

# Instalacje pomiarowe do gazu ciekłego propan-butan – wyznaczanie błędów wskazań metodą objętościową

Adam Urbanowicz (Zakład Mechaniki, GUM)

W artykule przedstawiono podstawowe cechy charakteryzujące instalacje pomiarowe do cieczy innych niż woda, na przykładzie instalacji do gazu ciekłego propan-butan. Celem sprawdzenia instalacji pomiarowej jest wyznaczenie jej błędu względnego w oparciu o porównanie ilości cieczy, która przepłynęła przez licznik instalacji do ilości cieczy określonej za pomocą wzorca, jakim jest kolba metalowa II rzędu. Wskazano również na istotny wpływ warunków środowiskowych podczas wykonywania pomiarów oraz omówiono wpływ składowych niepewności na niepewność rozszerzoną.

## Wstęp

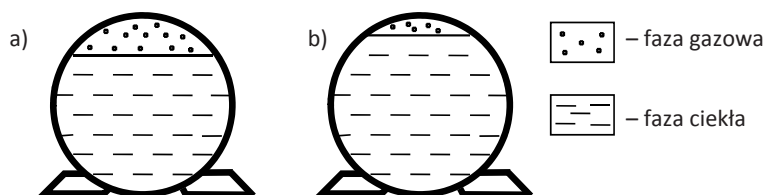
Instalacja pomiarowa do cieczy innych niż woda (w tym do gazu ciekłego propan-butan) jest przyrządem pomiarowym, przeznaczonym do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy [1]. Instalacja taka, składa się z licznika oraz urządzeń niezbędnych do zapewnienia poprawnego pomiaru lub przeznaczonych do ułatwienia operacji pomiarowych (separatory, zawory różnicowe, przezierniki, programatory). Dodatkowo w skład instalacji mogą wchodzić urządzenia współpracujące takie, jak gęstościomierze, ciśnieniomierze, czy też czujniki temperatury.

Gaz ciekły propan-butan ma duże znaczenie w gospodarce ze względu na jego szerokie zastosowanie w ciepłownictwie jako paliwo do ogrzewania domów, paliwo samochodowe oraz paliwo do kuchenek. Fakt, że jest tak powszechnie wykorzystywany powoduje, że od urządzeń służących do pomiaru jego ilości wymaga się najwyższej dokładności, co jak dalej zostanie pokazane, nie jest sprawą prostą.

Gaz ciekły propan-butan (LPG – ang. *Liquefied Petroleum Gas*) jest mieszaniną propanu, butanu, niewielkiej ilości metanu i śladowych ilości węglowodorów wyższych rzędów. W warunkach stałego ciśnienia faza ciekła i faza gazowa tej mieszaniny są w równowadze, co powoduje, że musi być przechowywana w odpowiednich zbiornikach ciśnieniowych, będących pod kontrolą Urzędu Dozoru Technicznego. Ponieważ propan-butan jest łatwopalny, wybuchowy, bezwonny i co najważniejsze cięższy od powie-

trza, czynności związane ze sprawdzaniem instalacji można przeprowadzać jedynie na otwartej przestrzeni z zachowaniem szczególnych środków ostrożności. Postępowanie takie rodzi szereg problemów których można by uniknąć, gdyby była możliwość wykonywania pomiarów w zamkniętych warunkach laboratoryjnych, możliwych do kontrolowania. W rzeczywistych warunkach instalacje pomiarowe narażone są na działanie zjawisk atmosferycznych takich jak silne nasłonecznienie, deszcz, wiatr. Spośród nich największy wpływ na otrzymywane wyniki ma temperatura.

Rysunek 1 ilustruje zwiększenie objętości fazy ciekłej w zbiorniku, wraz ze wzrostem temperatury. W temperaturze 15 °C faza ciekła stanowi około 80 % objętości zbiornika, by w temperaturze 50 °C osiągnąć ok. 90 % objętości. Podobnie jest w przypadku ciśnienia panującego wewnątrz zbiornika, które wzrasta od ok. 0,65 MPa do ok. 1,7 MPa. Wskutek zachodzących przemian termodynamicznych wymaga się, by podczas trwania pomiaru utrzymywana była możliwie stabilna temperatura stosowanej cieczy.



