

RAPORTY IChTJ. SERIA B nr 2/2023

**METODY WYKRYWANIA NIESZCZELNOŚCI
W INSTALACJACH PRZEMYSŁOWYCH**

Marcin Rogowski

Warszawa 2023

AUTOR

Marcin Rogowski

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Laboratorium Techniki Jądrowych

WYDAWCA

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej

ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa

tel. 22 811 06 56, fax: 22 811 15 32, e-mail: sekdyrn@ichtj.waw.pl

www.ichtj.waw.pl

Raport został wydany w postaci otrzymanej od Autora

Metody wykrywania nieszczelności w instalacjach przemysłowych

Do wykrywania, badania, pomiaru czy lokalizacji nieszczelności stosuje się wiele metod i technik. Szeroki jest też zakres typów obiektów poddawanych takiej analizie. W niniejszym raporcie opisano metody i techniki wykrywania nieszczelności oraz ich lokalizowania w urządzeniach, aparaturze i podzespołach oraz instalacjach pracujących w skali przemysłowej. Korzystano przy tym z opracowań książkowych o tej tematyce, czasopism technicznych, stron internetowych z zakresu NDT (badania nieniszczące) itp. Opisano również podstawy prawne, normy i wymagania, które trzeba spełnić w przypadku prowadzenia takich badań.

Leak detection methods in industrial installations

Many methods and techniques are used to detect, test, measure or localize leaks. The range of types of objects subjected to such analysis is also wide. This report describes methods and techniques for detecting leaks and their location in industrial-scale equipment, apparatus and components and installations. Books on this subject, technical magazines, websites in the field of NDT (non-destructive testing), etc. were used. The legal basis, standards and requirements necessary for such tests were also described.

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	7
1.1. Badanie szczelności	7
1.2. Źródła nieszczelności i jej skutki - przykłady	7
2. WYMAGANIA PRAWNE ORAZ NORMY	10
2.1. Wykaz norm	10
2.4. Przepisy prawne	14
3. METODY I TECHNIKI BADANIA SZCZELNOŚCI	15
3.1. Metoda spektrometryczna	16
3.2. Metoda halogenowa (chlorowcowa)	17
3.3. Metoda cieplno-przewodnościowa	18
3.4. Metody chemiczne	18
3.5. Metoda pęcherzykowa	19
3.6. Metody akustyczne	20
3.7. Metoda manometryczna	22
3.8. Metoda pomiaru przepływu	23
3.9. Metoda penetracyjna	23
3.10. Metoda hydrostatyczna	24
3.11. Metoda znaczników radioaktywnych	25
3.12. Inne metody – metody optyczne i technologia inteligentnych tłoków	31
4. LITERATURA	33

1. WPROWADZENIE

1.1. Badanie szczelności

Badanie szczelności (coraz częściej nazywane badaniem nieszczelności) należy do badań nieniszczących (NDT). Jest to zespół czynności mających na celu stwierdzenie, czy obiekt jest szczelny oraz ewentualne określenie rodzaju nieszczelności, jej pomiar i lokalizację. Pojęcie obiektu szczelnego jest zawsze związane z wymaganiami określonymi przez odpowiednie normy, przepisy czy warunki umowy, które ustalają dopuszczalne natężenie przecieku. Żadne bowiem urządzenie ani system nie może być absolutnie szczelny i tak naprawdę nie musi być. Jednak stopień nieszczelności musi być na tyle niski, aby nie miało to wpływu na wymagane ciśnienie robocze, równowagę gazową itp. Wynika z tego, że wymagania dotyczące na przykład gazo-szczelności aparatu są tym bardziej rygorystyczne, im niższy jest wymagany poziom ciśnienia.

Jednostką podstawową natężenia przecieku gazu jest $\text{Pa m}^3 \text{s}^{-1}$. Inną często stosowaną jednostką jest mbar l s^{-1} [1]. Jednostkę tę definiuje się następująco: w objętości 1 litra ciśnienie wzrasta lub maleje o 1 mbar w ciągu 1 sekundy, przy stałej temperaturze. W przypadku cieczy jednostką jest $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$. Normalne natężenie przecieku o wartości $1 \text{ Pa m}^3 \text{s}^{-1}$ odpowiada masowemu natężeniu przecieku: 375 kg rok^{-1} powietrza, 52 kg rok^{-1} helu.

Przyjmuje się następujące dopuszczalne natężenia przecieków:

- $10^{-1} \text{ Pa m}^3 \text{s}^{-1}$ dla zamknięć zaworów wysokociśnieniowych,
- $10^{-3} \text{ Pa m}^3 \text{s}^{-1}$ dla uszczelnień dławicowych,
- $10^{-4} \text{ Pa m}^3 \text{s}^{-1}$ dla uszczelnień wymienników ciepła,
- $10^{-6} \text{ Pa m}^3 \text{s}^{-1}$ dla uszczelnień próżniowych,
- $10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{s}^{-1}$ dla uszczelnień urządzeń gazów toksycznych.

Terminem nieszczelność w technice NDT określa się otwór, porowatość, przepuszczalny element lub inną strukturę w ścianie obiektu zdolną do przepuszczania gazu lub cieczy z jednej strony ściany na drugą, w wyniku różnicy ciśnień lub koncentracji po obu stronach ściany. Minimalne natężenie nieszczelności, jakie dane urządzenie (lub metoda) pozwala zmierzyć, często nosi nazwę czułości metody.

1.2. Źródła nieszczelności i jej skutki – przykłady

Badanie szczelności urządzeń i instalacji ciśnieniowych/próżniowych podczas ich eksploatacji ma na celu wyeliminowanie zagrożeń dla ludzi, urządzeń i środowiska powodowanych przeciekami mediów roboczych lub pęknięciami, których wczesnym sygnałem może być pojawienie się przecieków. Nerozerwalnie z tym problemem wiążą się również względy ekonomiczne – znaczne koszty wynikające z utraty produktu, zapłata kar, wypłata odszkodowań itp. [2]. Nieszczelność w systemie może mieć wiele przyczyn, w tym niezamierzone pęknięcie, korozja, zużycie, porowatość, otwór w ścianie otaczającej, poluzowanie śrub i połączeń oraz pęknięcie lub poluzowanie uszczelek.

Cykliczne zmiany temperatury o znacznej amplitudzie mogą doprowadzić do tzw. zmęczenia cieplnego. Występuje ono często w konstrukcjach stosowanych w energetyce, takich jak rurociągi, turbiny parowe czy walczaki kotłów. W tych konstrukcjach dodatkowo działają destrukcyjnie zmiany ciśnienia. Struktura wewnętrzna materiału ulega do tego stopnia degradacji, że powstają pęknięcia widoczne gołym okiem zarówno na powierzchni elementu, jak i w przekroju. Niekorzystny wpływ dużych zmian temperatury może również wystąpić w procesie spawania. Na skutek nieprawidłowego wykonywania spoiny może dojść do jej pęknięcia lub pęknięcia materiału rodzimego (w strefie wpływu ciepła). Elementy konstrukcji często ulegają uszkodzeniom w miejscach ułożenia spoin. Ponieważ złącza spawane są narażone na defekty, powinny być kontrolowane po wykonaniu. W pobliżu spoin zostaje zaburzona struktura materiału rodzimego, co w połączeniu z błędami projektowymi czy wykonawczymi może prowadzić do koncentracji naprężeń i powstawania pęknięć. Częstymi przyczynami pęknięć spoin jest niewłaściwe

ich ukształtowanie, np. krzyżowanie się, przy czym ich naprawa jest bardzo trudna, a czasami wręcz niemożliwa. Próba naprawy przeprowadzona w niewłaściwy sposób może jeszcze pogłębić problem. Zdarza się propagacja pęknięcia na materiał rodzimy [3].

Konieczność wykrywania nieszczelności jest istotna w przypadku sieci przesyłowych i dystrybucyjnych gazu ziemnego [4]. Wykrywanie nieszczelności w rurociągach przesyłowych jest bardzo ważne dla ich bezpiecznej eksploatacji. Nieszczelność gazociągu może wystąpić w dowolnym momencie i miejscu, dlatego systemy wykrywania nieszczelności odgrywają kluczową rolę w ograniczeniu strat gazu. Podczas eksploatacji sieci występują różne czynniki prowadzące do uszkodzenia gazociągów. W wyniku korozji, erozji ścianek wewnętrznych i zewnętrznych, pęknięcia spawów, wgniecenia ścianek, wad materiałowych może dojść do powstania nieszczelności i uszkodzenia gazociągu. Powstanie pęknięć może być również wywołane zmianą naprężeń spowodowanych zmianami ciśnienia w gazociągu i deformacjami rurociągu wskutek ruchów gruntu. Uszkodzenia mogą powstawać także w wyniku działania ludzi, np. podczas nieuwważnego wykonywania ziemnych prac budowlanych lub remontowych na trasie rurociągu. W przypadku każdej awarii sieci wymagana jest szybka reakcja, zanim spowoduje ona więcej strat [5]. Wycieki gazu ziemnego stanowią poważne zagrożenie dla środowiska ze względu na emisję metanu do atmosfery. Istnieją oficjalne przepisy związane z wykrywaniem nieszczelności rurociągów. Pierwszym etapem prowadzenia pomiarów wielkości emisji metanu jest identyfikacja miejsc występowania nieszczelności w obrębie badanych elementów systemu, a następnie pomiar wielkości emisji metanu. Dobór odpowiedniej metody służącej do lokalizacji nieszczelności zależy od wielu czynników, m.in. wielkości i stopnia skomplikowania obiektu, na którym prowadzone są pomiary, lokalizacji nieszczelności (nadziemna lub podziemna), minimalnej wielkości nieszczelności, jaka może być wykryta daną metodą. Przegląd wielu metod, w tym nieopisanych w niniejszym raporcie z powodu specyficznego przeznaczenia do gazociągów, zawarty jest w pracach [4] oraz [6-8]. Nowszy, kompleksowy przegląd metod wykrywania i lokalizacji nieszczelności rurociągów można znaleźć w publikacjach [9, 10]. Oprócz metod sprzętowych (bezpośrednich) rozwijane są techniki oparte na oprogramowaniu (metody analityczne, pośrednie). Zaimplementowane algorytmy na bieżąco monitorują stan ciśnienia, temperatury, natężenia przepływu i innych parametrów rurociągu, które są zdalnie transmitowane (transmisja radiowa, pakietowa GPRS) ze stacji i węzłów pomiarowych na przykład do systemów SCADA. Na podstawie ewolucji wyżej wymienionych parametrów algorytmy mogą wywnioskować, czy doszło do wycieku [11-19]. Podobnie sprawa wygląda w przypadku rurociągów tłoczących ciecze. Diagnozowanie wycieków z instalacji hydraulicznych jest istotnym zagadnieniem związanym z ich eksploatacją. Nabiera ono szczególnego znaczenia w przypadku rurociągów naftowych, gdzie wycieki mogą prowadzić do powstawania dużych strat ekonomicznych związanych z utratą produktu i usuwaniem skutków skażenia środowiska. Zagadnienie wycieków istotne jest również w branży wodno-kanalizacyjnej. Jednym z najważniejszych działań przedsiębiorstw w tej branży jest diagnostyka sieci. Wycieki wody do gruntu są nieodłączną częścią eksploatacji sieci wodociągowej. Najczęstsze uszkodzenia sieci wodociągowych i związane z tym straty wody powstają w wyniku niewłaściwego wykonania połączeń rurowych, nadmiernego ciśnienia w sieci, zbyt gwałtownych zmian ciśnienia w sieci, niewłaściwego zabezpieczenia antykorozyjnego rurociągów stalowych, przemarzania gruntu w miejscach posadowienia przewodów wodociągowych, nadmiernego dynamicznego obciążenia gruntu nad sieciami wodociągowymi, osiadania gruntu w wyniku szkód górniczych, ruchów tektonicznych itp. [20]. Dokładniejsze omówienie przyczyn i typów uszkodzeń rurociągów oraz zapobieganie awariom zawarto w pracy [21].

Węglowodory mogą być magazynowane w podziemnych lub naziemnych magazynach gazu, jednak podziemne magazyny (PMG) są dużo bezpieczniejsze i bardziej przyjazne dla środowiska. Węglowodory są w nich odseparowane od tlenu zawartego w powietrzu skałami, które stanowią naturalną barierę dla ognia. Bezpieczeństwo podziemnych magazynów gazu zależy głównie od ich szczelności. Gaz ziemny posiada dużą zdolność migracji, zarówno ze złóż, jak i podziemnych magazynów gazu, dlatego szczelność podziemnych struktur przeznaczonych do magazynowania gazu jest podstawowym warunkiem, który musi zostać spełniony, aby w danym miejscu mógł powstać bezpieczny magazyn. Nieszczelności występujące w PMG mogą być

przyczyną trudnych do ugaszenia pożarów, a nawet wybuchów [22]. Ponieważ najlepszą lokalizacją dla tego typu inwestycji jest lokalizacja niedaleko dużych aglomeracji miejskich, będących odbiorcą gazu, dlatego trzeba szczególnie zadbać o szczelność magazynu i jej monitorowanie na każdym etapie eksploatacji, gdyż brak odpowiedniej kontroli zbiorników może zagrażać ludności mieszkającej nawet w promieniu kilkuset metrów.

Zbiorniki na ropę naftową i wytwarzane z niej paliwa płynne są niemal wyłącznie stalowe, walcowe o osi pionowej i występują w kilku wariantach konstrukcyjnych. W zbiorniku z dachem stałym można wydzielić cztery strefy, w których występuje bardzo zróżnicowane środowisko korozyjne:

- Strefę gazową – konstrukcja dachowa i najwyższa część płaszcza, wypełniona parą nasyconą węglowodorów w powietrzu o różnym stopniu wilgotności i różnym stężeniu czynników korozyjnych H_2S , O_2 , CO_2 .
- Strefę „czynną” objętości zbiornika – zasadnicza część powierzchni płaszcza, okresowo znajdująca się pod działaniem płynnego paliwa naftowego (gdy zbiornik jest pełny) lub mieszanek oparów paliwa i powietrza (gdy zbiornik jest opróżniony).
- Strefę „martwą” objętości w zbiorniku – część powierzchni płaszcza poniżej poziomu króćca ssącego, podczas eksploatacji zawsze wypełniona paliwem płynnym i wodą podproduktową oddzielającą się grawitacyjnie od węglowodorów. Woda ta zawiera różne czynniki korozyjne, bywa mocno zanieczyszczona związkami siarki i chlorkiem sodu.
- Powierzchnię dna zbiornika, gdzie gromadzi się szlam i osady, a także spadające z dachu produkty korozji, w tym siarczki i tlenki.

We wnętrzu zbiornika z dachem pływającym można wydzielić analogiczne strefy korozyjne z wyjątkiem strefy gazowej, którą wyklucza sama koncepcja konstrukcji takiego zbiornika. W strefie „martwej” objętości dość intensywnie uzupełniana jest woda podproduktowa dzięki przenikaniu przez uszczelnienie dachu pływającego wody deszczowej spływającej po płaszczu. Największe zagrożenie szczelności zbiornika stanowią uszkodzenia korozyjne dna i „martwej” strefy płaszcza. Występuje tu głównie korozja wżerowa, której rozwojowi sprzyjają zalegające na dnie i pewnej wysokości płaszcza szlam i osady wytrącające się z ropy naftowej, zwłaszcza przy jej długotrwałym magazynowaniu, a także osady siarczków i tlenków spadające z korodującego dachu zbiornika. Pod warstwą osadów powstają wyjątkowo sprzyjające warunki do tworzenia się korozyjnych mikroogniw galwanicznych, wytwarzają się bowiem obszary o nierównomiernym dostępie tlenu z wody podproduktowej. Miejsca o mniejszym dostępie tlenu stają się bardziej anodowe i wówczas dochodzi do zapoczątkowania i gwałtownego rozwoju wżerów korozyjnych w punktach niejednorodności powierzchni blachy (np. na granicy ziaren stali, wtrąceń niemetalicznych, zaburzeń struktury wywołanej spawaniem lub niejednorodną obróbką plastyczną). Takie anody o bardzo małej powierzchni koncentrują cały korozyjny prąd mikroogniwa galwanicznego, co powoduje intensywną reakcję i rozpuszczanie stali [23].

Sprężone powietrze jest jednym z najczęściej stosowanych nośników energii w przemyśle. Jest medium stosunkowo bezpiecznym, czystym, łatwo można je wytworzyć oraz magazynować. Do produkcji sprężonego powietrza powszechnie stosuje się energię elektryczną. W 15 krajach Unii Europejskiej 10% zużywanej energii elektrycznej przeznaczane jest do napędzania silników elektrycznych wykorzystywanych do napędu sprężarek. Sprężone powietrze ze względu na duże koszty wytwarzania, przygotowania i przesyłania jest drogim nośnikiem energii, a ponadto wprowadza dużo zanieczyszczeń do atmosfery. Przecieki sprężonego powietrza spowodowane są różnymi czynnikami, np. niedokładnością wykonania i montażu, korozją oraz zużywaniem się elementów instalacji pneumatycznych. Częstymi miejscami nieszczelności są połączenia instalacji, filtry, zawory, regulatory lub zbiorniki. Do przecieków dochodzi także podczas łączenia i rozłączania przewodów pneumatycznych. Utrata sprężonego powietrza przez przecieki generuje wysokie koszty, które najczęściej ukryte są w rachunkach za energię elektryczną. Dlatego ważne jest wczesne wykrywanie i lokalizowanie nieszczelności w takich układach [24, 25].

