoda nadciśnieniowo-próżniowa	21
5. Helowe wykrywacze nieszczelności i ich wyposażenie	23
6. Problemy związane z wykrywaniem nieszczelności	30
6.1. Połączenia z helowym wykrywaczem nieszczelności	31
6.2. Pamięć helowa wykrywaczy	33
6.3. Czułość wykrywaczy	35
6.4. Przygotowanie próbek	36
7. Wykrywanie nieszczelności w obudowach elementów elektronicznych	36
7.1. Podstawowe określenia	36
7.2. Wyznaczanie parametrów kontroli szczelności obudów	38
7.3. Wykrywanie nieszczelności metodami pęcherzykowymi	45
8. Tablice wartości $R = f/L/$	47
9. Słowniczek terminów wykrywania nieszczelności	57