Rys. 1. Wpływ temperatury na właściwości gazu ciekłego. Przekrój poprzeczny zbiornika dla przykładowej mieszaniny o temperaturze: a) 15 °C oraz b) 50 °C

opr. własne

## Wzorzec objętości

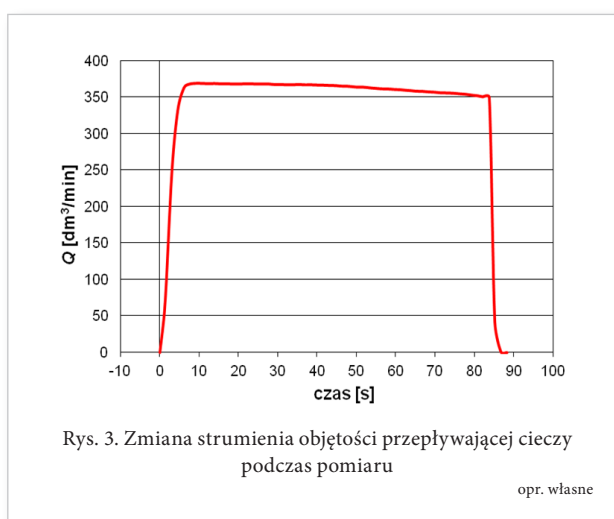
Wzorcowanie instalacji pomiarowych metodą objętościową polega na określeniu błędu względnego wskazań licznika instalacji przy danym strumieniu przepływu cieczy. Ilość cieczy, jaka przepłynęła przez licznik instalacji, porównuje się z ilością, która wpłynęła do wzorca objętości. Stosowane są powszechnie trzy rodzaje wzorców objętości: kolba metalowa II rzędu, licznik kontrolny i układ tłok-cylinder (tzw. *prover*). Każdy z nich ma swoje wady i zalety, natomiast od strony obliczeniowej i obsługi, najwięcej problemów sprawia kolba metalowa i stąd dla niej zostanie przedstawione równanie pomiaru.

Podczas pomiaru stosowana jest metoda z zatrzymanym startem i stopem, tzn. od chwili rozpoczęcia pomiaru i do jego zakończenia, ciecz nie przepływa przez badaną instalację pomiarową. Podczas wzorcowania pomiary przeprowadza się dla różnych strumieni objętości cieczy, w szczególności dla maksymalnego i minimalnego rzeczywistego strumienia oraz dla strumieni pośrednich. Strumień objętości  $Q$  definiuje się jako:

$$Q = \frac{V_n}{\tau} \quad (1)$$

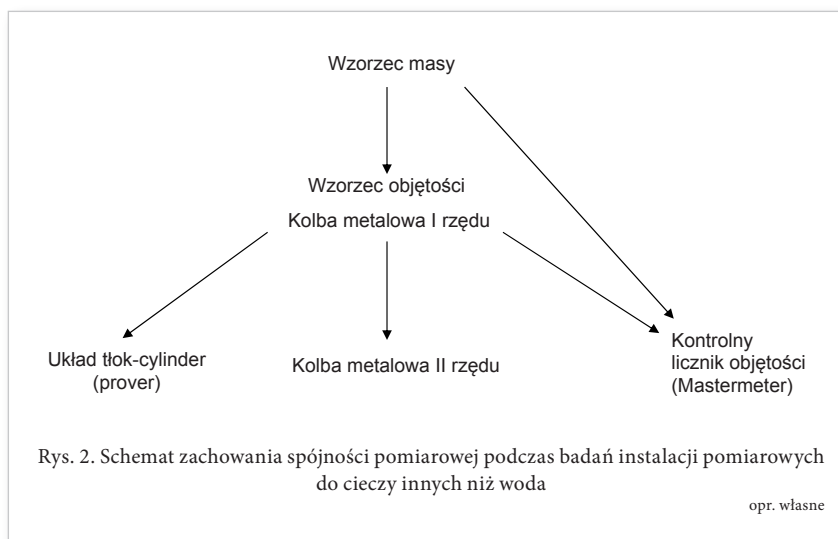
gdzie  $V_n$  jest to objętość gazu ciekłego, która przepłynęła przez licznik instalacji w czasie  $\tau$ .

Regulacja strumienia objętości cieczy podczas pomiaru odbywa się za pomocą zaworu lub poprzez zmianę obrotów pompy. Wskutek tego osiągnięcie zakładanego strumienia objętości może zająć kilka sekund (patrz rys. 3).