2. WYMAGANIA PRAWNE ORAZ NORMY

2.1. Normy

Pierwszą wprowadzoną w Polsce normą z zakresu badania szczelności była PN-M-70053:1974 „Badania nieniszczące – Badanie szczelności – Nazwy i określenia” [1, 26]. Zdefiniowano w niej słownictwo dotyczące nieniszczących metod badania szczelności oraz wymieniono 4 rodzaje wykrywaczy nieszczelności i 16 metod badania szczelności:

- I. Metody próżniowe, w których po obu stronach ścianki badanego obiektu istnieje różnica ciśnień na skutek wytworzenia próżni.
- II. Metody ciśnieniowe, w których po obu stronach ścianki badanego obiektu istnieje różnica ciśnień na skutek wytworzenia nadciśnienia.
- III. Metody ciśnieniowo-próżniowe, w których po obu stronach ścianki badanego obiektu istnieje różnica ciśnień na skutek jednoczesnego wytworzenia próżni po jednej i nadciśnienia po drugiej stronie ścianki.
- IV. Metody bezciśnieniowe, w których podczas badania nie jest wytwarzana różnica ciśnień po obu stronach ścianki badanego obiektu.
- V. Badanie statyczne, podczas którego ilość płynu w badanym obiekcie zmienia się jedynie na skutek istnienia nieszczelności.
- VI. Badanie dynamiczne, podczas którego płyn jest w sposób ciągły dostarczany lub odbierany z badanego obiektu.
- VII. Metodę spadku lub wzrostu ciśnienia – metodę statyczną, polegającą na rejestracji zmian ciśnienia panującego wewnątrz badanego obiektu po wytworzeniu określonej różnicy ciśnień między obu stronami jego ścianki.
- VIII. Metodę obserwacji przepływu, polegającą na wykrywaniu przepływu płynu przez ścianki obiektu.
- IX. Metodę zmiany przepływu, polegającą na zmniejszeniu lub zwiększeniu przecieku w wyniku zmiany czynników powodujących ten przeciek.
- X. Metodę zmiany ciśnienia całkowitego, polegającą na pomiarze zmiany ciśnienia całkowitego wewnątrz badanego obiektu występującej w wyniku wzrostu lub zmniejszenia przecieku.
- XI. Metodę zmiany ciśnienia cząstkowego, polegającą na pomiarze zmian ciśnienia cząstkowego wewnątrz lub na zewnątrz badanego obiektu w wyniku zmiany przecieku badanego rodzaju gazu.
- XII. Metodę pomiaru przepływu, polegającą na pomiarze ilości płynu roboczego lub próbnego, jaka musi przepłynąć do lub z obiektu badanego w celu utrzymania stałej wartości ciśnienia wewnątrz tego obiektu.
- XIII. Metodę hydrostatyczną, polegającą na napełnieniu badanego obiektu cieczą próbną o określonym ciśnieniu lub do określonego poziomu i na rejestracji spadku ciśnienia lub obserwacji wycieku tej cieczy.
- XIV. Metodę pęcherzykową, polegającą na pokryciu powierzchni badanego obiektu cieczą i obserwacji pęcherzyków gazu przepływającego w miejscach istnienia defektów.
- XV. Metody chemiczne, polegające na wykorzystaniu do lokalizacji nieszczelności zjawisk chemicznych, zachodzących po przejściu płynu próbnego lub roboczego przez przeciek.
- XVI. Metodę znaczników radioaktywnych, polegającą na wykorzystaniu do wykrywania nieszczelności detekcji promieniowania znacznika radioaktywnego wprowadzonego do płynu próbnego lub roboczego.

Norma ta została wycofana i zastąpiona, opracowaną na podstawie normy europejskiej EN 1330-8:1998, normą PN-EN 1330-8:2001 „Badania nieniszczące – Terminologia – Terminy stosowane w badaniach szczelności”, w której uaktualniono definicje, metody i sposoby wykonywania badań.

W wyniku zastąpienia normy europejskiej normą międzynarodową ISO 20484:2017 w Polsce obecnie obowiązuje PN-EN ISO 20484:2017-06 „Badania nieniszczące – Badanie

nieszczelności – Terminologia”. Podsumowano w niej słownictwo techniczne dotyczące wykrywania nieszczelności, zrezygnowano z kilku definicji z zakresu pomiaru ciśnienia i próżni oraz zaktualizowano i poprawiono kilka definicji. Wymieniono w niej następujące techniki badania szczelności:

- I. Metodę akumulacji, w której gaz znakujący jest zbierany w znanej objętości przez określony czas i mierzony jest wzrost ciśnienia cząstkowego gazu znakującego.
- II. Metodę gazu nośnego (próba płukania), w której wzdłuż zewnętrznej powierzchni badanego obiektu znajdującego się w komorze tworzy się przepływ lepki gazu w celu doprowadzenia ulatniającego się gazu znakującego do czujnika.
- III. Metodę próżniową gazu znakującego – test szczelności, w którym gaz znakujący jest wykrywany w przestrzeni, w której swobodnie porusza się w kierunku czujnika.
- IV. Metodę ciśnieniowo-próżniową (ang. bombing test), polegającą na tzw. nasycaniu, czyli działaniu gazu znakującego na zamknięte objekty, które następnie badane są w komorze próżniowej.
- V. Metodę pęcherzykową, służącą do wykrywania nieszczelności poprzez zanurzenie przedmiotu w cieczy testowej lub pokrycie jego zewnętrznej powierzchni roztworem środka powierzchniowo czynnego (pieniącego się).
- VI. Metodę pod przykryciem – ogólny test szczelności, w którym obiekt jest umieszczany w miękkiej obudowie pod ciśnieniem atmosferycznym.
- VII. Metodę zmiany ciśnienia, w której mierzy się szybkość całkowitej zmiany ciśnienia (zaniku lub wzrostu) w obiekcie w pewnym okresie czasu.
- VIII. Metodę pomiaru przepływu, w której mierzony jest przepływ niezbędny do utrzymania różnicy ciśnień na granicy obiektu.
- IX. Metodę ciśnieniową z barwnikiem, w której ciecz zawierająca barwnik lub związek fluorescencyjny jest wtłaczana w wyniku różnicy ciśnień do nieszczelności w ścianie badanego obiektu, a następnie wykrywana wzrokowo po drugiej stronie.
- X. Metodę chemiczną, w której zewnętrzna strona badanego obiektu jest poddawana działaniu substancji chemicznej, reagującej w kontakcie z wydostającym się płynem.
- XI. Metodę wycieku radionuklidu, w której wykorzystuje się radioaktywny płyn wskaźnikowy oraz detektor do pomiaru promieniowania emitowanego przez ten płyn.

Na podstawie normy EN 1779:1999, która po raz pierwszy zdefiniowała kryteria wyboru najbardziej odpowiedniej metody i techniki badań do oceny szczelności przez wskazanie lub zmierzenie przecieku gazu, wprowadzono normę PN-EN 1779:2002 „Badania nieszczelności – Kryteria wyboru metody i techniki”. Ustala ona, że szczelność badanego obiektu należy określić w normalnych warunkach pracy, gdzie największy wpływ na natężenie przecieku mają własności fizyczne i ciśnienie gazu oraz temperatura robocza. Dlatego natężenie przecieku ustalone podczas badania szczelności należy przeliczyć na natężenie przecieku gazu roboczego w warunkach pracy [1]. W dokumencie nie uwzględniono wykrywania nieszczelności za pomocą testów hydrostatycznych, metod ultradźwiękowych lub elektromagnetycznych. Techniki badawcze podzielono na grupy A, B, C i D z uwzględnieniem kierunku przepływu gazu z oraz do obiektu. Podano również charakterystyczne cechy metod w celu ich porównania [27]. Ponadto norma zawiera wytyczne dotyczące przeliczania różnych jednostek natężenia wycieku w różnych segmentach przemysłu. Uszczegóławia również zależność szczelności – wyrażonej jako stopień nieszczelności dla określonego gazu – od parametrów otoczenia, ciśnienia i temperatury. W normie podano ponadto praktyczne przykłady i odpowiednie wzory na przeliczanie prędkości wycieku w warunkach przepływu laminarno-lepkiego i molekularnego w kanale wycieku dla parametrów środowiskowych, ciśnienia, temperatury i rodzaju gazu. Norma wskazuje również minimalne wykrywalne wartości nieszczelności dla każdej metody, które pozwalają oszacować, czy granice wykrywalności określone przez producenta mogą być realizowane w praktyce przemysłowej. Jednak ze względu na postęp techniczny w projektowaniu i produkcji urządzeń niektóre z tych wskazań są nieaktualne.

Poniżej przedstawiono normy odnoszące się do konkretnych technik.

- Metoda spektrometryczna
 - PN-EN 1518:2002 „Badania nieniszczące – Badania szczelności – Charakteryzowanie masowego spektrometrycznego wykrywacza nieszczelności”. Określono warunki i procedury do scharakteryzowania masowego spektrometrycznego wykrywacza nieszczelności (MSLD) oraz opisano procedury stosowane bez szczegółowego wzorcowania wyposażenia.
- Metoda pęcherzykowa
 - PN-EN 1593:2004 „Badania nieniszczące – Badania szczelności – Próba pęcherzykowa”. Określono procedury wykrywania i lokalizacji nieszczelności technikami emisji pęcherzyków: zanurzeniową i stosowania cieczy.
- Metoda zmiany ciśnienia
 - PN-EN 13184:2002 „Badania nieniszczące – Badania szczelności – Metoda zmiany ciśnienia”. Opisano techniki do określania prędkości przecieku przez oddzielone ściany badanego obiektu oparte na ocenie zmiany masy gazu w obiekcie poddanym różnicy ciśnień – metodę zaniku ciśnienia, metodę wzrostu ciśnienia, metodę zmiany ciśnienia (w komorze), pomiar przepływu. Należą one do grupy D technik opisanych w PN-EN 1779:2002.
- Metody znaczników gazowych
 - PN-EN 13185:2002 „Badania nieniszczące – Badania szczelności – Metoda gazu znakującego”. Opisano techniki z zastosowaniem gazu znakującego i określonym wykrywaczem dla tego gazu. Według PN-EN 1779:2002 należą do nich techniki z grupy A i B – próżniowa całkowita, próżniowa częściowa, próżniowa lokalna, detekcja chemiczna z amoniakiem, przyssawki próżniowej, ciśnieniowa z akumulacją, zasysania (obwężiwania), ciśnieniowo-próżniowa (bombing), komory próżniowej. Głównym gazem znakującym jest hel, a ponadto halogeny, SF₆, gazy o innej przewodności cieplnej niż atmosfera otoczenia. Dokument został zastąpiony normą PN-EN ISO 20485:2018-03, w której dokonano zmian redakcyjnych, pominięto informacje o kwalifikacjach personelu oraz integracji techniki gazu nośnego.
 - PN-EN 13192:2003 „Badania nieniszczące – Badania szczelności – Skalowanie dla gazowych przecieków odniesienia”. Określono skalowanie dla takich przecieków, które są stosowane do nastawiania wykrywaczy nieszczelności w celu wyznaczania natężenia przecieku w codziennym użytkowaniu. Preferowaną metodą kalibracji w tym przypadku jest porównanie ze standardowym wyciekem. Procedury porównawcze są stosowane do wycieków helu, ponieważ ten gaz testowy może być selektywny i mierzony za pomocą detektora nieszczelności spektrometru mas (MSLD). Podano klasyfikację typów nieszczelności, opisano skalowanie przez porównanie (metod A i B) oraz skalowanie przez pomiar bezpośredni strumienia (metoda C). Opisano aparaturę stosowaną w metodach A, B i C, ustalono wzory do obliczania natężenia przecieku. Dokument został zastąpiony normą PN-EN ISO 20486:2018-03, w której dodano różne definicje i zdefiniowano warunki środowiskowe dla referencyjnych wartości nieszczelności. Zakres zastosowania normy został przedstawiony graficznie i zawiera zalecenia, jaką metodą kalibracji należy zastosować dla odpowiedniego zakresu wartości nieszczelności.
 - PN-EN 13625:2003 „Badania nieniszczące – Badanie szczelności – Wytyczne wyboru aparatury do pomiaru przecieku gazu”. Zawiera kryteria wyboru aparatury stosowanej w technikach badań wykrywania nieszczelności, opisanych w PN-EN 1779. Opisano metodę gazu znakującego – techniki grup A (dopływ gazu do obiektu) i B (wypływ gazu z obiektu), metodę pęcherzykową – techniki grupy C oraz metodę zmiany ciśnienia całkowitego – techniki grupy D.
- Emisja akustyczna
 - PN-EN ISO 18081:2016-08 „Badania nieniszczące – Badanie metodą emisji akustycznej – Wykrywanie nieszczelności z wykorzystaniem emisji akustycznej”. Norma jest przeznaczona do stosowania metodyki do konstrukcji i elementów, gdzie w wyniku różnicy ciśnień występujący wyciek generuje emisję akustyczną. Opisano zjawisko powstawania AE (ang. acoustic emission, emisja akustyczna) oraz wpływ rodzaju płynów,

- kształtu szczeliny, propagacji fal i środowiska. Omówiono stosowane metody AE, aparaturę pomiarową oraz zaprezentowano wyniki AE.
- PN-EN 1330-9:2017-09 „Badania nieniszczące – Terminologia – Część 9: Terminy stosowane w badaniach emisją akustyczną”. Zawiera wyłącznie terminy, w szczególności stosowane w badaniach emisją akustyczną, podzielone na cztery części: terminy odnoszące się do zjawiska fizycznego, terminy odnoszące się do wykrywania emisji akustycznej, terminy odnoszące się do mierzonych parametrów sygnału, terminy odnoszące się do zastosowań emisji akustycznej.
 - PN-EN 13554:2011 „Badania nieniszczące – Emisja akustyczna – Zasady ogólne”. Określono ogólne zasady przeprowadzania badań emisji akustycznej konstrukcji przemysłowych, komponentów i różnych materiałów poddawanych obciążeniom i w trudnych warunkach, w celu zapewnienia określonych i powtarzalnych wyników.
 - PN-EN 13477-1:2002 „Badania nieniszczące - Emisja akustyczna – Charakteryzowanie aparatury – Część 1: Opis aparatury”. Określono główne elementy składające się na system monitorowania emisji akustycznej dotyczące: wykrywania, dopasowania sygnału, pomiaru sygnału oraz analizy wyników.
 - **Badania penetracyjne**
 - PN-EN ISO 3452-1:2021-12 „Badania nieniszczące - Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne”. W dokumencie określono metodę badania penetracyjnego stosowanego do wykrywania nieciągłości, np. pęknięć, zawałowań, fałd, porowatości i braku przyklejenia, które są otwarte do powierzchni badanego materiału, z zastosowaniem białego światła lub promieniowania UV-A (365 nm). Metoda stosowana jest przede wszystkim do badania materiałów metalowych. Może być także wykorzystywana do badania innych materiałów, pod warunkiem, że są one obojętne na działanie materiałów penetracyjnych i nie są silnie porowate (odlewy, odkuwki, spoiny, ceramika itp.).
 - PN-EN ISO 3452-2:2021-12 „Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 2: Badania materiałów penetracyjnych”. Określono techniczne wymagania dla materiałów penetracyjnych i procedury badania typu materiału i badania jednorodności własności w partii materiałów penetracyjnych. Niniejszy dokument ma zastosowanie dla przedziału temperatury od 10 do 50°C.
 - PN-EN ISO 3452-3:2014-02 „Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 3: Próbkę odniesienia”. Opisano dwa typy próbek odniesienia: próbki odniesienia typu 1 stosowane do określenia poziomów czułości fluorescencyjnego i barwnego zestawu preparatów penetracyjnych oraz próbki odniesienia typu 2 stosowane do rutynowej oceny działania fluorescencyjnych i barwnych preparatów penetracyjnych do badań.
 - PN-EN ISO 3452-4:2001 „Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 4: Wyposażenie”. Określono charakterystyczne cechy wyposażenia używanego w badaniach penetracyjnych w zależności od liczby badań, które mają być wykonane i od wielkości badanych elementów. Opisano dwa typy wyposażenia: wyposażenie do badania lokalnego oraz wyposażenie instalacji stacjonarnych.
 - PN-EN ISO 3452-5:2009 „Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 5: Badania penetracyjne w temperaturach wyższych niż 50°C”. Ustalono wymagania dla badania penetracyjnego, szczególnie w wyższych temperaturach, a także technikę kwalifikowania odpowiednich materiałów penetracyjnych.
 - PN-EN ISO 3452-6:2009 „Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 6: Badania penetracyjne w temperaturach niższych niż 10°C”. Ustalono wymagania dla badania penetracyjnego, szczególnie w niskich temperaturach, a także technikę kwalifikowania odpowiednich materiałów penetracyjnych.
 - PN-EN ISO 12706:2010 „Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Terminologia”.
 - BN-1053-01:1975 „Wytyczne badania szczelności metodą penetracyjną”. Podano wytyczne wykonywania badań szczelności wyrobów i urządzeń metalowych o grubości ścianek do 25 mm, dla których ciśnienie obliczeniowe nie przekracza 4 bar.

- Metoda hydrostatyczna
 - BN-1055-01:1976 „Badanie szczelności – Próby hydrauliczne”. Przedmiotem normy są ogólne wytyczne prowadzenia prób hydraulicznych przy badaniu szczelności wyrobów, urządzeń i instalacji.

Obecnie trwają prace nad nową normą ISO/NP 6366 „Non-destructive testing – Leak testing – Radioactive tracer methods for pressured vessels and underground pipelines”. Propozycja ISO jest efektem wieloletnich i szerokich doświadczeń w stosowaniu metod znaczników radioaktywnych do badania szczelności zbiorników ciśnieniowych i rurociągów podziemnych. Po wielu latach prowadzenia prac badawczo-rozwojowych metody znaczników radioaktywnych są rutynowo stosowane w przemyśle do testowania szczelności. Norma ISO pomoże dostawcom usług z użyciem radioaktywnych znaczników i ich użytkownikom końcowym w współpracy, poprawi akceptację i pozwoli na lepsze wykorzystanie technologii, a ponadto ułatwi akredytację laboratoriów znaczników promieniotwórczych oraz będzie promować międzynarodowy i regionalny handel i usługi. W dokumencie podzielono metody na 2 kategorie:

- testy obiektów przemysłowych, takich jak zbiorniki ciśnieniowe, wymienniki ciepła, zawory, kotły, rurociągi;
- testy podziemnych rurociągów.

