

## Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych typu Coriolis do pomiarów rozliczeniowych w obszarze LNG małej skali oraz innych cieczy kriogenicznych

The possibility of application of Coriolis Mass Flow Meters for custody transfer metering related to Small Scale LNG and other cryogenic media

Grzegorz Roślonek<sup>1</sup>, Adam Bogucki<sup>1</sup>, Adam Urbanowicz<sup>2</sup>, Stanisław Kowalczyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA, Oddział Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze*

<sup>2</sup> *Główny Urząd Miar w Warszawie, Laboratorium Przepływów*

**STRESZCZENIE:** W artykule przedstawiono zarys projektów SMOK prowadzonych w PGNiG SA, dotyczących możliwości wykorzystania przepływomierzy Coriolisa do pomiarów rozliczeniowych LNG w obszarze LNG małej skali. Z uwagi na fakt, że projekty SMOK w PGNiG dotyczą mediów kriogenicznych, w szczególności obszaru LNG małej skali, w artykule przedstawiono wyniki badań metrologicznych instalacji SMOK – zarówno z wykorzystaniem wody, jak i LNG. Zaproponowano sposób postępowania odnośnie do możliwości zapewnienia nadzoru metrologicznego dla instalacji SMOK. Obecnie ogólnosiwiatowy problem stanowi weryfikacja wskazań przepływomierzy dla cieczy kriogenicznych, ponieważ brak jest na świecie uznanych i specjalistycznych stanowisk referencyjnych do tego typu porównań. W projektach SMOK wykorzystano istniejącą infrastrukturę kriogeniczną w Oddziale PGNiG w Odolanowie, gdzie również produkuje się LNG, do weryfikacji wskazań przepływomierzy Coriolisa w zastosowaniach do pomiarów przepływu LNG. W tym celu połączono statyczne metody wagowe z użyciem dużych i dokładnych wag pomostowych nadzorowanych od strony metrologicznej przez krajową administrację miar z bezpośrednimi metodami dynamicznymi do pomiarów cieczy kriogenicznych w przepływie. Takie stanowisko badawcze jest pierwszym oficjalnym stanowiskiem krajowym i prawdopodobnie drugim w świecie. Obecnie jedynie laboratorium CEESI w stanie Kolorado w USA potwierdziło posiadanie tego typu stanowiska kriogenicznego, opartego na ciekłym azocie i przeznaczonego do weryfikacji komercyjnych. Niepewność pomiarów stanowiska CEESI jest jednak wyższa niż w przypadku instalacji w PGNiG SA w Odolanowie, stworzonej w ramach badań w projektach SMOK. W prezentowanym artykule zaproponowano praktyczne podejście do wzorcowań przepływomierzy Coriolisa dla cieczy kriogenicznych z wykorzystaniem wody i mediów kriogenicznych. Zaproponowano sposób nadzoru metrologicznego przepływomierzy do cieczy kriogenicznych zarówno dla etapu aktualnego – określonego jako etap przejściowy – jak i w przyszłości, gdy powstaną specjalistyczne stanowiska referencyjne oparte na cieczach kriogenicznych. W artykule przedstawiono wyniki badań metrologicznych instalacji SMOK – zarówno z wykorzystaniem wody, jak i LNG.

**Słowa kluczowe:** LNG, płynny gaz ziemny, przepływomierz Coriolisa, przepływomierze masowe, pomiary rozliczeniowe LNG, LNG w obszarze małej skali.

**ABSTRACT:** The article presents an outline of the SMOK projects conducted in PGNiG SA, regarding the possibility of using Coriolis flowmeters for small scale LNG custody transfer. Due to the fact that the SMOK projects in PGNiG concern cryogenic media, in particular small scale LNG, the article presents the results of metrological tests of the SMOK installation, both with the use of water and LNG. The method of dealing with the possibility of providing metrological supervision for the SMOK installation has been proposed. Currently, the global problem is the verification of flowmeter indications for cryogenic liquids because there are no recognized and dedicated reference installations in the world for such comparisons. In the SMOK projects, existing cryogenic infrastructure at the PGNiG Branch in Odolanów was used, where LNG is also produced, for the verification of Coriolis flowmeters in applications for LNG flow measurements. Because of this, static weighing methods were combined using a large and accurate balance bridge, monitored from the metrological point of view by the national administration of measures with direct dynamic methods for measuring cryogenic liquids in the flow. Such kind of research installation is the first official national verification installation and probably the second in the world. At present, only the CEESI laboratory in Colorado in the US has confirmed the possession of a cryogenic installation of this type, based

Autor do korespondencji: G. Roślonek, e-mail: [grzegorz.roslonek@pgnig.pl](mailto:grzegorz.roslonek@pgnig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji 04.06.2019 r. Zatwierdzono do druku 24.09.2019 r.

on liquid nitrogen and intended for commercial verifications. However, the uncertainty of the CEESi installation is higher than for the installation at PGNiG SA in Odolanów, created as part of research under the SMOK projects. The paper presents a practical approach to the calibration of Coriolis flowmeters for cryogenic liquids using water and cryogenic media. A method of metrological supervision of flow meters for cryogenic liquids was proposed for both the current stage – defined as a transitional stage – and for the future when dedicated reference installations based on cryogenic liquids will be created. The article presents the results of metrological tests of the SMOK installation, both with the use of water and LNG.

Key words: LNG, Liquefied Natural Gas, Coriolis Flow Meter, mass flow meters, LNG custody transfer, small scale LNG.