Rys. 3. Zmiana strumienia objętości przepływającej cieczy podczas pomiaru

opr. własne



Rys. 2. Schemat zachowania spójności pomiarowej podczas badań instalacji pomiarowych do cieczy innych niż woda

opr. własne

Podobnie, na końcu pomiaru zamykanie zaworu powoduje zmianę strumienia objętości. Na tej podstawie czas pomiaru  $\tau$  określany jest jako możliwie najdłuższy czas, przy którym strumień objętości zachowuje stałą wartość. Podczas wzorcowania dla każdego strumienia objętości przeprowadza się co najmniej 5 pomiarów.

## Równanie pomiaru i składowe niepewności

Błąd względny  $e$  wskazania objętości badanej instalacji określony jest równaniem:

$$e = \left( \frac{\bar{V}_n - \bar{V}_p}{\bar{V}_p} \right) + \delta e_i \quad (2)$$

gdzie  $\bar{V}_n$  jest średnią ilością cieczy, jaka przepłynęła przez licznik instalacji (przy danym strumieniu objętości),  $\bar{V}_p$  jest średnią objętością poprawną cieczy w kolbie, a  $\delta e_i$  jest poprawką błędów względnego wskazań licznika, wynikającą z braku powtarzalności wskazań. Jak zostanie dalej pokazane, uwzględnienie tej poprawki jest kluczowe dla celu szacowania niepewności, gdyż każdy pomiar traktowany jest jako niezależna obserwacja.

Objętość poprawną  $V_p$  gazu ciekłego w kolbie w temperaturze pomiaru oblicza się ze wzoru:

$$V_p = [V_g - (e_g \cdot n_g) - (e_d \cdot n_d) + (V_c - V_{nom}) + V_1] \cdot [1 + \beta \cdot (t_p - t_0)] \quad (3)$$

gdzie:

- $V_g$  – objętość gazu ciekłego odczytana z podziałki plynowskazu/plynowskazów kolby, wyrażona w  $\text{dm}^3$ ,
- $e_g$  – błąd podziałki plynowskazu górnego kolby (odczytuje się ze świadectwa wzorcowania kolby), wyrażony w  $\text{dm}^3/\text{działkę}$ ,

- $n_g$  – liczba działek elementarnych płynowskazu górnego kolby, liczona od kresy zerowej płynowskazu do kresy będącej najbliższej poziomiu cieczy,
- $e_d$  – błąd podziałki płynowskazu dolnego kolby (odczytuje się ze świadectwa wzorcowania kolby), wyrażony w  $\text{dm}^3/\text{działkę elementarną}$ ,
- $n_d$  – liczba działek elementarnych płynowskazu dolnego kolby, liczona od kresy zerowej płynowskazu do kresy będącej najbliższej poziomiu cieczy,
- $V_c$  – objętość poprawna gazu ciekłego w kolbie w temperaturze odniesienia (odczytuje się ze świadectwa wzorcowania kolby), wyrażona w  $\text{dm}^3$ ,
- $V_{\text{nom}}$  – objętość gazu ciekłego odpowiadająca objętości nominalnej kolby,
- $V_1$  – poprawka ciśnieniowa kolby wyrażona w  $\text{dm}^3$  (wg świadectwa wzorcowania kolby),
- $\beta$  – współczynnik rozszerzalności objętościowej materiału, z którego wykonana jest kolba, dla stali węglowej  $33 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ,
- $t_p$  – średnia temperatura gazu ciekłego w kolbie, obliczona dla danego pomiaru, wyrażona w  $^\circ\text{C}$ ,
- $t_0$  – temperatura odniesienia wzorcowania kolby równa  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Obliczony na podstawie wzorów (2) i (3) błąd względny instalacji przedstawiany jest w świadectwie wzorcowania instalacji jako błąd względny procentowy

$$e_{\%} = \left( \left( \frac{\bar{V}_n - \bar{V}_p}{\bar{V}_p} \right) + \delta e_i \right) \cdot 100\% . \quad (4)$$



Rys. 4. Kolba metalowa II rzędu o pojemności nominalnej  $500 \text{ dm}^3$  (ObUM Leszno)



Rys. 5. Kolba metalowa II rzędu o pojemności nominalnej  $20 \text{ dm}^3$  (ObUM Leszno)

Na podstawie tych obliczeń sprawdzane jest, czy instalacja spełnia wymagania stawiane instalacjom do gazu ciekłego propan-butan, tzn. że błąd względny nie przekracza  $1\%$  (klasa 1,0) [2].