Nowa norma wprowadzi kilka definicji, opis technik i niezbędnego wyposażenia dla każdej z metod. Ponadto zawiera rekomendacje dla wyboru znacznika radioaktywnego w zależności od stosowanej postaci fazowej, a także wzory i przykłady obliczeń.

2.2. Przepisy prawne

Próby szczelności wykonuje się w ramach obowiązkowych badań technicznych zbiorników, prowadzonych przez Urząd Dozoru Technicznego (UDT) z mocy ustawy o dozorcze technicznym i wymienionych poniżej aktów wykonawczych:

- rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 18 września 2001 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych (Dz. U. z 2001 r. Nr 113, poz. 1211, ze zmianą w Dz. U. z 2008 r. Nr 60, poz. 371),
- rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 16 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych dozoru technicznego, jakim powinny odpowiadać zbiorniki bezciśnieniowe i niskociśnieniowe przeznaczone do magazynowania materiałów trujących lub żrących (Dz. U. z 2002 r. Nr 63, poz. 572).

UDT współpracuje z szeregiem wyspecjalizowanych zakładów, które wykonują próby szczelności. Inspektor UDT odpowiada za wynik badania technicznego i jakość wykonania próby szczelności oraz wydaje decyzję zezwalającą na eksploatację zbiornika, dlatego sposób wykonywania niektórych prób, zwany dalej techniką, wymaga uznania przez UDT.

W przypadku braku dostępu do ścianek zbiornika, uznania przez UDT wymaga wykonanie prób szczelności zbiorników poniższymi metodami:

- gazową ciśnieniową z pośrednim pomiarem szczelności poprzez badanie spadku ciśnienia lub podciśnienia;
- amoniakalną lub inną chemiczną;
- gazową próżniowo-pęcherzykową;
- ultradźwiękową;
- z helowym wykrywaczem nieszczelności (ciśnieniowa, ciśnieniowo-próżniowa, próżniowa);
- innymi uzgodnionymi:
 - hydrostatyczną z magnetostrykcyjnym pomiarem poziomu cieczy,
 - związaną z pomiarem zmiany masy cieczy za pomocą sondy wypornościowej i tła akustycznego w części gazowej.

Uznania wymagają próby szczelności podziemnych i naziemnych zbiorników bezciśnieniowych i niskociśnieniowych przeznaczonych do magazynowania materiałów ciekłych zapalnych

oraz żrących i trujących wykonywane w fazie wytwarzania zbiorników i w trakcie ich eksploatacji, przy czym nie dotyczy to następujących prób szczelności:

- hydraulicznej hydrostatycznej próby zbiorników naziemnych,
- bezciśnieniowej penetracyjnej próby zbiorników naziemnych,
- gazowej ciśnieniowej próby przy użyciu powietrza lub innego niepalnego gazu dla zbiorników naziemnych,
- hydraulicznej ciśnieniowej zbiorników naziemnych.

Uznania nie wymagają próby szczelności zbiorników wraz z osprzętem, wykonywane jako próby uzupełniające podczas badań odbiorczych zbiorników podziemnych, w przypadku dostępności do oględzin połączeń badanej części. Dotyczy to próby gazowej ciśnieniowej powietrznej lub z użyciem innego gazu niepalnego oraz próby hydraulicznej hydrostatycznej lub ciśnieniowej. Postępowanie uznaniowe techniki wykonywania próby szczelności zbiorników dla danej metody oraz laboratorium/zakładu wykonującego próby szczelności daną techniką prowadzi Centralne Laboratorium Dozoru Technicznego (CLDT). Rejestr uznanych przez UDT technik prób szczelności i metod oraz uznanych laboratoriów/zakładów do wykonywania prób szczelności, o których mowa powyżej, prowadzi CLDT [28].

Obecnie diagnostyka rurociągów jest unormowana prawnie. Zgodnie ze standardami obowiązującymi w UE rurociągi magistralne powinny być wyposażone w systemy pomiarowo-informatyczne, pozwalające na pełną kontrolę procesu tłoczenia. Gazociągi przed oddaniem do użytkowania należy poddać próbie wytrzymałości i szczelności zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie (Dz. U. z 2013 r. poz. 640).

W rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 21 listopada 2005 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać bazy i stacje paliw płynnych, rurociągi przesyłowe dalekosiężne służące do transportu ropy naftowej i produktów naftowych i ich usytuowanie (Dz. U. z 2005 r. Nr 243, poz. 2063; Dz. U. z 2014 r. poz. 1853) wskazano terminy badań technicznych i prób szczelności dla zbiorników i rurociągów przeznaczonych na paliwa ciekłe.

3. METODY I TECHNIKI BADANIA SZCZELNOŚCI

W badaniach szczelności wykorzystywane są różne zjawiska fizyczne i procesy fizyko-chemiczne, bardzo zróżnicowane wyposażenie badawcze i środki, a także różne techniki badania. Spośród kilkudziesięciu metod i technik (ponad 40, jak podano w [1, 2]) szersze zastosowanie w praktyce przemysłowej znalazło zaledwie kilkanaście. Ogólny podział dzieli metody na gazowe i cieczowe, próżniowe i ciśnieniowe oraz z i bez wykrywacza nieszczelności. Kilka metod nadaje się do zastosowania podczas eksploatacji urządzeń. Przy wyborze techniki badania należy uwzględnić [29]:

- zakres dopuszczalnych natężeń przecieków;
- rodzaj badania, tj. lokalizację przecieku, pomiar sumarycznego natężenia przecieku (całkowitego lub cząstkowego);
- konstrukcję elementu (np. wymiary, otwory, dostępność powierzchni, ograniczenia projektowe ciśnienia i próżni, materiały itp.);
- warunki pracy i warunki badania (np. płyny znakujące, temperatura, obciążenie), badania podczas wytwarzania lub eksploatacyjne;
- bezpieczeństwo i czynniki środowiskowe.

Należy zwrócić uwagę, że wiele technik badania nadaje się jedynie do lokalizacji przecieku, a wskazania natężenia przecieku są tylko przybliżone. Ponadto niektóre z technik mogą być stosowane wyłącznie do badania części obiektu. Badanie należy zawsze przeprowadzać z przepływem płynu w tym samym kierunku i z takim samym zakresem ciśnienia, jakie występują w warunkach eksploatacji obiektu. Zachowanie się nieszczelności (przecieku) podczas przepływu odwrotnego może być zdecydowanie odmienne. Badanie szczelności wykonuje się

z reguły w temperaturze otoczenia, jednak powstające różnice temperatur, w wyniku rozszerzalności cieplnej materiałów konstrukcyjnych, mogą powodować odkształcenia badanego obiektu lub zmianę jego stanu naprężeń. To z kolei może wpływać na rozmiar i kształt istniejącej nieszczelności, a w związku z tym na natężenie przecieku.

3.1. Metoda spektrometryczna

Metoda ta wykorzystuje proces oddzielania zjonizowanych atomów lub cząsteczek gazów o różnym stosunku masy do ładunku i pomiar odpowiednich prądów jonowych. W spektrometrach gazowych sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do ciśnienia cząstkowego danego gazu w mieszaninie.

Spektrometryczne wykrywacze nieszczelności wykrywają określony gaz próbny, np. wodór, argon, neon, hel. Najczęściej stosowanym w badaniach szczelności gazem znakującym jest hel, a helowe wykrywacze nieszczelności są podstawowymi przyrządami wykorzystywanymi w metodzie spektrometrycznej. Wykrywacze składają się z trzech podstawowych układów: głowicy analizującej, układu próżniowego oraz elektronicznego układu sterująco-pomiarowego. Konieczne jest ciągle odpompowywanie helu za pomocą układu próżniowego, który w czasie badania dostaje się z badanego obiektu bądź z układu przyłączenia tego obiektu do wykrywacza. Konwencjonalne układy wykrywaczy składające się z pompy obrotowej i pompy dyfuzyjnej są także uzupełniane konstrukcjami złożonymi z pomp obrotowych czy membranowych oraz pomp molekularnych lub turbomolekularnych. Przy badaniu dużych obiektów, takich jak wymienniki ciepła czy reaktory chemiczne, konieczne jest stosowanie pomocniczych urządzeń pompowych – najczęściej dużych, obrotowych pomp z chwytaczami oleju.

W metodzie spektrometrycznej z użyciem helowego wykrywacza nieszczelności stosowane są następujące techniki badawcze:

- Badanie próżniowe – polega na wytworzeniu w obiekcie wymaganej próżni, podawaniu helu na zewnętrzną powierzchnię ścianki, a następnie wykrywaniu helu wpływającego do obiektu. Wyróżnia się dwa podejścia:
 - technikę sondy strumieniowej – polega na kierowaniu cienkiego strumienia helu na połączenia albo uszczelnienia badanego obiektu. Pozwala na pomiar natężenia przecieku lokalnego oraz na lokalizację nieszczelności. Detektor nieszczelności jest stosowany do opróżniania wnętrza testowanego elementu, a sonda jest stosowana do spryskiwania gazem testowym miejsc podejrzewanych o nieszczelność.
 - próbę pod przykryciem – polega na otoczeniu obiektu sztywnym kołpakiem lub miękką osłoną i wypełnieniu powstałej przestrzeni helem pod ciśnieniem atmosferycznym. Pozwala na zmierzenie sumarycznego przecieku w całym obiekcie.

Czułość progowa badania próżniowego, czyli minimalne natężenie przecieku helu wykrywanego w tym badaniu, osiąga wartość 10^{-12} Pa m³ s⁻¹, a w przypadku wykorzystania zjawiska akumulacji gazu próbnego w układzie badawczym dochodzi do 10^{-13} Pa m³ s⁻¹.

- Badanie ciśnieniowe – polega na wypełnieniu obiektu gazem próbnym (zwykle mieszaniną helu z powietrzem lub azotem) o wymaganym nadciśnieniu i dobranej koncentracji helu, a następnie wykrywaniu przecieków helu przy użyciu sondy próbkującej (obwążującej), która przemieszcza się wzdłuż badanych połączeń lub uszczelnień w odległości około 2 mm od ich powierzchni. Sonda podłączona jest do wejścia detektora nieszczelności. Taka technika pozwala na zlokalizowanie nieszczelności i odznacza się czułością rzędu 10^{-7} Pa m³ s⁻¹, przy założeniu 10% koncentracji helu w gazie próbnym.

Wykorzystanie zjawiska akumulacji helu na przykład w przyssawce lub przestrzeni pod przykryciem (miękką osłoną) pozwala na podwyższenie progu czułości badania o rząd wielkości, jednak bez możliwości lokalizowania nieszczelności. Gazowa metoda sprawdzania szczelności poprzez akumulację przecieku w komorze polega na poddaniu badanego elementu działaniu ciśnienia gazu znakującego i umieszczeniu go w odpowiedniej komorze testowej. Wyciekający z badanego elementu gaz stopniowo akumuluje się wewnątrz komory testowej, osiągając coraz większe stężenie. Po pewnym czasie akumulacji detektor pobiera próbkę

gazu z komory testowej i mierzy jego stężenie. Ponieważ badany element jest zamknięty w komorze, w której gromadzi się łączny przeciek z całego elementu, to metoda ta nie może być używana do lokalizacji miejsc przecieków.

Technika ta stosowana jest do badania urządzeń o dużych objętościach wewnętrznych lub konstrukcji, gdzie trudno jest uzyskać wymaganą próżnię.

- Badanie ciśnieniowo-próżniowe – polega na tzw. nasycaniu, czyli działaniu helu o podwyższonym ciśnieniu (zwykle 0,2-0,5 MPa) na uszczelnione obiekty, zazwyczaj o niewielkich gabarytach, a następnie na sprawdzeniu tych obiektów w próżniowej komorze badawczej. W trakcie nasycania trwającego od kilku minut do kilku godzin hel wpływa poprzez nieuszczelnności do wnętrza obiektu, a następnie jego obecność jest wykrywana w komorze próżniowej połączonej z wykrywaczem helu. Graniczna czułość badania zależy od objętości obiektu oraz parametrów badania i zawiera się w przedziale 10^{-8} - 10^{-9} Pa m³ s⁻¹.

Najważniejszą zaletą metody spektrometrycznej jest najwyższa czułość badania, które jest wiarygodne i powtarzalne, a jego wynik jest niezależny od oceny operatora. Hel jako gaz znacznikowy ma wiele zalet, jest bowiem chemicznie obojętny, bezpieczny (niepalny, nietrujący), występuje w powietrzu w niewielkiej ilości (5 ppm, czyli niskie tło), a posiadając mały ciężar cząsteczkowy może przepływać przez najmniejsze nieuszczelnności. Zasadniczymi niedogodnościami tej metody są wysokie koszty aparatury. Więcej informacji o tej metodzie i niezbędnym wyposażeniu zawarto w [30, 31].

Metodą helową można także wykonać diagnostykę instalacji wodociągowych [20, 32]. Obecnie powszechnie stosowane w tym celu metody akustyczne są bardzo podatne na wpływ zewnętrznych zakłóceń dźwiękowych, które zakłócają szum powstały w wyniku wycieku. Duże zróżnicowanie sieci wodociągowych, wynikające z zastosowanych do ich budowy materiałów, oraz coraz większa ilość rurociągów wykonanych z tworzywa sztucznego przyczyniają się do opracowywania innych metod, które niezależnie od rodzaju materiału będą tak skuteczne jak metoda akustyczna. Co istotne, metodą helową można lokalizować wycieki w bardzo wczesnym stadium, tzn. gdy dopiero zaczynają się tworzyć. Taka sytuacja może mieć miejsce w przypadku mocno skorodowanego rurociągu, którego perforacja jest na tyle mała, że nie powoduje jeszcze przepuszczania wody, ale pozwala na wydostanie się gazu na powierzchnię. Detekcja wycieku odbywa się etapami. Pierwszym jest wtłaczanie gazu na przykład poprzez hydrant bądź zawór czerpany, zgodnie z kierunkiem przepływu wody, do eksploatowanego rurociągu, na początku odcinka, który będzie badany. Długość i średnica badanego rurociągu nie ma większego znaczenia. Długość może sięgać nawet kilku kilometrów. Wtłaczany gaz rozpraszany jest w wodzie i nie zagraża środowisku. Wtłaczanie helu odbywa się do momentu uzyskania odpowiedniego stężenia na samym końcu badanej odcinka. Po zakończeniu wtłaczania wymagane jest odczekanie około 12 godzin, w celu rozprzestrzenienia się gazu w gruncie. Kolejny etap to wykonanie pomiarów sondą pomiarową. Sondę wprowadza się do gruntu i poprzez nią próbka powietrza zawartego w gruncie zostaje przekazana do analizatora. Najwyższe stężenie gazu wskazuje miejsce występowania nieuszczelnności wodociągu.

3.2. Metoda halogenowa (chlorowcowa)

W metodzie halogenowej wykorzystano zjawisko wzrostu emisji jonów dodatnich z podgrzanej platyny w obecności gazów znakujących zawierających halogeny, czyli fluor, chlor, brom. Najczęściej stosowanymi w tej metodzie znacznikami są freony, dichlorometan i heksafluorek siarki.

Halogenowe wykrywacze nieuszczelnności są lekkimi, przenośnymi przyrządami wyposażonymi przeważnie w sondę próbkującą (obwążującą), co pozwala na lokalizację nieuszczelnności w badaniach ciśnieniowych na przykład spoin. Sondy próżniowe, umożliwiające oszacowanie sumarycznego natężenia przecieku, stanowią specjalne wyposażenie wykrywaczy i są rzadko stosowane.

Czułość progowa badania ciśnieniowego przy użyciu gazu próbnego zawierającego 100% freonu R-12 (dichlorodifluorometan) wynosi 10^{-7} Pa m³ s⁻¹. W innych przypadkach stosuje się

5-10% halogenów w gazie próbnym, a techniczna czułość badania zmienia się proporcjonalnie do koncentracji halogenów. Metoda halogenowa nie powinna być stosowana do badania obiektów wykonanych ze stali austenitycznej, gdyż halogeny mają wpływ na rozwój korozji naprężeniowej stali. Wykrywalność nieszczelności zależy od ciśnienia gazu próbnego w obiekcie (najczęściej 0,2-0,4 MPa), rodzaju i koncentracji gazu znakującego w gazie próbnym.

Ze względu na ochronę środowiska naturalnego wprowadzono ograniczenia w stosowaniu freonu R-12 (produkcję wstrzymano w 1995 r.) i R-22 (chlorodifluorometan, obecnie wycofywany z użycia). Spowodowało to zdecydowany regres metody. Stosowanie natomiast innych gazów znakujących (głównie SF₆) zmniejsza czułość techniczną badań i zwiększa ich koszt [26, 29].

3.3. Metoda ciepłoprzewodnościowa

W metodzie tej wykorzystano zróżnicowanie przewodności cieplnej gazów, co pozwala na wykrywanie dowolnego gazu lub pary (prócz powietrza i azotu) o względnej przewodności cieplnej w stosunku do suchego powietrza różnej od 1. Metoda opiera się na tym, że różne gazy przy takiej samej temperaturze, ciśnieniu i szybkości przepływu w różnym stopniu chłodzą nagrany obiekt. Wykrywacze nieszczelności są przyrządami przenośnymi, wyposażonymi w sondę próbkującą i umożliwiają zlokalizowanie nieszczelności, np. instalacji wodorowych czy gazu syntezowego, o natężeniu przecieku 10^{-6} Pa m³ s⁻¹, o ile w miejscu badania nie występuje wysokie tło gazu. Taką graniczną czułość można osiągnąć przemieszczając sondę w odległości około 2 mm od powierzchni połączeń lub uszczelnień z szybkością 5-10 mm s⁻¹. Odsunięcie wlotu sondy na odległość 4-5 mm zmniejsza czułość badania 10-15 razy. Czułość techniczna metody wynosi około 10^{-5} Pa m³ s⁻¹ dla wodoru i helu, a około 10^{-4} Pa m³ s⁻¹ dla dwutlenku węgla i metanu [2].

Ze względu na możliwość wykrywania przecieków różnych gazów, takich jak wodór, propan, freony, ditlenek węgla, heksafluorek siarki, metan czy acetylen, metoda ta stosowana jest głównie w badaniach eksploatacyjnych dużych instalacji ciśnieniowych, petrochemicznych, chłodniczych, butli gazowych. W ostatnich latach w przypadku badań instalacji gazów palnych wykrywacze zostały wyparte przez bardziej czułe, lżejsze wykrywacze z czujnikami katalitycznymi lub półprzewodnikowymi.

Zaletą metody jest łatwe prowadzenie badań, przenośna i tania aparatura badawcza. Do wad zalicza się zmienną, zależną od gazu, czułość, a także wpływ gazowych zanieczyszczeń atmosfery przemysłowej na wyniki badań.

3.4. Metody chemiczne

W metodach chemicznych wykorzystuje się zjawiska barwienia się odczynników pod wpływem działania określonych gazów czy par, co w badaniach eksploatacyjnych pozwala na wykrywanie przecieków chloru, ditlenku węgla, siarkowodoru, etylenu czy amoniaku. W badaniach z zastosowaniem gazów znakujących w praktyce przemysłowej jako znacznik dodawany do sprężonego powietrza (gaz próbnym) wykorzystuje się amoniak. Zastosowanie amoniaku pozwala na wykrywanie przecieków o natężeniu 10^{-8} Pa m³ s⁻¹ (czułość graniczna). Zwykle jednak stosuje się gaz próbnym o koncentracji amoniaku 2-10%, zatem techniczna czułość jest proporcjonalnie niższa i zależna również od występującego tła znacznika, i dochodzi do 10^{-5} Pa m³ s⁻¹.

Technika badania polega na doprowadzeniu do obiegu gazu próbnego o odpowiednim nadciśnieniu i ustalonej koncentracji amoniaku, a następnie detekcji przecieków gazu próbnego w warstwie farby wskaźnikowej naniesionej uprzednio na badane złącza albo w nałożonej na badaną powierzchnię warstwie odpowiedniego nośnika (bibuła, taśma) nasączonego odczynnikiem reagującym z amoniakiem. Wywoływaczami mogą być fenoloftaleina i błękit bromofenolowy.

Farby i odczynniki są bardzo wrażliwe na zanieczyszczenia, stąd niezwykle ważne jest dokładne oczyszczenie i chemiczne zneutralizowanie badanych powierzchni.

Podstawową zaletą metod chemicznych jest łatwość prowadzenia badań i możliwość ich stosowania w warunkach eksploatacyjnych, przy stosunkowo niskich kosztach. W przypadku metody amoniakalnej dodatkową zaletą jest jej wysoka czułość. Pomimo wielu zalet tej metody jej zastosowanie ogranicza się do kontroli szczelności urządzeń przemysłu chemicznego i petrochemicznego, w tym szczelności den zbiorników naziemnych spawanych bezpośrednio na podłożu [29]. Ograniczenie to jest związane z działaniem amoniaku na organizm ludzki oraz jego wpływem na właściwości niektórych materiałów konstrukcyjnych, np. stopów miedzi. W przypadku stosowania farb wskaźnikowych pojawia się problem oczyszczenia badanych powierzchni przed naniesieniem farby.

System monitoringu podziemnych magazynów gazu ma na celu wczesne wykrycie wzrostu stężenia metanu lub innych gazów palnych. Jednym ze sposobów prowadzenia monitoringu szczelności tych magazynów jest stosowanie metody znacznikowej, a związkami nadającymi się do tego są SF₆ i perfluorowęglowodory [22].

3.5. Metoda pęcherzykowa

Metoda pęcherzykowa polega na pokryciu powierzchni badanego obiektu cieczą i obserwacji pęcherzyków gazu przepływającego przez nieszczelności obiektu. W metodzie tej stosowane są dwie zasadnicze techniki badawcze, w zależności od wielkości i konstrukcji badanego obiektu:

- Badanie ciśnieniowe – polega na wytworzeniu w badanym obiekcie odpowiedniego ciśnienia gazu próbnego (najczęściej osuszone i odolejone powietrze, azot) i detekcji przecieków poprzez zanurzenie obiektu w cieczy próbnej (woda, olej silikonowy, glikol) lub też naniesieniu na badaną powierzchnię warstwy specjalnej substancji zawierającej środki pianotwórcze (detektor cieczowy).
Minimalne natężenie przecieku, jakie można wykryć wynosi 10^{-6} Pa m³ s⁻¹, natomiast czułość techniczna osiągnięta w warunkach przemysłowych jest szacowana na 10^{-4} Pa m³ s⁻¹.
W przypadku badania urządzeń i instalacji zbudowanych ze stali austenitycznych konieczne jest stosowanie atestowanego detektora cieczowego z obniżoną zawartością chloru oraz siarki. Do badania małych nieszczelności metoda ta jest bardzo czasochłonna i w znacznej mierze zależna od uważności operatora. Stosowanie takich środków, jak woda mydlana czy roztwór płynu do mycia naczyń wielokrotnie obniża czułość i efektywność badania [2].
- Badanie próżniowe – polega na zanurzeniu badanego obiektu w cieczy próbnej i wytworzeniu nad tą cieczą próżni. Pozwala na wykrycie nieszczelności o natężeniu przecieku 10^{-6} Pa m³ s⁻¹ w zamkniętych, niedużych obiektach.

Wariant próżniowy jest często stosowany do kontroli szczelności złączy spawanych. Jest to względnie szybka metoda testowania, która nie zakłóca czynności produkcyjnych. Pęknięcia, pory i brak wtopienia to typowe przyczyny wycieków wykrywanych tą metodą. Badanie polega na naniesieniu na badany odcinek złącza, poprzez spryskiwanie, rozpylenie lub szczotkowanie, ciągłej warstwy detektora cieczowego, a następnie przyłożeniu odpowiednio ukształtowanej ssawki próżniowej. Taka komora próżniowa wyposażona jest w gumowe uszczelki wokół jej otwartego dna i górnej pokrywy z przezroczystego pleksiglasu. Wywołuje się lekkie podciśnienie, zwykle poniżej 69 kPa (10 psi). Miejsca powstawania pęcherzyków gazu lub piany umożliwiają zlokalizowanie nieszczelności, a minimalne wykrywane natężenie przecieku wynosi 5×10^{-5} Pa m³ s⁻¹. Nie należy stosować roztworów gwałtownie spieniających się podczas nakładania na badaną powierzchnię.

W Polsce opracowano urządzenie UKS z komorą próżniową do badania złączy spawanych [29, 33-36], które od wielu lat podlega modernizacjom. Dostępne są komory próżniowe do różnych zastosowań, dostosowane do konturów powierzchni. W celu zapewnienia odpowiednich warunków obserwacji pęcherzyków, komory zostały wyposażone w oświetlenie diodowe o regulowanym natężeniu. Temperatura badanej powierzchni powinna wynosić od 10-50°C

przez cały czas trwania badania. Jednak nie może być niższa niż 5°C ze względu na możliwość kondensacji pary wodnej na badanych powierzchniach oraz w nieszczelnościach. W celu zachowania temperatury w podanym powyżej zakresie dozwolone jest miejscowe ogrzanie lub schłodzenie badanego obszaru.

Metoda pęcherzykowa jest prostą i efektywną metodą kontroli szczelności zarówno małych, jak i dużych urządzeń i instalacji. Zazwyczaj takim próbom poddaje się rurociągi, zbiorniki i inne konstrukcje, których dopuszczenie do eksploatacji wymaga szczelności złączy spawanych. Niskie koszty środków do badań oraz możliwość wykrywania przecieków dowolnego gazu rozszerzają zakres stosowania metody na obszar badań eksploatacyjnych. Metoda ta nie zastępuje ciśnieniowej próby szczelności. Wadą tej metody jest konieczność oczyszczenia powierzchni obiektów po badaniach, pewna subiektywność oceny wyników badania, zależność między innymi od warunków otoczenia (temperatura, ciśnienie, oświetlenie).

3.6. Metody akustyczne

Wśród metod opartych na analizie fal dźwiękowych można wyróżnić kilka technik, które bazują na detekcji dźwięków mających różne pochodzenie albo różny sposób generowania.

W akustycznej metodzie badania szczelności wykorzystano zjawisko powstawania fal akustycznych podczas burzliwego przepływu gazu przez nieszczelności w urządzeniach ciśnieniowych. Akustyczne wykrywacze nieszczelności są lekkimi, przenośnymi przyrządami, wyposażonymi w układ zasilania, wzmacniacz i mikrofon o bardzo ukierunkowanej charakterystyce. Mikrofony są bardzo czułe i przystosowane do fal o częstotliwości 35-45 kHz. Umożliwiają lokalizację nieszczelności nawet z odległości kilku metrów, bez względu na rodzaj i właściwości fizyko-chemiczne gazu (dla dużych nieszczelności o natężeniu przecieku powyżej $10 \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$). Czułość badania jednak nie jest wysoka i przy bezpośrednim dostępie do badanego miejsca wynosi maksymalnie $10^{-3} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. W warunkach przemysłowych, gdzie zawsze występuje tło akustyczne, przyjmuje się, że są wykrywane nieszczelności o przecieku większym niż $10^{-1} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Badanie polega na przemieszczaniu mikrofonu wzdłuż połączeń, uszczelnień lub zamknięć urządzenia ciśnieniowego czy instalacji wypełnionej gazem i wykrywaniu pojawiających się sygnałów akustycznych, przetwarzanych w wykrywaczu na sygnały słyszalne lub wskazania cyfrowe. Optymalne wyniki uzyskuje się, gdy mikrofon znajduje się w odległości 50-100 mm od powierzchni badanej i przemieszcza się z szybkością nie większą niż 20 mm s^{-1} . Do dokładnej lokalizacji nieszczelności służą różnego rodzaju kolimatory zakładane na mikrofon, jednak konieczne jest wtedy zmniejszenie szybkości przemieszczania mikrofonu do $2-5 \text{ mm s}^{-1}$.

Opracowano również beciśnieniową odmianę tej metody do badania konstrukcji płaskich lub otwartych, czyli nie nadających się do wypełnienia gazem. Jest to technika emitera akustycznego i wykorzystuje zjawisko przechodzenia fal akustycznych przez falowód jakim jest nieszczelność. W tym celu stosuje się emiter akustyczny dużej mocy, generujący fale propagowane we wszystkich kierunkach, który umieszcza się wewnątrz obiektu (np. zbiornika, komory, pokrywy). W tym czasie mikrofon wykrywacza przemieszcza się wzdłuż badanych uszczelnień. Czułość tej techniki jest zbliżona do wyżej opisanej techniki i w warunkach przemysłowych nie przekracza $10^{-1} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Mimo niskiej czułości i trudności związanych z tłem akustycznym, metoda akustyczna znajduje coraz szersze zastosowanie. Może stanowić wstępną metodę kontroli szczelności, pozwala na ujawnienie uszkodzeń na wczesnym etapie ich występowania i na badanie całych obiektów, a tym samym obniżenie kosztów diagnostyki. Zapewnia szybkie wykrywanie dużych przecieków dowolnego gazu w warunkach eksploatacyjnych. W przypadku badań w warunkach zagrożenia wybuchem konieczne jest stosowanie akustycznych wykrywaczy w wykonaniu Ex (z zabezpieczeniem przeciwwybuchowym).

Badanie metodą emisji akustycznej (EA) stosuje się m.in. do monitoringu zbiorników ciśnieniowych i rurociągów. Wykorzystuje się w tym celu czujniki montowane na badanym obiekcie. Sygnały emisji akustycznej są reakcją czujnika na fale dźwiękowe generowane w ośrodku stałym. Fale te są podobne do fal dźwiękowych rozchodzących się w powietrzu

i innych płynach, ale są bardziej złożone. Procesami, którym towarzyszy emisja akustyczna są zarówno zmiany na poziomie mikro, jak i makro, takie jak: odkształcenie plastyczne, pękanie materiału, korozja, przecieki (nieszczelności), przemiany strukturalne i fazowe, reakcje chemiczne oraz delaminacja, pękanie włókien i osnowy w kompozytach, itp. Badanie polega na rejestracji drgań harmonicznycch za pomocą czujników piezoelektrycznych, które zamieniają odkształcenie wywołane falą sprężystą na sygnał elektryczny. Sygnał ten charakteryzuje się bardzo niskim napięciem, dlatego musi być wzmocniony, poddany filtracji usuwającej tło akustyczne i po zamianie na postać cyfrową jest obrabiany za pomocą komputera. Metodą tą można określić stopień korozji, pęknięcia materiału lub zlokalizować wycieki bez kosztownego i czasochłonnego opróżniania zbiorników. W trakcie badania urządzeń wykrywano są nieciągłości „aktywne” tzn. takie, które w określonych warunkach pracy będą przejawiały tendencję do rozwoju, co wyróżnia tę metodę spośród innych metod NDT. Podejmowane są także próby badania tą metodą spoin [3, 37]. Metoda emisji akustycznej jest na świecie uznawana za odpowiednią do badań okresowych dużych urządzeń m.in. w przemyśle petrochemicznym i chemicznym [38, 39]. W elektrociepłowniach instaluje się systemy akustycznego nadzoru szczelności kotła, które składają się z kilkunastu mikrofonów zainstalowanych na jego powierzchni [40].

Informacje uzyskane dzięki odpowiednim czujnikom akustycznym są wykorzystywane do utworzenia profilu hałasu w gazociągu. Odchylenia od tego profilu sygnalizują wyciek gazu [4]. Wadą tej metody jest konieczność montowania wielu czujników akustycznych, aby móc w sposób zdalny monitorować dłuższe odcinki gazociągów, gdyż jeśli pomiędzy parą czujników akustycznych wystąpi więcej niż jedna nieszczelność, to ich prawidłowe zlokalizowanie nie będzie możliwe. Metoda ta nie pozwala też na wykrywanie niedużych nieszczelności, których sygnał akustyczny nieznacznie różni się od szumów. Można wprawdzie zwiększyć czułość metody poprzez dobór odpowiednich progów detekcji, doprowadzi to jednak prawdopodobnie do generowania dużej liczby fałszywych alarmów. Trwają badania eksperymentalne nad zastosowaniem odpowiednich algorytmów do analizy sygnałów akustycznych, tak aby uzyskać jak najniższy błąd lokalizacji nieszczelności [41, 42].

W przypadku rurociągów podziemnych systemy AE zbierają sygnały akustyczne z wykorzystaniem czujników umieszczonych na płaszczu rurociągu. Powoduje to konieczność częścioviego odkrycia rur. Ponadto pojawia się problem, gdy rurociąg jest trudno dostępny, a jego rozkopanie niemożliwe, na przykład gdy jego trasa biegnie pod dnem zbiorników wodnych czy terenem zabudowanym. Rozwiązaniem, nad którym trwają prace, jest umieszczenie czujnika AE wewnątrz rurociągu i rejestrowanie fal rozchodzących się za pośrednictwem przetłaczanego medium. Połączenie tego sposobu z modułem transportowym przenoszącym czujnik umożliwia badanie rurociągu w każdym miejscu oraz unika się wpływu zakłóceń ze środowiska zewnętrznego [43].

Jednym z zadań diagnostyki sieci wodociągowej jest ograniczenie rzeczywistych strat wody, polegające na ujawnieniu, a następnie zlokalizowaniu miejsca wycieku. W ujawnianiu nieszczelności znaczenie ma właściwie skonfigurowany system monitoringu przepływu i ciśnienia w sieci wodociągowej, dzięki któremu możliwe jest szybkie zawężenie obszaru, na którym nieszczelność wystąpiła. Kolejnym z kroków jest precyzyjne zlokalizowanie miejsca wycieku. Najbardziej znaną obecnie metodą lokalizacji jest korelacja wykorzystująca analizę dźwięków wytwarzanych przez wyciek. Dźwięk przenosi się po materiale rury lub przez wodę płynącą w wodociągu i odbierany jest przez czujniki piezoelektryczne lub hydrofony. Do wykonania korelacji niezbędne jest uzyskanie minimum dwóch punktów dostępowych, poprzez które możliwe jest podłączenie się do rurociągu lub do zabudowanej na nim armatury. Akustyczna metoda korelacji wykorzystująca czujniki piezoelektryczne jest skuteczna podczas lokalizacji wycieków w rurociągach wykonanych przede wszystkim z materiałów dobrze przenoszących dźwięki, takich jak np. stal lub żeliwo. Dzięki zdolności przenoszenia dźwięku w przepływającej wodzie, za pomocą hydrofonów możliwe jest zlokalizowanie wycieku także na rurociągach z tworzywa sztucznego, lecz nie zawsze z pożądaną precyzją. Niedoskonałość metody ujawnia się w przypadku hydrantów o niesprawnych odwodnieniach. Taka sytuacja często uniemożliwia wykonanie wiarygodnego pomiaru. Kolejną powszechnie wykorzystywaną metodą akustyczną o wysokiej skuteczności jest lokalizowanie wycieku za pomocą geofonu, czyli odpowiednio

skonstruowanego mikrofonu gruntowego zapewniającego odsłuch bezpośrednio nad rurociągiem [20, 44]. Metody akustyczne nie zawsze się sprawdzają. Wykonanie precyzyjnej korelacji lub jakiegokolwiek innego rodzaju odsłuchu sieci wodociągowej jest utrudnione zwłaszcza w centrach miast, przy ruchliwych drogach, a niemal niemożliwe podczas kontroli rurociągu łączącego się z komorą redukcyjną, gdzie szum urządzenia redukującego ciśnienie wytwarza dźwięk podobny do dźwięku powstałego przy awarii sieci. Kontrola akustyczna szczelności odcinka rurociągu, w niedalekiej odległości od połączenia z komorą reduktorową skutecznie zakłóci odsłuch. Stosując metody akustyczne konieczne jest także utrzymanie w sieci minimalnego ciśnienia około 2 bar, bowiem poniżej tego poziomu wyciek jest już mniej słyszalny. W przypadku spadku ciśnienia w rurociągu poniżej 1 bar – ciśnienia koniecznego do detekcji – wyciek może przestać być słyszalny.