Oszacowanie niepewności błędu względnego instalacji wymaga obliczenia współczynników wrażliwości dla przedstawionych wyżej wielkości wejściowych i związanych z nimi niepewności standardowych. Czynniki (składowe niepewności) brane pod uwagę przy szacowaniu niepewności związane są z:

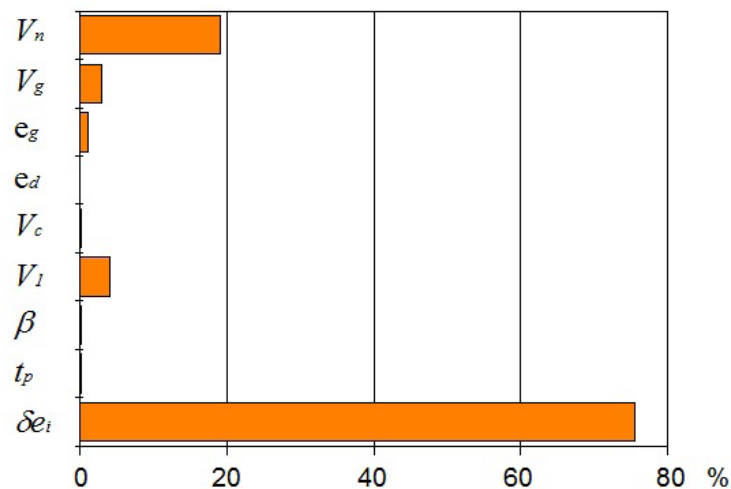
- rozdzielczością wskazań przyrządów pomiarowych,
- niedoskonałością wzorca,
- wpływem warunków środowiskowych na wzorzec,
- rozrzutem wskazań licznika instalacji.

Należy tutaj zwrócić uwagę na ostatni czynnik. W większości przypadków ma on największy udział w złożonej niepewności standardowej. Niepewność standardowa  $u(\delta e_i)$  wynikająca z rozrzutu wskazań licznika instalacji wyraża się wzorem:

$$u(\delta e_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}{N \cdot (N - 1)}} \quad (5)$$

gdzie:

- $e_i$  – błąd względny licznika instalacji dla pojedynczego pomiaru,
- $\bar{e}$  – średnia arytmetyczna błędów względnych wskazań licznika dla określonego strumienia objętości,
- $N$  – liczba pomiarów w serii dla określonego strumienia objętości.



Rys. 6. Przykładowy procentowy udział niepewności w złożonej niepewności standardowej błędzie instalacji, dla strumienia  $Q = 50 \text{ dm}^3/\text{min}$

opr. własne

Na rysunku 6 przedstawiono często spotykaną sytuację, gdy największy udział w złożonej niepewności standardowej mają niepewność standardową rozrzutu wskazań licznika instalacji oraz niepewność związana z rozdzielczością licznika. Czynniki te dają kluczową informację m.in. na temat jakości wykonania instalacji. Najczęściej łączny udział pozostałych składowych nie przekracza kilkunastu procent (uwaga, nie jest to regułą). Niepewność rozszerzona wyznaczenia błędzie względnej instalacji określona jest przez współczynnik rozszerzenia  $k$  (przy poziomie ufności ok. 95 %). Może on przyjmować wartość określoną na podstawie liczby stopni swobody dla rozkładu  $t$ -Studenta, albo jest równy 2, co wynika bezpośrednio z rozporządzenia Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie tworzenia punktów legalizacyjnych [3].

## Podsumowanie

Z punktu widzenia metrologa, największym problemem podczas badania instalacji pomiarowych jest brak możliwości wykonywania pomiarów w kontrolowanych warunkach środowiskowych. Ponieważ instalacja pomiarowa zbudowana jest z wielu różnych elementów oraz mo-

że pracować w różnych warunkach, to w praktyce każda taka instalacja jest inna. Zminimalizowanie wpływu warunków środowiskowych jest warunkiem koniecznym do uzyskania jak najmniejszej niepewności wyznaczenia błędzie instalacji. Szczególnie istotne jest, by w pierwszym podejściu nie pomijać żadnej ze składowych niepewności, gdyż może się okazać, że dla danej instalacji ich pominięcie może znacząco zmienić wartość niepewności rozszerzonej.

## Bibliografia

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 grudnia 2007 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać instalacje pomiarowe do ciągłego i dynamicznego pomiaru ilości cieczy innych niż woda, oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych (Dz. U. z 2008 r. Nr 4, poz. 23, z późn zm.).
- [2] Zalecenie OIML R 117-1: 2007 *Dynamic measuring systems for liquids other than water*.
- [3] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 12 stycznia 2005 r. w sprawie tworzenia punktów legalizacyjnych (Dz. U. z 2005 r. Nr 15, poz. 126).