3.7. Metoda manometryczna

Metoda manometryczna polega na pomiarze zmian ciśnienia w czasie z zastosowaniem układów manometrycznych z ciśnieniomierzami hydrostatycznymi lub różnicowymi, próżniomierzami itp. Metoda obejmuje dwie techniki:

- Badanie ciśnieniowe (technika spadku ciśnienia, próba pneumatyczna) – polega na doprowadzeniu gazu próbnego (zwykle suche, odolejone powietrze) pod ciśnieniem większym od roboczego do obiektu badanego, odizolowaniu tego obiektu systemem zaworów i pomiarze spadku ciśnienia w czasie. Przy takim badaniu mierzy się natężenie przecieku sumarycznego, a więc przecieków obiektu oraz tych występujących na złączach, zaworach itp. Technika ta zwykle jest stosowana do badania dużych, pojedynczych obiektów. Czulość progowa wynosi $10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$, natomiast czulość techniczna – $10^{-3} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. Czas badania szczelności powinien wynosić co najmniej 24 godziny. Sposób prowadzenia pomiarów jest analogiczny do techniki wzrostu ciśnienia. W przypadku dużych zbiorników i w związku z tym długich okresów pomiaru spadku ciśnienia w pewnych okolicznościach może być konieczne uwzględnienie wpływu zmian temperatury. Może się zdarzyć, że system schłodzi się poniżej ciśnienia nasycenia pary wodnej, powodując skraplanie się wody i zafałszowanie pomiaru. Metoda wymaga aby zbiornik przed pomiarem był opróżniony i wyczyszczony, dlatego jest optymalna w przypadku, gdy planowane jest czyszczenie zbiornika (np. rewizja wewnętrzna). Metoda badania ma tę dodatkową zaletę, że prowadzona jest przy ciśnieniu wyższym od ciśnienia eksploatacyjnego. Stwierdzenie szczelności w takich warunkach daje większą pewność, że zbiornik będzie zachowywał się bezawaryjnie w normalnych warunkach eksploatacyjnych.

Dla instalacji pneumatycznych sprężonego powietrza zaproponowano dwie nowe metody pomiaru przecieku – z otworem kalibrowanym i z przepływem kontrolowanym – z wykorzystaniem urządzenia pomiarowego włączonego na odgałęzieniu rurociągu. Metody te polegają na określeniu relacji między przeciekiem w instalacji pneumatycznej a przepływem kontrolowanym na podstawie pomiaru spadku ciśnienia w dwóch przedziałach czasu. W pierwszej metodzie do określenia przecieku wymagana jest znajomość charakterystyki przepływowej otworu (zwężki, dyszy) kalibrowanego. W drugiej metodzie wymagany jest przepływomierz do pomiaru przepływu przez zawór dławiący nastawny. Zaproponowane metody pomiaru przecieku w instalacji pneumatycznej, w odróżnieniu od powszechnie stosowanych metod pośrednich, nie wymagają znajomości parametrów zbiornika i sprężarki. Można je stosować do pomiaru przecieku w wyodrębnionych gałęziach lub miejscach instalacji pneumatycznej: rurociągu głównym, przewodach rozprowadzających, przewodach przyłączeniowych do odbiorników (maszyn, urządzeń, narzędzi). Dzięki tym metodom obniża się koszty pomiaru przecieku, ponieważ zbędny jest demontaż lub przeróbka rurociągu, wystarczy podłączyć urządzenie pomiarowe w dowolnym miejscu instalacji pneumatycznej przez zawór kulowy lub w punkcie poboru sprężonego powietrza [24, 45-47].

- Badanie próżniowe (technika wzrostu ciśnienia) – polega na odpompowywaniu zawartości obiektu do ustalonej wartości ciśnienia, odizolowaniu obiektu układem zaworów próżniowych

i rejestracji zmian ciśnienia w czasie. W tej technice mogą pojawić się problemy z uzyskaniem wymaganej próżni, a okres odpompowywania musi być na tyle długi aby usunąć zaadsorbowane na powierzchni obiektu pary i gazy, których uwalnianie ma wpływ na wyniki badania. Czulość progowa wynosi $10^{-6} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$, natomiast czulość techniczna – $10^{-4} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. Po opróżnieniu obiektu i zamknięciu zaworów mierzy się czas Δt , w którym ciśnienie wzrasta o określoną wartość Δp . Następnie zawory zostają otwarte i uruchamia się na pewien czas pompę, po czym zostaje powtórzony pomiar wzrostu ciśnienia. Jeżeli czas Δt dla wielkości wzrostu ciśnienia Δp pozostaje stały, to mamy do czynienia z nieszczelnością, przy założeniu, że czas oczekiwania między dwoma pomiarami wzrostu ciśnienia był wystarczająco długi. Długość czasu oczekiwania zależy od charakteru i wielkości urządzenia. Jeżeli czas narastania ciśnienia Δp wydłuża się, efekt ten jest najprawdopodobniej spowodowany zmniejszonym wydzielaniem się gazu po wewnętrznej stronie aparatu. Można również podjąć próbę odróżnienia wycieków od zanieczyszczeń, interpretując krzywą przedstawiającą wzrost ciśnienia w funkcji czasu. Krzywa ta musi być linią prostą w miejscu, w którym występuje nieszczelność, nawet przy wyższych ciśnieniach. Jeśli wzrost ciśnienia jest spowodowany uwalnianiem się gazu ze ścianek, to będzie on stopniowo maleć i zbliżać się do ostatecznej, stabilnej wartości. W większości przypadków oba zjawiska wystąpią jednocześnie, więc oddzielenie tych dwóch przyczyn jest często trudne, a nawet niemożliwe [30].

Metoda manometryczna stosowana jest do badania szczelności różnych obiektów, w tym wymienników ciepła, urządzeń ciśnieniowych i instalacji. Jej zaletą jest łatwość prowadzenia badań, pomiar natężenia przecieku (sumarycznego) i niski koszt. Do wad zaliczyć należy stosunkowo niską czulość badania zależną od objętości obiektu i czasu prowadzenia próby oraz znaczny wpływ warunków zewnętrznych, takich jak temperatura i ciśnienie atmosferyczne, na wynik i wiarygodność badania. Ponadto metoda manometryczna w zasadzie nie pozwala na zlokalizowanie nieszczelności.

3.8. Metoda pomiaru przepływu

Jest to metoda umożliwiająca pomiar natężenia przepływu summarycznego. Polega ona na pomiarze ilości gazu wpływającego do obiektu badanego w celu utrzymania stałej wartości ciśnienia w tym obiekcie. Metoda ma czulość progową około $10^{-5} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$, a w warunkach przemysłowych dla dużych obiektów osiąga $10^{-3} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. Podobnie jak w przypadku metody manometrycznej trzeba uwzględnić wpływ czynników zewnętrznych, szczególnie temperatury. Metoda pomiaru nie pozwala na zlokalizowanie nieszczelności.

3.9. Metoda penetracyjna

Metoda ta polega na pokryciu jednej strony ścianki obiektu cieczą penetracyjną i rejestracji jej przecieków pojawiających się w wyniku jej przepływu pod działaniem sił kapilarnych przez nieszczelności (nieciągłości powierzchniowe). Najczęściej ciecz penetracyjna jest nanoszona na wewnętrzną powierzchnię obiektu, a rejestracja przecieków odbywa się na stronie zewnętrznej. Ze względu na rodzaj użytej cieczy wyróżnia się dwie techniki badania:

- Barwną – stosuje się handlowe zestawy penetracyjne używane do wykrywania nieciągłości powierzchniowych, które pozwalają na uzyskanie czulości progowej $10^{-6} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. Czulość techniczna wynosi $10^{-4} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$. Penetranty te mają zwykle barwę czerwoną, amarantową lub fioletową, co umożliwia uzyskanie wysokiego kontrastu na białym tle wywołującego oraz obserwację w świetle białym.
- Fluorescencyjną – w składzie penetranta znajduje się luminofor. Przecieki cieczy wykrywane są po napromienieniu badanej powierzchni promieniami UV. Czulość progowa dochodzi do $10^{-8} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$, a techniczna wynosi $10^{-6} \text{ Pa m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Penetranta charakteryzują między innymi: napięcie powierzchniowe, kąt zwilżania badanego materiału, lepkość, gęstość [29, 48]. Wywołowacz nanosi się na badaną powierzchnię po

usunięciu z niej penetranta. Jest to substancja silnie chłonna penetrant, który wniknął i pozostał w nieciągłościach. Wywoływacz to zwykle drobnoziarnisty, biały proszek, np. kreda, kaolin, talk. Oprócz wywoływaczy przewidzianych do stosowania w połączeniu z barwnymi lub fluorescencyjnymi penetrantami istnieje grupa wywoływaczy służących do wykrywania nieszczelności zbiorników z cieczami o wysokich własnościach kapilarnych jak nafta i rozpuszczalniki. Wywoływacze te zawierają składniki, które w zetknięciu z pełniącą rolę penetranta cieczą zawartą w zbiorniku intensywnie się zabarwiają.

Po określonym czasie, zależnym od własności użytego zestawu penetracyjnego i geometrii nieszczelności, ciecz penetracyjna przepływająca pod wpływem ciśnienia kapilarnego rozplynie się na powierzchni zewnętrznej obiektu lub w warstwie wywoływacza naniesionego na tę powierzchnię, tworząc plamę obserwowaną w świetle widzialnym lub ultrafioletowym. W praktyce przyjmuje się, że oględziny powierzchni przy prowadzeniu badań w temperaturze 5-40°C przeprowadza się po 60, 90 i 150 minutach odpowiednio dla obiektów o grubości ścianki < 6 mm, ≤ 15 mm i ≤ 25 mm. Podczas prowadzenia badań w temperaturze niższej niż 5°C należy stosować specjalne zestawy penetracyjne, a czas wnikania penetranta należy zwiększyć dwukrotnie. Ogólne zasady tych badań podano w normie PN-EN ISO 3452-1:2021-12 „Badania nieniszczące – Badania penetracyjne – Część 1: Zasady ogólne”.

Penetracyjna metoda badania szczelności jest z powodzeniem stosowana do kontroli szczelności połączeń spawanych i zgrzewanych. Jest łatwa, efektywna i dość tania. Ograniczeniem jest grubość spoiny – do 25 mm oraz dostęp do obu stron złącza. Przy badaniach penetracyjnych wymagane jest staranne oczyszczenie badanej powierzchni z powłok malarskich, rdzy i wszelkich innych zanieczyszczeń, np. tłuszczów.

3.10. Metoda hydrostatyczna

Próba wodna (nazywana również hydrauliczną) polega na wypełnieniu badanego obiektu cieczą próbną, wytworzeniu określonego nadciśnienia i następnie rejestracji przecieków cieczy próbnej na zewnętrznej powierzchni obiektu. Najczęściej używana jest woda, jednak jej przecieki nie są łatwo wykrywalne na powierzchniach dużych zbiorników czy rozbudowanych instalacji. Dla poprawienia wykrywalności nieszczelności stosuje się dodatki luminoforów rozpuszczalnych w wodzie i świecących pod wpływem promieniowania UV albo specjalne farby. Progowa czułość metody hydrostatycznej z użyciem wody wynosi około 5×10^{-7} Pa m³ s⁻¹, a techniczna – 10^{-5} Pa m³ s⁻¹. Natomiast dla metody hydrostatycznej z użyciem wody i luminoforów są to odpowiednio około 10^{-8} Pa m³ s⁻¹ i 10^{-7} Pa m³ s⁻¹.

Większość urządzeń ciśnieniowych jest badana metodą hydrostatyczną, gdyż pozwala ona na równoczesną ocenę wytrzymałości i szczelności urządzenia czy instalacji. Umożliwia ocenę szczelności całego obiektu poprzez pomiar spadku ciśnienia oraz zlokalizowanie poszczególnych nieszczelności obiektu.

Po zamknięciu i uszczelnieniu wszelkich wlotów, włączów itp. oraz zamontowaniu wymaganych zaworów bezpieczeństwa, ciśnieniomierzy i mierników temperatury badany obiekt jest całkowicie wypełniany (bez tzw. poduszek powietrznych) cieczą próbną o temperaturze nie niższej niż 10°C i nie wyższej niż 40°C. Po podniesieniu ciśnienia do 50% wartości ciśnienia próbnego należy przeprowadzić wstępne oględziny, a następnie zwiększyć powoli ciśnienie do wartości ciśnienia próbnego, podanego w dokumentacji konstrukcyjnej. Szybkość wzrostu ciśnienia nie powinna przekraczać 0,1 MPa min⁻¹. Należy utrzymać to ciśnienie przez 5 minut, obniżyć powoli do wartości ciśnienia obliczeniowego i znowu podnieść do wartości ciśnienia próbnego, a następnie odciąć obiekt układem zaworów i przez 10 minut rejestrować spadek ciśnienia. Potem należy obniżyć powoli ciśnienie do wartości ciśnienia obliczeniowego i utrzymywać go przez minimum 6 minut na każdy 1 cm grubości ścianki, lecz nie dłużej niż 2 godziny oraz przeprowadzić dokładne oględziny powierzchni zewnętrznej obiektu, zaznaczając wszelkie przecieki cieczy próbnej. Natężenie oświetlenia badanych powierzchni powinno umożliwiać wykrywanie kropli o średnicy 1 mm. W przypadku stosowania cieczy próbnej z luminoforem oględziny przeprowadza się w świetle ultrafioletowym, możliwie w warunkach zaciemnionych.

Po zakończeniu badań ciśnienie w obiekcie należy obniżyć powoli do wartości ciśnienia atmosferycznego, a następnie usunąć ciecz i osuszyć obiekt (o ile jest to wymagane).

Ze względu na łatwość prowadzenia i niski koszt badań metoda jest szeroko stosowana do badania urządzeń, rurociągów stalowych i instalacji ciśnieniowych w czasie produkcji i po remontach. Podstawowe wady to ograniczenia temperaturowe i wpływ użytych cieczy na wyniki badania oraz zależność tych wyników od dostępu do badanych powierzchni, ich oświetlenia, warunków zewnętrznych panujących w czasie badania.

Próba hydrostatyczna jest często stosowana do badania bardzo dużych obiektów, takich jak stalowe zbiorniki o pojemności 100 000 m³ przeznaczone do magazynowania ropy naftowej [49] i paliw, kotły w elektrociepłowniach [50].

3.11. Metoda znaczników radioaktywnych

Radioznaczniki w stosunku do konwencjonalnych znaczników oraz metod charakteryzują się następującymi zaletami [51]:

- Są łatwe do detekcji. Mogą zostać wykryte nawet po bardzo wysokich rozcieńczeniach (10^{-9} g/L), co pozwala na dodanie niewielkiej ilości znacznika, który nie zakłóca przepływu.
- Radioznaczniki emitujące promieniowanie gamma mogą przenikać przez grube ściany badanego układu i są wykrywalne z zewnątrz. Jest to ważne w przypadku badań „online”.
- Dostępna jest szeroka gama odpowiednich radioizotopów do przygotowania kompatybilnych radioznaczników do różnych zastosowań.
- Mogą być stosowane w trudnych warunkach przemysłowych, ponieważ ich radioaktywność nie ulega zmianie pod wpływem ciśnienia, temperatury, warunków chemicznych i fizycznych.
- Wyniki uzyskuje się wkrótce po zakończeniu badania.
- Dla wielu zastosowań w zakładach przemysłowych radioznaczniki nie mają konkurencyjnej alternatywy.

Metoda znaczników radioaktywnych należy do metod rzadziej stosowanych w praktyce, mimo obiektywnych zalet, a jej rozwój uzależniony jest od specjalnych potrzeb występujących na przykład przy badaniu szczelności rurociągów podziemnych. Jako gaz znakujący w gazie próbnym najczęściej stosuje się krypton-85 (⁸⁵Kr). W przypadku przecieków w podziemnych ropociągach do medium roboczego wtryskiwana jest porcja cieczy znakowana bromem-82 (⁸²Br), a następnie przez ropociąg przepuszczana jest kapsuła z detektorem promieniowania gamma. Czułość progowa dla gazu ⁸⁵Kr dochodzi do 10^{-10} Pa m³ s⁻¹, a techniczna wynosi 10^{-8} Pa m³ s⁻¹ [26].

Badaniom można poddawać małe pojemniki, do których ⁸⁵Kr dodaje się w trakcie zamknięcia. Następnie badany obiekt umieszcza się w komorze próżniowej, w której dokonuje się pomiaru natężenia przecieku gazu znakującego. Badanie takie z reguły przeprowadza się na specjalnych stanowiskach, zwykle wyposażonych w półautomatyczne podajniki. Zaletą metody z użyciem ⁸⁵Kr jest wysoka czułość oraz możliwość prowadzenia badań w warunkach produkcji seryjnej. Wadą natomiast jest konieczność zachowania specjalnych środków ostrożności, wysoki koszt stanowisk badawczych, niezdolność do lokalizacji dużych przecieków. W ten sam sposób możliwe jest również użycie helu jako gazu testowego (zob. rozdz. 3.1).

Generalnie istnieją trzy metody radioznacznikowe stosowane do lokalizowania nieszczelności w zakopanych rurociągach [51]:

- Metoda tłoka z detektorem promieniowania
Metoda ta stosowana jest zazwyczaj do lokalizowania małych przecieków w rurociągach tłokowalnych o średnicy większej niż 20 cm. Polega na odizolowaniu podejrzanego odcinka rurociągu o długości kilku kilometrów za pomocą zwór na obu końcach i wykopaniu rowów w kilku miejscach wzdłuż niego. W wykopach jako źródła znaczników (markery lokalizacyjne) umieszcza się zapieczętowane źródła promieniowania gamma ⁶⁰Co o aktywności kilku MBq. Odizolowany odcinek rurociągu wypełnia się wymieszaniem jednorodnym roztworem znacznika promieniotwórczego, zwykle ⁸²Br w postaci bromku amonu rozpuszczonego

w roztworze wodnym. Odcinek ten jest następnie przez kilka godzin poddawany ciśnieniu o wartości ciśnienia roboczego, aby do gleby wyciekła wystarczająca do wykrycia ilość wody znakowanej radioznacznikiem. Potem odcinek zostaje pozbawiony ciśnienia, a znajdująca się w nim znakowana woda jest przenoszona do następnego podejrzanego odcinka lub przechowywana w celu bezpiecznego usunięcia. Rurociąg jest płukany świeżą wodą, dopóki poziom promieniowania w narażonej części odcinka (punkt wtrysku) nie powróci do poziomu zbliżonego do tła. W kolejnym etapie zintegrowany układ, zawierający detektor promieniowania połączony z licznikiem impulsów i jednostką gromadzenia danych, zwykle określany jako „pipeline instrumentation gauge” (PIG), jest przepychany ze stałą prędkością przez rurociąg przy użyciu ciśnienia hydraulicznego. Zespół jest zasilany baterią, posiada zegar z ustawionym czasem włączenia i wyłączenia oraz umożliwia rejestrację danych z zadanym interwałem. Tłok jest odzyskiwany na drugim końcu odcinka, a zarejestrowane dane są pobierane do komputera w celu ich interpretacji.

- **Metoda migracji znacznika**

Jest przydatna do lokalizowania drobnych nieszczelności w rurociągach o małej średnicy (nietłokowalnych). Technika ta polega na odizolowaniu podejrzanego odcinka rurociągu i wypełnieniu go wodą w przypadku rurociągu transportującego wodę lub gazem/powietrzem w przypadku rurociągu transportującego gaz. Na jednym końcu rurociągu wstrzykuje się odpowiedni znacznik promieniotwórczy ($\text{CH}_3^{82}\text{Br}$), przy czym wylot jest zaślepiony. Ruch radioznacznika wzdłuż rurociągu obserwuje się za pomocą detektorów promieniowania połączonych z licznikami, które znajdują się w odpowiednio rozmieszczonych rowach. Przez cały czas trwania badania rurociąg utrzymywany jest pod stałym ciśnieniem dzięki stałemu uzupełnianiu wody lub powietrza utraconego w wyniku nieszczelności. W tych statycznych warunkach plama znacznika nie przemieści się poza miejsce przecieku i w ten sposób można zidentyfikować przeciekający odcinek między rowami. Lokalizacja odcinka przeciekającego może być dalej zawężona poprzez powtórzenie eksperymentu.

W przypadku kontroli szczelności gazociągów metoda znacznikowa polega na wstrzyknięciu do gazociągu małej ilości znacznika. Znacznik wraz z gazem ziemnym będzie przenikać z gazociągu do gleby w miejscu występowania nieszczelności, gdzie następuje pomiar radiometryczny promieniowania gamma. Niezależnie od tego, jaki typ znacznika zostanie wykorzystany, istotną przeszkodą w prowadzeniu kontroli szczelności gazociągów metodami znacznikowymi może być brak odpowiedniej infrastruktury umożliwiającej wprowadzenie znacznika do gazociągu [4]. Jeżeli nieszczelność zlokalizowana jest w znacznej odległości od miejsca, w którym można wprowadzić znacznik do gazociągu (np. stacji redukcyjno-pomiarowej), wtedy należy użyć większej ilości znacznika, co w istotny sposób wpływa na koszt realizacji pomiaru. Kolejnym istotnym ograniczeniem w stosowaniu tej metody jest fakt, że może być ona wykorzystywana tylko na nierozgałęzionym odcinku gazociągu oraz pomiędzy miejscem wprowadzenia znacznika a lokalizacją mierzonej nieszczelności nie mogą występować inne nieszczelności [6].

- **Metoda spadku prędkości**

Metoda ta jest przydatna do lokalizacji dużych nieszczelności w zakopanych rurociągach, które powodują znaczny spadek prędkości przepływu poza punktem nieszczelności. Polega na impulsowym wstrzyknięciu radioznacznika do rurociągu w odpowiednim miejscu wraz z cieczą, która w nim płynie, i monitorowanie jego przepływu za pomocą detektorów zamontowanych w rowach wykopanych aż do rurociągu. Pozwala to określić czas przejścia znacznika pomiędzy detektorami, a następnie obliczyć jego prędkość w każdym odcinku rurociągu. Lokalizację wycieku można dodatkowo zawęzić poprzez powtórzenie testu z większą liczbą miejsc detekcji w podejrzanym odcinku.

W Polsce techniki radioizotopowe do wykrywania nieszczelności rozwijano w kilku ośrodkach naukowych od lat sześćdziesiątych XX w. [52]. W ramach badań w dawnym Instytucie Badań Jądrowych (IBJ) opracowano w latach siedemdziesiątych metodę wykrywania nieszczelności w ropociągach o średnicy 200-600 mm. W kolejnych latach prace w tej dziedzinie kontynuowano w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ). W metodzie tej bromek metylu znaczonej radioaktywnym ^{82}Br zostaje wprowadzony do płynącej rurociągiem podziemnym

ropy. Po pewnym czasie (30-60 minut) za znacznikiem wprowadzany jest do rurociągu specjalny radiometr (detektor), który rejestruje naturalne promieniowanie w rurociągu, sygnały od radioaktywnych znaczników odległości (^{60}Co , około 2 MBq) ułożonych na ścianach rurociągu oraz sygnał pochodzący od znacznika ewentualnego wycieku. Przed właściwym pomiarem wykonuje się pomiar naturalnego tła promieniowania jonizującego w rurociągu za pomocą tego samego radiometru. Po zakończonych pomiarach porównuje się oba zapisy. Jeżeli ścianki wewnętrzne rurociągu są czyste, to zapis powinien być podobny do zapisu uzyskanego podczas pomiaru tła. Ewentualny wyciek byłby widoczny jako dodatkowy pik. Mogą też wystąpić dodatkowe piki pochodzące od znacznika, który gromadzi się na obudowie detektora, aby potem zatrzymać się w miejscu źle otwartych zasuw lub odgałęzień. Istnieje zatem konieczność sprawdzenia wszystkich podejrzanych punktów na rurociągu. Dokładność lokalizacji wynosi kilka metrów i jest zależna od liczby znaczników odległości. Lokalizację szczegółową wycieku uzyskuje się na podstawie sondowania gruntu nad rurociągiem w strefie wybranej na podstawie zapisu rejestratora. W celu poprawy wykrywalności poprzez zwiększenie radioaktywnej porcji znacznika, zbudowano specjalną wytwornicę do przeróbki i dozowania znacznika ^{82}Br o aktywności 370 GBq (10 Ci). Pozwoliło to na osiągnięcie czułości metody wyrażonej wykrywalnością wycieków o wielkości kilkudziesięciu $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$. Wytwornica jest urządzeniem zbudowanym z dwóch zbiorników umieszczonych w grubościennych, ołowianych pojemnikach ochronnych. Jeden z nich jest naczyniem reakcyjnym, gdzie wprowadza się ampułki z K^{82}Br i odczynniki chemiczne. Po szczelnym zamknięciu naczynia i rozbiciu ampulek dokonuje się przetwarzanie bromku potasu na gazowy bromek metylu, który przedostaje się do drugiego zbiornika, skąd po zakończeniu reakcji dozowany jest do rurociągu. Znacznik po dojściu do końca badanego rurociągu jest magazynowany w zbiorniku tak długo aż stężenie ^{82}Br w produkcie naftowym spadnie do $3 \mu\text{Ci l}^{-1}$ (111 kBq l^{-1}) [52-57]. Metody tradycyjne, takie jak hydrauliczna, pneumatyczna czy pęcherzykowa, są bądź mało efektywne ze względu na swą czułość, bądź niebezpieczne w przypadku jakiegokolwiek awarii. Stosowanie tych metod wymaga czasochłonnych prac przygotowawczych. Natomiast metoda radioznacznikowa umożliwia wykrycie małych nieszczelności, ponadto w trakcie normalnej eksploatacji [53].

Kontrola szczelności podziemnych rurociągów, do których nie można wprowadzić detektora polega na detekcji promieniowania gamma emitowanego przez znacznik, który wydobywa się przez nieszczelność i desorbuje ku górnym warstwom ziemi. Radiometr jest przemieszczany tuż nad powierzchnią ziemi na całej trasie rurociągu lub jego odcinku. Sposób ten wymaga okresowego wyłączenia badanego rurociągu z normalnej eksploatacji. Osiągana czułość pomiaru nie jest gorsza niż $1,0 \text{ l h}^{-1}$ dla cieczy i $0,5 \text{ l h}^{-1}$ dla gazu. Wyróżnić można kilka wariantów metody, które różnią się sposobem tłoczenia medium próbnego i radioznacznika [53, 55, 57]:

- Metodę znakowania całej objętości rurociągu, przeznaczoną do badania krótkich odcinków rurociągu z przewidywanymi małymi nieszczelnościami. Wtłaczanie znacznika i medium kontrolnego dokonuje się w jednym lub więcej punktach rurociągu. Zaleca się stosowanie możliwie wysokiego ciśnienia próby. Po osiągnięciu ustalonego ciśnienia przerywa się dołtaczanie medium i czeka kilka godzin. W tym czasie znakowane medium przedostaje się przez najmniejsze nieszczelności do górnych warstw ziemi. Zaletą tej metody jest możliwość wykrycia jednorazowo wszystkich nieszczelności, bez odkopywania rurociągu.
- Metodę jednorazowego impulsowego dozowania znacznika, przeznaczoną do badania krótkich rurociągów z przewidywanymi dużymi nieszczelnościami. Po napełnieniu rurociągu i osiągnięciu założonego ciśnienia przerywa się tłoczenie i w środkowej strefie rurociągu wprowadza się jednym impulsem porcję znacznika radioaktywnego. Znacznik wraz z medium przemieszcza się do nieszczelności, przez którą migruje ku powierzchni ziemi, gdzie następuje pomiar. Dozowanie znacznika w środkowej strefie ma na celu skrócenie czasu lokalizacji nieszczelności. Przy małych nieszczelnościach konieczne jest odkopanie rurociągu w celu śledzenia ruchu znacznika.
- Metodę impulsowego dozowania znacznika w kilku punktach rurociągu, służącą do badania długich odcinków rurociągu z przewidywanymi małymi nieszczelnościami. Lokalizacja nieszczelności polega na śledzeniu ruchu znacznika przy użyciu radiometrów umieszczonych po obu stronach miejsc jego iniekcji. Porcje znacznika są bardzo małe, rzędu pojedynczych

μCi , a dopiero ostatnia porcja podawana w pobliżu wstępnie zlokalizowanej nieszczelności jest na tyle duża, że można ją zarejestrować w miejscu istnienia nieszczelności.

- Metodę impulsowego dozowania znacznika z ciągłym dotłaczaniem medium, przeznaczoną do kontroli dowolnej długości rurociągów do transportu gazu z przewidywanymi dużymi nieszczelnościami. Z uwagi na to, że jednorazowe natłoczenie rurociągu może nie wystarczyć, aby doprowadzić znacznik do stref nieszczelności, konieczne jest ciągle dotłaczanie gazu stałym ciśnieniem.

Mianem „sondy wędrującej” określono tandemową konstrukcję, a w późniejszej wersji jednomodułową, opracowaną w Akademii Górniczo-Hutniczej (AGH) [58-60]. Służyła ona do lokalizacji wycieków radioznacznika wymuszonych w trakcie pomiaru w rurociągu o średnicy powyżej 250 mm. Charakteryzowała się dokładnością lokalizacji przecieku 1 m przy prędkości przesuwu sondy 1 m s^{-1} . Sonda składała się z dwóch oddzielnych bloków, zamontowanych w hermetycznych metalowych cylindrach połączonych za pomocą sprzęgła przegubowego i kabli elektrycznych. W jednym z cylindrów umieszczono detektor scyntylacyjny NaI(Tl) , w drugim – układy rejestracji danych. Zespół obu bloków przemieszczał się w rurociągu pod działaniem ciśnienia tłocznej wody na tłok prowadzący, z którym połączony był cylinder detektora.

Technikami radioizotopowymi można również lokalizować przecieki w dnach zbiorników posadowionych na gruncie nieprzepuszczalnym i utwardzonym przepuszczalnym. Ze względu na dostępność zbiorniki naziemne można podzielić na zbiorniki z jednostronnym dostępem do dna i zbiorniki bez dostępu. Do kontroli szczelności den zbiorników bez dostępu od środka mogą być wykorzystywane tylko dwie metody: drenażowa i wód gruntowych. Dla drugiego typu zbiorników stosowane są opisane poniżej metody. Ogólna zasada polega na przyspieszaniu przepływu cieczy w kontrolowanym zbiorniku w kierunku nieszczelności przez zastosowanie specjalnych osłon lub naczyń.

- Metoda znakowania strefowego

Za pomocą specjalnego systemu rurek wprowadza się w strefę dna roztwór K^{82}Br z nieaktywnym KBr . Roztwór znakujący powinien mieć temperaturę niższą lub równą temperaturze wody oraz gęstość większą niż woda w zbiorniku. Dzięki temu przez kilka godzin znacznik utrzymuje się tuż przy dnie. Po opróżnieniu zbiornika, nad jego dnem wykrywa się strefy o podwyższonym promieniowaniu, jeśli wystąpiły przecieki. Praktycznie należy kontrolować jedynie spoiny, gdyż wystąpienie nieszczelności w materiale rodzimym jest mało prawdopodobne. Po lokalizacji takich miejsc, w celu potwierdzenia występowania w nich nieszczelności, można zastosować którąś z poniższych metod lub metodę tradycyjną, np. penetracyjną lub próżniową. Aktywności stosowane w omawianej technice są duże, do 10 Ci (370 GBq) dla ^{82}Br i o rząd mniejsze dla ^{24}Na , i pozwalają na wykrycie przecieków nie mniejszych niż $0,5 \text{ l h}^{-1}$. Ze względu na stosunkowo duże zagrożenie radiologiczne technika ta nie jest polecana. Praktycznie stosuje się jej wersję bez lokalizacji miejsca wycieku, tzn. bez pomiarów wymagających pracy ludzi wewnątrz zaznakowanego zbiornika [52, 55, 57, 61, 62].

- Technika płaszczowa

Można ją stosować do lokalizacji szczegółowej nieszczelności. Polega na napełnieniu zbiornika wodą do wysokości około 50 cm, a następnie odgrodzeniu badanej strefy od reszty zbiornika poprzez nakrycie jej tzw. płaszczem. Płaszcz jest to płyta uszczelniona przylgami na swym obwodzie i dociśnięta ciężarkami do dna zbiornika. Posiada otwór z wąskim przewodem rurowym z dozownikiem znacznika. Następnie śledzi się ruch znacznika w dozowniku, czy przemieszcza się wraz z cieczą w kierunku wycieku, czy też pozostaje w miejscu (brak przecieku). Kanał dozownika powinien być ustawiony dokładnie w położeniu poziomym. Jako znacznik promieniotwórczy może być stosowany roztwór bromku amonu lub potasu o aktywności od $0,1$ do $1 \mu\text{Ci}$. Warunkiem prawidłowego badania szczelności dna jest wyeliminowanie lub zmniejszenie wpływu czynników powodujących zmiany geometryczne całego układu, jaki stanowi strefa badanego dna oraz przylegający szczelnie płaszcz z dozownikiem. W tym celu należy usunąć bańki powietrza, w szczególności z gąbczastych przylg płaszcza, ewentualnie ustawić falochrony wokół badanej strefy. Czas potrzebny do wykonania takiej próby szczelności radiometrem scyntylacyjnym wynosi od kilku do kilkanastu minut, przy wykrywalności $10\text{-}20 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$ [52, 55, 61, 62].

- **Technika membranowa**
Wykorzystywana jest do kontroli szczelności i lokalizowania strefy wykrytej nieszczelności. Urządzenie składa się z okrągłej elastycznej membrany z kołnierzem przyłgowym, zamkniętego źródła promieniowania gamma ^{60}Co o aktywności $6 \mu\text{Ci}$ (250 kBq) przymocowanego w środkowej strefie membrany elastycznym sznurem i korpusu pozwalającego na przemieszczanie urządzenia po dnie kontrolowanego zbiornika. Urządzenie ustawione na dnie napełnionego wodą do wysokości około 1 m zbiornika tworzy z dnem naczynie zamknięte. W przypadku istnienia nieszczelności w strefie ograniczonej membraną ciśnienie pod membraną będzie malało i w efekcie będzie ona osiadała, powodując rejestrowany ruch źródła promieniowania. Prędkość tego ruchu jest tym większa im większy jest wyciek, a pomiar intensywności promieniowania umożliwia wykrycie nieszczelności, szacunkowe określenie jej wydatku i lokalizację strefy jej występowania. Tą techniką można wykryć nieszczelności o wydatku nie mniejszym niż $0,5 \text{ l h}^{-1}$ [55, 61, 62].
- **Technika pływakowa**
Polega na wymuszeniu przepływu cieczy w strefie nieszczelności w kierunku pionowym. W tym celu na dnie zbiornika ustawione jest doszczelnione do niego przyłgami otwarte naczynie. Z naczynia wyprowadzona jest nad poziom wody wąska rurka, w której znajduje się szczelny pływak z zamkniętym źródłem promieniowania gamma ^{137}Cs o aktywności $5 \mu\text{Ci}$ (200 kBq). W przypadku nieszczelności pływak w rurce opada, a jego ruch jest rejestrowany układem pomiarowym z kolimowaną sondą scyntylicyjną. Technika ta pozwala zlokalizować strefę wycieku i wykrywać nieszczelności o wydatku nie mniejszym niż $50 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$ [55, 61, 62].
- **Technika wód gruntowych**
Może być realizowana z użyciem różnego rodzaju znaczników, w tym radioizotopowych. Tą techniką można stwierdzić lub wykluczyć istnienie nieszczelności, a jej ewentualna lokalizacja musi być wykonana innymi technikami. Zaletą metody jest możliwość kontrolowania zbiorników podczas normalnej eksploatacji i bez obecności ludzi w zbiorniku. Technika polega na wprowadzeniu w warstwę przydenną znacznika, a następnie na szukaniu jego obecności w specjalnie przygotowanych odwiertach lub już istniejących dojeściach do wody gruntowej w otoczeniu zbiornika. Przed kontrolą konieczna jest znajomość charakterystyki hydrologicznej strefy okołozbiornikowej [55, 61, 62].
Opracowano także sposób wykrywania i lokalizacji nieszczelności wykładzin metalowych w zbiornikach, który zasadniczo podobny jest do opisanego wyżej znakowania strefowego [63]. Polega on na napełnieniu badanego zbiornika wodą, do której dodaje się rozpuszczalny związek promieniotwórczy $^{113\text{m}}\text{In}$ o aktywności około 13 mCi m^{-3} ($0,5 \text{ MBq m}^{-3}$), łatwo adsorbujący się na powierzchni wykładziny ścian i dna, a jednocześnie dobrze desorbujący się po przemyciu. Związek ten rozprawdza się w zbiorniku za pomocą mieszańca, pompy cyrkulacyjnej lub sprężonym powietrzem. Następnie zbiornik opróżnia się, przemywa jego wnętrze i wykonuje rozkład natężenia promieniowania na wewnętrznych powierzchniach.
Kontrola szczelności zbiorników podziemnych bez osłon betonowych, całkowicie pokrytych nadkładem ziemi jest przeprowadzana w sposób analogiczny do kontroli rurociągów podziemnych. Znakowany bromek metylu zostaje wprowadzony do zbiornika, który wcześniej został opróżniony i zaślepiiony. Następnie w zbiorniku należy podnieść ciśnienie do ustalonego ciśnienia roboczego za pomocą powietrza lub azotu. Korzystne jest podawanie znacznika razem z medium kontrolnym. W przypadku istnienia nieszczelności pewna część radioaktywnego znacznika przedostaje się wraz z wyciekiem na zewnątrz zbiornika, gdzie jest adsorbowana w gruncie. Prowadzone na powierzchni nadkładu pomiary radiometryczne pozwalają na stwierdzenie nieszczelności. W celu zlokalizowania miejsca przecieku konieczne jest stopniowe zdejmowanie nadkładu i jego kontrola radiologiczna. Wadą tej metody jest stosowanie dużych aktywności znacznika. Czulości pomiarów w celu lokalizacji nieszczelności można zwiększyć, rozpoczynając pomiary radiometryczne po pewnym czasie, zwykle po około 10 godzinach. W zależności od parametrów geometrycznych zbiornika i grubości warstwy nadkładu, pomiary prowadzi się przez okres nie dłuższy niż 100 godzin. Przedstawioną metodą można kontrolować zbiorniki położone na głębokość nie większej niż 10 m [55, 61, 62].

Metoda radioznacznikowa, mimo że nie jest próbą wytrzymałościową jest komplementarna do prób ciśnieniowych: hydraulicznej i pneumatycznej. Uzyskane tą metodą wyniki są uznawane przez UDT i stanowią jeden z parametrów warunkujących dopuszczenie obiektu do dalszej eksploatacji. W niektórych obiektach ze względów technologicznych lub technicznych próba hydrauliczna nie może być stosowana. Dotyczy to obiektów o dużej wysokości i małej średnicy – zbyt duże obciążenie fundamentów obiektów przemysłu organicznego i obiektów z wewnętrznymi okładzinami – gdyż wymagają później długotrwałego suszenia, co w konsekwencji wydłuża czas postępu instalacji. Wykonano badania porównawcze wielkości nieszczelności z tej samej szczeliny metodą pneumatyczną izotopową i próbą wodną w celu porównania czułości obu metod [64]. Stwierdzono, że tam gdzie zachodzi konieczność wykonania próby szczelności i lokalizacji miejsc nieszczelnych metoda wykorzystująca znaczniki promieniotwórcze jest ze względów technicznych i ekonomicznych znacznie lepsza od metod tradycyjnych.

Radioznacznik gazowy po wymieszaniu się z medium kontrolnym i rozprowadzeniu po obiekcie w trakcie podnoszenia ciśnienia przemieszcza się w kierunku nieszczelności i tam jest adsorbowany na adsorbentach naturalnych (ziemia, izolacja termiczna) lub sztucznych (specjalne materiały nakładane przed rozpoczęciem kontroli) [56, 57, 65, 66]. Pomiar radiometryczny adsorbenta pozwala na precyzyjną lokalizację nieszczelności. Przebieg badań dla wybranych obiektów przedstawiono poniżej.

- Kontrola szczelności obiektów pokrytych izolacją prowadzona jest z zewnątrz po opróżnieniu urządzenia. W każdym przypadku zarejestrowania miejsca o podwyższonym tle konieczne jest sprawdzenie poprzez demontaż izolacji i pomiar skażenia radioaktywnego. Brak skażenia izolacji świadczy o braku nieszczelności, a podwyższenie liczby zliczeń najczęściej spowodowane jest adsorpcją znacznika na wewnętrznych powierzchniach obiektu.
- Kontrola szczelności spawów na obiektach nieizolowanych musi być poprzedzona oklejeniem wszystkich miejsc występowania ewentualnych nieszczelności materiałem adsorpcyjnym. Najczęściej używana jest jednostronnie powlekana klejem taśma bawełniana lub spieniona gąbka poliuretanowa. Zastosowanie adsorbenta dwuwarstwowego z węglem aktywowanym pozwala na 3–4-krotne zwiększenie czułości pomiarów, co pozwala na użycie mniej aktywnego znacznika. Dalszy tok postępowania jest identyczny jak dla obiektów z izolacją [55, 57, 65].
- Kontrola szczelności obiektów obudowanych inną przestrzenią (np. wymienniki ciepła) oparta jest na pomiarze intensywności promieniowania znacznika przechodzącego z przestrzeni znakowanej do przestrzeni kontrolowanej przez ewentualną nieszczelność. Pomiar prowadzony jest na pochłaniaczu do gazów zainstalowanym na dowolnym przyłączy do badanej przestrzeni. Metoda nie pozwala na lokalizację nieszczelności, ale jej czułość wynosi około $5 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$ [55, 57, 65].
- Kontrola szczelności zasuw polega na impulsowym podaniu znacznika, który dobrze miesza się z medium kontrolnym lub roboczym, przed zamkniętą kontrolowaną zasuwą, a następnie wytwarzana jest różnica ciśnień po obu stronach zasuw. W przypadku nieszczelności medium ze znacznikiem przesuwają się w kierunku niższego ciśnienia, a szybkość tego ruchu zależy od wielkości nieszczelności. Fakt pojawiania się znacznika w polu widzenia kolejnych sond scyntylicyjnych świadczy o przecieku [55, 65].

Opracowano również tzw. specyficzną metodę kontroli szczelności, która określa wielkość nieszczelności obiektu bez wskazywania miejsc nieszczelnych. Pomiaru dokonuje się bez wprowadzenia znacznika radioizotopowego do obiektu. W tym celu stosuje się zestaw dwóch zbiorników – jeden z izotopem ^{85}Kr , a drugi kompensujący ciśnienie, które połączone są systemem wąskich rurek pomiarowych z obiektem kontrolowanym. W odpowiednich miejscach na rurkach są rozmieszczone sondy pomiarowe pracujące z wielokanałowym analizatorem. Pomiar polega na obserwacji ruchu znacznika w rurkach i w przypadku istnienia nieszczelności w badanym obiekcie mierzy się wielkość tego przesunięcia. Pozwala to na wyliczenie wydatku nieszczelności z czułością $10 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}$. Zaletą tej metody w porównaniu do opisanych powyżej jest znacznie krótszy czas przeprowadzania kontroli [66].

3.12. Inne metody – metody optyczne i technologia inteligentnych tłoków

Metody optyczne

Rurociągi, ze względu na duże rozmiary oraz złożoną dynamikę procesu tłoczenia, są obiektami o małej podatności diagnostycznej. Ich diagnozowanie, w tym lokalizacja i identyfikacja wycieków, jest trudne i skomplikowane, dlatego nadal poszukuje się nowych metod detekcji wycieków. Wśród metod technicznych wykrywania nieszczelności w rurociągach gazu ważną grupę stanowią metody optyczne. Można je podzielić na pasywne oraz aktywne. Metody aktywne wymagają zastosowania źródła promieniowania elektromagnetycznego do przeprowadzenia monitoringu badanego obszaru, natomiast pasywne wykorzystują wyłącznie promieniowanie tła lub promieniowanie emitowane przez gaz [4].

Podstawowym zjawiskiem fizycznym wykorzystywanym do wykrywania nieszczelności gazociągów aktywną metodą optyczną jest absorpcja oraz rozpraszanie promieniowania spowodowane obecnością metanu w powietrzu. Do detekcji nieszczelności stosowane są najczęściej dwa rodzaje laserów: impulsowe lub diodowe, a także milimetrowe fale radiowe. Lasery impulsowe wykorzystywane są w systemach typu LIDAR (ang. light detection and ranging), jednak stosowanie lasera impulsowego do wykrywania nieszczelności sieci gazowych jest stosunkowo kosztownym rozwiązaniem. Zdecydowanie tańsze jest zastosowanie urządzenia na bazie lasera diodowego, który generuje promieniowanie elektromagnetyczne o regulowanej długości fali. Detektory tego typu charakteryzują się niską granicą wykrywalności, która wynosi 5 ppm. Ich zaletą jest też to, że mogą być wykorzystywane jako urządzenia ręczne oraz jako urządzenia do monitorowania gazociągów z samochodów lub z powietrza. W urządzeniu modulowana jest długość fali emitowanego promieniowania laserowego w zakresie promieniowania absorbowanego do nieabsorbowanego przez metan. Z osłabienia wiązki promieniowania, po odpowiedniej obróbce sygnału elektrycznego, można określić, jak duża była ilość „czystego metanu” w warstwie powietrza (lub ogólnie innego gazu), przez którą przechodziła wiązka promieniowania laserowego emitowanego przez urządzenie i powracającego do detektora po odbiciu się od przeszkód terenowych [67]. Systemy oparte na milimetrowych falach radiowych wykorzystują fakt, że metan jako gaz lżejszy od powietrza migruje nad powierzchnię gruntu. W tej metodzie do detekcji nieszczelności wykorzystywana jest zarówno zmiana gęstości powietrza spowodowana obecnością metanu, jak i zjawisko rozproszenia fali przez cząstki metanu. Dużą zaletą takich czujników jest to, że mogą pracować w każdych warunkach pogodowych oraz w różnych warunkach środowiskowych, w tym w obszarze zadymionym. Metody te nie są jednak pozbawione wad, do których można zaliczyć wysokie koszty zakupu i eksploatacji urządzeń oraz konieczność realizacji pomiarów przez wykwalifikowaną obsługę, a także możliwość generowania fałszywych alarmów.

Do metod pasywnych należy metoda termowizyjna. Umożliwia ona wizualizację przecieków gazów poprzez wykorzystanie zjawiska absorpcji promieniowania podczerwonego przez chmurę gazową powstającą w miejscu nieszczelności. Dodatkowo przy przeciekach w instalacjach wysokociśnieniowych występuje zjawisko miejscowego schłodzenia ścianki. Precyzja tej metody w dużej mierze zależy od rozdzielczości zastosowanej kamery. W metodach termowizyjnych w wersji uproszczonej wykorzystuje się różnicę temperatur pomiędzy ulatniającym się gazem a otoczeniem, natomiast w bardziej zaawansowanych wersjach – absorpcję promieniowania podczerwonego przez cząsteczki metanu. Kamery termowizyjne wykorzystujące absorpcję promieniowania podczerwonego mogą być z powodzeniem stosowane do wykrywania nieszczelności zlokalizowanych zarówno w infrastrukturze nadziemnej, jak i podziemnej. Zaletami metody termowizyjnej są duża szybkość i precyzja w wykrywaniu miejsc wycieku gazu oraz możliwość realizowania pomiarów w trakcie typowej pracy instalacji. Monitoring wizyjny rurociągów przeznaczony jest na krótkie odległości. Jest to zatem interesująca opcja do zastosowania w przypadku przeprowadzania badań na obszarach krytycznych, takich jak tereny firmowe lub obszary o dużym znaczeniu.

Promieniowanie podczerwone i metody termowizyjne wykorzystywane są z powodzeniem do identyfikacji miejsc uchodzenia gazu, jednak ich zastosowanie do pomiarów wielkości emisji metanu nie wydaje się już takie oczywiste [6]. Metoda taka została opracowana na podstawie

analizy obrazów termowizyjnych otrzymanych z różnych nieszczelnych elementów z zastosowaniem symulacji Monte Carlo oraz metod statystycznych. Ilościowe określenie wielkości wycieku jest więc oparte wyłącznie na podejściu statystycznym na podstawie wielkości obłoku obserwowanego w podczerwieni. W metodzie tej na wielkość obłoku ma wpływ nie tylko ciśnienie i ilość uwalnianego gazu, ale także warunki klimatyczne. Metoda oparta na analizie obrazów uzyskanych w podczerwieni została przetestowana do oceny wielkości wycieków gazu ziemnego w realnych warunkach pogodowych, a uzyskane wyniki potwierdziły możliwość jej stosowania do pomiaru wycieków mniejszych niż $0,1 \text{ kg s}^{-1}$, przy czym prędkość wiatru jest głównym czynnikiem wpływającym na dokładność pomiarów.

Technologia inteligentnych tłoków

Jednym z narzędzi pozwalających określić poziom niepewności i ryzyko wynikające z użytkowania poszczególnych rurociągów tworzących system przesyłowy, są okresowe inspekcje rurociągów. Zasadniczym ich celem jest wykrycie wad i defektów ścianki przewodu, co pozwala uniknąć awarii i strat na skutek nieszczelności [68]. Aby utrzymać wymagany przepływ gazu czy innego przesyłanego medium, należy regularnie oczyszczać wnętrze gazociągu ze wszelkich zanieczyszczeń, które przenoszone są przez gaz lub dostają się do środka rur na skutek prac remontowych i budowlanych. Czyszczenie rurociągów wykonuje się za pomocą specjalistycznych urządzeń zwanych tłokami (tzw. „świnki”), a sam proces określa się mianem tłokowania. Ze względu na odgrywaną rolę tłoki można podzielić na czyszczące i pomiarowe (określane również jako badawcze, diagnostyczne). Tłoki czyszczące wyposażone są w metalowe lub plastikowe szczotki, które usuwają z wewnętrznych ścian rur osad i zanieczyszczenia. Natomiast tłoki pomiarowe wyposażone są w aparaturę pomiarową opartą na ultradźwiękach lub na zasadzie upływności strumienia indukcji magnetycznej (ang. magnetic flux leakage – MFL), które skanują powierzchnię rury w celu wykrycia mikropęknięć, nieciągłości materiałowych lub ubytków materiału.

Tłok to urządzenie służące również do separacji produktów, pomiaru otworu wewnętrznego, lokalizacji przeszkód, kalibracji miernika pętli, usuwania cieczy lub gazu. Tłoki pomiarowe określane są też terminem „tłoki inteligentne”. Dla sprawnego wykonania inspekcji niezbędne jest by badany odcinek rurociągu wyposażony był w śluzę nadawczo-odbiorczą. Tłok jest wysyłany wzdłuż rurociągu ze śluzę nadawczą w kierunku przepływu i napędzany ciśnieniem cieczy lub gazu. Tłoki zwykle są ułożone w zespół składający się z kilku tłoków czyszczących i pomiarowych. Wśród elementów eliminujących możliwość badania rurociągu tłokami inteligentnymi na pierwszym miejscu wymienić należy występowanie w nim tzw. łuków segmentowych, tzn. spoin łączących segmenty rur pod pewnym kątem. O tym, czy planowany do użycia tłok będzie w stanie pokonać tego typu łuki decyduje wykonawca inspekcji. Podobną, negatywną rolę w ocenie odgrywają przewężenia, zarówno średnicy rur, jak i wynikające z wystających do wewnątrz elementów armatury. Decyzję o możliwości użycia tłoka podejmuje się indywidualnie dla każdego przypadku [69, 70]. Sondy do rurociągów podmorskich są dużo bardziej kosztowne od rozwiązań lądowych, gdyż czasami muszą pokonywać kilkusetkilometrowe odcinki, np. ze stacji brzegowej do platformy serwisowej. Do badania szczelności takich rurociągów lub ich odcinków w trakcie eksploatacji tylko wyjątkowo wykorzystywana jest metoda ciśnieniowa. Z reguły inspekcja tą metodą jest niezbędna po naprawach i wiąże się z potencjalnym zanieczyszczeniem środowiska morskiego przez medium wykorzystywane w trakcie jej przeprowadzania. Najbardziej rozpowszechnione są metody: wizualna, ultradźwiękowa, magnetyczna i emisji akustycznej.

W metodzie MFL do namagnesowania rurociągu stosuje się silny magnes trwały. Wszelkie zmiany w ściance rury, takie jak np. korozja, zmieniają linie strumienia magnetycznego, które są następnie rejestrowane przez sondy czujnikowe przymocowane do tłoka. Po tłokowaniu, zarejestrowane sygnały są oceniane na podstawie sygnałów referencyjnych w celu wykrycia wszelkich defektów lub nieprawidłowości w ściance rury [68, 71].

W przypadku metody opartej na ultradźwiękach tłok transmituje impulsy ultradźwiękowe w ścianę rurociągu i odbiera odbite sygnały. Sygnały są odbijane zarówno przez wewnętrzne, jak i zewnętrzne ścianki rury i na podstawie prędkości ruchu tłoka można określić grubość ścianki [68, 72]. Ponadto istnieją typy tłoków, których działanie opiera się na wykrywaniu dźwięków

emitowanych przez wyciek za pomocą hydrofonu oraz na pomiarze przepływu związanego z nieszczelnością za pomocą bardzo czułych przepływomierzy [70].

Od 1990 r. istnieje międzynarodowe stowarzyszenie Pigging Products and Services Association (PPSA) zrzeszające obecnie około 100 członków z ponad 20 krajów, które zajmuje się doradztwem w zakresie diagnostyki rurociągów za pomocą różnego rodzaju tłoków. PPSA organizuje m.in. konferencje, seminaria i szkolenia, dostarczając aktualne informacje na temat najnowszych technologii i usług operatorom rurociągów i podmiotom powiązanych z tą branżą. Wśród opublikowanych przez PPSA materiałów są przewodnik oraz katalog zawierający profile działalności firm, w tym wytwórców i dystrybutorów tłoków służących do wykrywania wycieków [73].

4. LITERATURA

- [1]. Hlebowicz, J. (2001). *Badanie szczelności urządzeń i instalacji technicznych. Poradnik*. Warszawa: Biuro Gamma.
- [2]. Hlebowicz, J. (2000). Metody kontroli szczelności urządzeń ciśnieniowych. *Energetyka*, 3, 124-126.
- [3]. Kubicki, K. (2018). Diagnostyka elementów konstrukcji stalowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo*, 24, 190-196.
- [4]. Holewa-Rataj, J., Kukulska-Zajac, E. (2017). Przegląd metod wykrywania nieszczelności sieci gazowych. *Nafta-Gaz*, 11, 871-877.
- [5]. Kwestarz, M. A., Osiadacz, A. J. (2019). Method for leak detection and location for gas networks. *Archives of Mining Sciences*, 64, 1, 131-150.
- [6]. Holewa-Rataj, J., Kukulska-Zajac, E. (2018). Przegląd metod pomiaru emisji metanu wraz z analizą możliwości ich zastosowania do pomiaru emisji metanu z gazociągów. *Nafta-Gaz*, 1, 37-43.
- [7]. Fiedler, J. (2014). *An overview of pipeline leak detection technologies*. Pobrane z <http://asgmt.com/wp-content/uploads/2016/02/004.pdf>.
- [8]. Murvay, P.-S., Silea, I. (2012). A survey on gas leak detection and localization techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 6, 966-973.
- [9]. Adegboye, M. A., Fung, W. K., Karnik, A. (2019). Recent Advances in Pipeline Monitoring and Oil Leakage Detection Technologies: Principles and Approaches. *Sensors*, 19, 11, 2548.
- [10]. Korlapati, N. V. S., Khan, F., Noor, Q., Mirza, S., Vaddiraju, S. (2022). Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2, 4, 100074.
- [11]. Jin, H., Zhang, L., Liang, W., Ding, Q. (2014). Integrated leakage detection and localization model for gas pipelines based on the acoustic wave method. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 27, 74-78.
- [12]. Shan, H., Zhu, Y. (2023). Gas Pipeline Leakage Detection Method Based on IUPLCD and GS-TBSVM. *Processes*, 11, 1, 278.
- [13]. Sobczak, R., Turkowski, M., Bratek, A., Słowikowski, M., Bogucki, A. (2007). Metody i systemy detekcji nieszczelności rurociągów dalekosieżnych (1). *Pomiary Automatyka Robotyka*, 11, 4, 15-19.
- [14]. Sobczak, R., Turkowski, M., Bratek, A., Słowikowski, M., Bogucki, A. (2007). Metody i systemy detekcji nieszczelności rurociągów dalekosieżnych (2). *Pomiary Automatyka Robotyka*, 11, 5, 9-12.
- [15]. Turkowski, M., Bratek, A., Słowikowski, M., Bogucki, A. (2009). Postępy i problemy realizacji systemów detekcji i lokalizacji nieszczelności rurociągów. *Pomiary Automatyka Robotyka*, 13, 1, 5-9.
- [16]. Sobolewski, A., Ostapkowicz, P. (2013). Leak detection in liquid transmission pipelines using statistical analysis. *Diagnostyka*, 14, 1, 71-77.
- [17]. Ostapkowicz, P. (2014). Leakage detection from liquid transmission pipelines using improved pressure wave technique. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 16, 1, 9-16.
- [18]. Billmann, L., Isermann, R. (1987). Leak detection methods for pipelines. *Automatica*, 23, 3, 381-385.
- [19]. Ostapkowicz, P. (2011). Lokalizacja nieszczelności w rurociągach przesyłowych cieczy z wykorzystaniem metody gradientowej – studium przypadku. *Pomiary Automatyka Kontrola – Measurement Automation and Monitoring*, 57, 11, 1311-1316.

- [20]. Drabiec, D. (2018). Hel wykryje nieszczelność. Innowacyjna metoda detekcji. *Kierunek Wod-Kan*, 2, 16-18.
- [21]. Ostapkowicz, P. (2006). Opis i przyczyny stanów awaryjnych rurociągów przesyłowych z wyciekami. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*, 13, 125-136.
- [22]. Holewa, J., Rachwalski, J. (2009). Kontrola szczelności podziemnych struktur przeznaczonych do magazynowania paliw gazowych, metodą znacznikową i powierzchniowego monitoringu gazu glebowego. *Nafta-Gaz*, 65, 5, 410-414.
- [23]. Ziółko, J. (2008). Remonty i wzmacnianie zbiorników stalowych i rurociągów dalekosiężnych. W *Materiały XXIII Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji”*, Szczyrk, 2008.03.05-08 (T. III, s. 393-448). Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa Oddział w Katowicach.
- [24]. Dindorf, R., Woś, P. (2014). Metody pośrednie pomiaru natężenia przecieku w rurociągach przesyłowych sprężonego powietrza. *Logistyka*, 6, 3102-3111.
- [25]. Mazur, S., Dindorf, R., Woś, P. (2013). Bezprzewodowy system detekcji i pomiaru przecieków w instalacjach sprężonego powietrza. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 59, 6, 570-573.
- [26]. Hlebowicz, J. (1996). *Badanie szczelności. Poradnik*. Warszawa: Biuro Gamma.
- [27]. Schröder, G. (2011). *New European standard for the selection of a suitable method for leak detection and leak tightness testing*. Pobrane z <https://www.itis-nl.com/wp-content/uploads/2016/07/EN1779-English.pdf>.
- [28]. Urząd Dozoru Technicznego (2023). *Próby szczelności zbiorników bezciśnieniowych i niskociśnieniowych*. Pobrane z <https://www.udt.gov.pl/wazne/proby-szczelnosci>.
- [29]. Czuchryj, J. (2004). *Badania złączy spawanych według norm europejskich. Przegląd metod*. Warszawa: Biuro Gamma.
- [30]. Rottländer, H., Umrath, W., Voss, G. (2016). *Fundamentals of leak detection*. Leybold GmbH. Pobrane z https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/90/c7/87/Fundamentals_of_Leak_Detection_EN.pdf.
- [31]. Taczanowski, A., Marks, J. (1986). Helowe wykrywacze nieszczelności. Budowa i zastosowanie. *Prace ITME*, 17.
- [32]. Drabiec, D. (2019). Hel do lokalizacji wycieku. *Kierunek Wod-Kan*, 2, 29-32.
- [33]. Czuchryj, J., Pilarczyk, A. (2013). Testing leaktightness of welded joints using a bubble test with a vacuum cap. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 58-64.
- [34]. Czuchryj, J., Pilarczyk, A. (2014). Urządzenie UKS do kontroli szczelności złączy spawanych w próbie pęcherzykowej z przyssawką próżniową. *Przegląd Spawalnictwa*, 86, 1, 35-38.
- [35]. Czuchryj, J., Cierpica, B. (2017). Urządzenie UKS do kontroli szczelności połączeń spawanych za pomocą próby pęcherzykowej z przyssawką próżniową. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 61, 6, 63-66.
- [36]. Czuchryj, J., Bartosz, Ł. (2006). Zastosowanie próby pęcherzykowej do badania szczelności złączy spawanych. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 50, 3, 21-24.
- [37]. Droubi, M. G., Faisal, N. H., Orr, F., Steel, J. A., El-Shaib, M. (2017). Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 134, 28-37.
- [38]. Baran, I. (2019). Emisja akustyczna (AE) – Badanie urządzeń technicznych metodą AE. W *XXV Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, Zakopane, 20-22 marca 2019* (s. 87-96). Polskie Towarzystwo Badań Nieniszczących.
- [39]. Baran, I. (2019). Badania nieniszczące urządzeń technicznych metodą emisji akustycznej. *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, 4, 15-19.
- [40]. Dyszlewska, K. (1994). Akustyczny system nadzoru szczelności kotła – doświadczenia eksploatacyjne. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Energetyka*, 120, 1260, 159-167.
- [41]. Mostafapour, A., Davoodi, S. (2013). Leakage Locating in Underground High Pressure Gas Pipe by Acoustic Emission Method. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 32, 2, 113-123.
- [42]. Hieu, B. V., Choi, S., Kim, Y. U., Park, Y., Jeong, T. (2011). Wireless Transmission of Acoustic Emission Signals for Real-Time Monitoring of Leakage in Underground Pipes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15, 5, 805-812.
- [43]. Bardadyn, M., Paradowski, K., Zagórski, A., Wróbel, M. (2014). Diagnostyka wad podziemnych rurociągów przesyłowych za pomocą badań metodą emisji akustycznej. *Energetyka*, 7, 390-394.

- [44]. Infraskan usługi inżynierskie. (2023). *Lokalizacja i wykrywanie wycieków wody*. Pobrane z <https://www.infraskan.pl/oferta/wycieki/10-metody-lokalizacji-wyciekow.html>.
- [45]. Dindorf, R., Mazur, S., Woś, P. (2013). Nowe metody pomiaru przecieku w systemach sprężonego powietrza. *Pomiary Automatyka Kontrola*, 59, 6, 566-569.
- [46]. Dindorf, R., Woś, P. (2014). Metoda pośrednia pomiaru przecieku w instalacji sprężonego powietrza. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 38, 7-10.
- [47]. Dindorf, R., Woś, P. (2016). Urządzenie do automatycznego pomiaru natężenia przecieku w instalacji sprężonego powietrza. *Przegląd Elektrotechniczny*, 92, 11, 187-190.
- [48]. Czuchryj, J., Stachurski, M. (2003). *Badania złączy spawanych wg norm europejskich. Kontrola penetracyjna i magnetyczno-proszkowa*. Warszawa: Biuro Gamma.
- [49]. Krasieńska, K. (2020). *Pierwsze próby szczelności zbiorników Terminala Naftowego w Gdańsku*. Pobrane z <https://www.pern.pl/2020/05/04/pierwsze-proby-szczelnosci-zbiornikow-terminala-naftowego-w-gdansk/>.
- [50]. Centrum Informacji o Rynku Energii. (2017). *Kocioł w nowej elektrociepłowni w Zabrze przeszedł próbę ciśnieniową*. Pobrane z <https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/125015-kocioł-w-nowej-elektrociepłowni-w-zabrze-przeszedł-probe-cisnieniowa>.
- [51]. Pant, H. J. (2022). Applications of the radiotracers in the industry: A review. *Applied Radiation and Isotopes*, 182, 110076.
- [52]. Listwan, W. (1980). Wykrywanie nieszczelności przewodów i zbiorników na gazy i ciecze izotopami promieniotwórczymi. *Postępy Techniki Jądrowej*, 10-11, 875-888.
- [53]. Kraś, J., Waliś, L., Myczkowski, S. (1999). Zastosowanie metody znaczników promieniotwórczych do kontroli szczelności i lokalizacji nieszczelności w rurociągach podziemnych. *Postępy Techniki Jądrowej*, 42, 4, 22-26.
- [54]. Rahimi, H., Naimpour, M. A., Abedinzadeh, A., Amini, A., Kraś, J. (1999). Radiotracer technique for pipeline leak detection in the National Iranian Oil Company. *Nukleonika*, 44, 3, 491-498.
- [55]. Kraś, J., Waliś, L., Myczkowski, S. (2001). Zastosowanie metody znaczników promieniotwórczych do kontroli szczelności i lokalizacji nieszczelności w obiektach przemysłowych. W *Promieniowanie jako źródło informacji o właściwościach materii* (s. 29-39). Warszawa: Polskie Towarzystwo Nukleoniczne. Raport PTN - 5/2001.
- [56]. Kraś, J., Waliś, L., Myczkowski, S. (2002). Doświadczenia z izotopowej kontroli szczelności obiektów technologicznych – aspekty techniczne i ekonomiczne. W P. Urbański (Red.), *Technika jądrowa w przemyśle, medycynie, rolnictwie i ochronie środowiska. T. 2* (s. 373-379). Warszawa: Instytut Chemii i Techniki Jądrowej. Raporty IChTJ, Seria A nr 2/2002.
- [57]. Listwan, W., Kraś, J., Waliś, L. (1988). Kontrola szczelności rurociągów, gazociągów, zbiorników i instalacji technologicznych przy użyciu znaczników izotopowych. W *Zastosowanie technik radioizotopowych w przemyśle, medycynie i ochronie środowiska. Symposium krajowe, Warszawa, 31.03-03.04.1987. Referaty* (s. 175-183). Warszawa: Instytut Chemii i Techniki Jądrowej.
- [58]. Korbel, K., Łącki, E. (1981). *Sonda wędrująca do badania szczelności rurociągów gazowych metodą radioznacznikową*. Kraków: Instytut Fizyki i Techniki Jądrowej AGH. Raport INT 164/E.
- [59]. Korbel, K., Łącki, E. (1983). *Sonda wędrująca z cyfrową rejestracją wyników pomiaru do wykrywania nieszczelności magistrali gazowych*. Kraków: Instytut Fizyki i Techniki Jądrowej AGH. Raport INT 177/E.
- [60]. Morawiec, J., Rynkar, J., Klupa, A., Gardowski, J., Korbel, K. (1982). *Układ pomiarowy sondy do lokalizacji nieszczelności rurociągów*. PL Patent 114461.
- [61]. Kraś, J., Waliś, L. (1999). Kontrola szczelności zbiorników metalowych podziemnych i posadowionych na gruncie utwardzonym przy użyciu znaczników promieniotwórczych. *Postępy Techniki Jądrowej*, 42, 4, 30-33.
- [62]. Kraś, J., Nobis, C., Myczkowski, S. (2008). Leakage control methods for metal underground tanks and tanks placed on hardened soil with the use of radioactive tracers. *Nukleonika*, 53, Suppl. 2, 137-140.
- [63]. Owczarczyk, A., Szpilowski, S., Urbański, T., Migdał, W., Chmielewski, A., Więclaw, B., Ciesielski, T., Spalek, K., Kierat, Z., Szmander, H. (1988). *Sposób wykrywania i lokalizacji nieszczelności wykładzin, zwłaszcza metalowych, w zbiornikach*. Patent PL 148 466.

- [64]. Długosz, H., Kraś, J., Waliś, L. (1988). Porównanie dokładności metody izotopowej przy ocenie szczelności z klasyczną próbą wodną wg przepisów UDT. W *Zastosowanie technik radioizotopowych w przemyśle, medycynie i ochronie środowiska. Sympozjum krajowe, Warszawa, 31.03-03.04.1987. T. 2* (s. 483-487). Warszawa: Instytut Chemii i Techniki Jądrowej.
- [65]. Kraś, J., Waliś, L. (1999). Lokalizacja nieszczelności w obiektach technologicznych przy użyciu metody znaczników radioizotopowych. *Postępy Techniki Jądrowej*, 42, 4, 27-29.
- [66]. Nobis, C., Kraś, J. (2015). Izotopowa diagnostyka szczelności rurociągów i instalacji przemysłowych. *Paliwa i Energetyka*, 2, 34-35.
- [67]. Paszyk, P., Wiśniewski, M. (2015). Wykrywanie nieszczelności gazociągów przesyłowych. *Paliwa i Energetyka*, 1, 28-32.
- [68]. Morawski, T. (2006). Diagnostyka gazociągów przy pomocy tłoków inteligentnych. *Nowoczesne Gazownictwo*, 1, 33-43.
- [69]. Kropiwnicki, J., Klimkiewicz, T. (2004). Inspekcje rurociągów tłokami inteligentnymi. Cz. I.: Przygotowanie rurociągu do inspekcji. *Inżynieria Bezwykopowa*, 4, 73-75.
- [70]. Cordell, J., Vanzant, H. (2003). *The Pipeline Pigging Handbook*. Texas, USA: Clarion Technical Publishers and Scientific Surveys Ltd.
- [71]. Kropiwnicki, J., Klimkiewicz, T. (2005). Inspekcja rurociągu magnetycznym tłokiem inteligentnym MFL - cz. III. *Inżynieria Bezwykopowa*, 2, 40-43.
- [72]. Kropiwnicki, J., Klimkiewicz, T. (2005). Inspekcje rurociągów tłokami inteligentnymi. Cz. IV: tłoki ultradźwiękowe. *Inżynieria Bezwykopowa*, 4, 60-61.
- [73]. Pigging Products and Services Association. (2023). *Publications*. Pobrane z <https://www.ppsa-online.com/publications>.