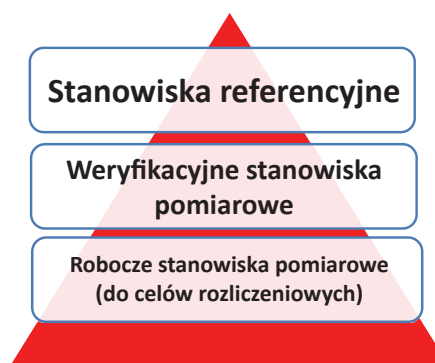
### Wstęp

W ciągu ostatniego dziesięciolecia pojawiły się bardzo wy-  
 żne trendy i nowe możliwości techniczne w pomiarach bez-  
 pośrednich paliw LNG w tzw. obszarach małej skali (SSLNG  
 – *small scale LNG*). W przeciwieństwie do pomiarów LNG  
 w obszarze dużej skali (LSLNG – *large scale LNG*), związa-  
 nym z dużymi statkami transportowymi – gazowcami – oraz  
 transportem LNG drogą morską (Rosłonek, 2016), bezpo-  
 średnie pomiary ładunków LNG w obszarze małej skali mogą  
 być wykonywane przy użyciu małych i powszechnie znanych  
 przepływomierzy, w szczególności przepływomierzy Coriolisa  
 (CFM – *Coriolis flow meter*), które można stosować zarówno  
 do pomiarów technologicznych, jak i do pomiarów rozlicze-  
 niowych. Pomiary bezpośrednie, jako pomiary metodą dyna-  
 miczną, mają kilka ważnych zalet w porównaniu z metodami  
 statycznego ważenia, głównie za pomocą dużych wag pomo-  
 stowych do określania masy LNG ładowanego i rozładowy-  
 wanego do i z cystern drogowych. Do głównych zalet pomia-  
 rów metodami bezpośrednimi należą następujące:

- procedury pomiarowe są bardzo proste;
- pomiar jest względnie szybki i może być wykonywany podczas czynności załadunkowo-rozładunkowych;
- pomiary są dokładne i charakteryzują się małą niepewno-  
 ścią (opis w dalszej części niniejszego artykułu);
- zmierzona ilość LNG jest ściśle związana z faktyczną ilo-  
 ścią LNG załadowanego lub wyładowanego z cysterny,  
 a resztkowa ilość LNG na cysternie nie stanowi błędu po-  
 miarowego (ten sam problem dotyczy wszelkich upustów  
 gazów z poduszek gazowych cysterny podczas operacji  
 załadunkowo-wyładunkowych).

Od czasu, gdy na rynku pojawiły się dokładne przepływo-  
 mierze CFM do pomiaru ilości mediów kriogenicznych, za-  
 stosowano również nowe podejście odnośnie do pomiarów  
 rozliczeniowych LNG. Pierwsze wykorzystanie CFM jako  
 urządzeń pomiarowych w przemyśle gazu ziemnego nastąpi-  
 ło w połowie lat 90. (Dworak, 2003), ale w przypadku LNG  
 i innych mediów kriogenicznych stało się to dopiero kilka lat  
 temu. Poprzez możliwość tworzenia korekt matematycznych  
 związanych z wpływem bardzo niskiej temperatury mediów  
 kriogenicznych na końcową odpowiedź urządzeń pomiarowych  
 pojawił się nowy obszar zastosowań CFM do bezpośrednich

pomiarów rozliczeniowych w trybie dynamicznym. Prawdą  
 jest jednak, że powszechnie uznawane zasady i rekomenda-  
 cje dla przepływomierzy CFM jako urządzeń pomiarowych  
 do cieczy kriogenicznych, w tym LNG, są jeszcze w trakcie  
 tworzenia. Jednym z najważniejszych obecnie wyzwań me-  
 trologicznych jest stworzenie pełnego łańcucha spójności  
 pomiarowej i uzyskanie bardzo niskiej niepewności pomia-  
 rów LNG. Propozycja odpowiedniej „piramidy metrologicz-  
 nej” dla wszelkich pomiarów w obszarze LNG małej skali zo-  
 stała przedstawiona na rysunku 1.



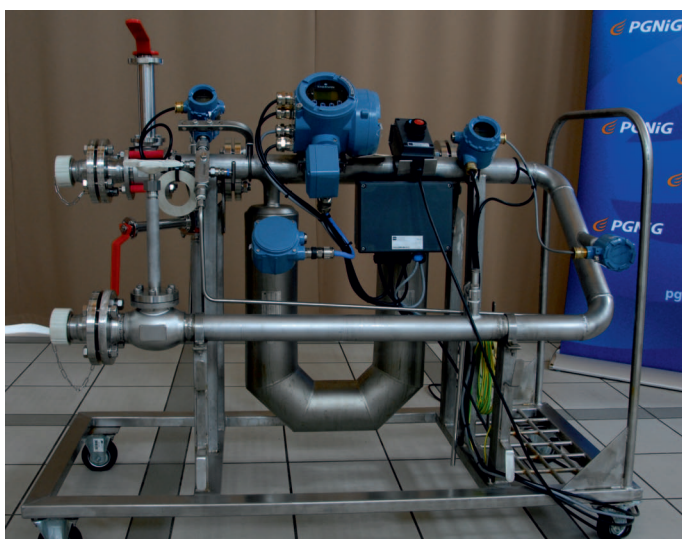
Rys. 1. Propozycja „piramidy metrologicznej” dla pomiarów w obszarze LNG małej skali

Fig. 1. Proposed “metrological pyramid” for small scale LNG metering

Zarówno pomiary do celów technologicznych, jak i pomia-  
 ry typowo rozliczeniowe powinny być wykonywane z wyko-  
 rzysaniem urządzeń powszechnie uznawanych i prawidłowo  
 nadzorowanych pod względem metrologicznym. Tego rodza-  
 ju urządzenia są reprezentowane przez najniższy poziom pi-  
 ramidy metrologicznej (rys. 1). Są to tzw. urządzenia robocze.  
 Konstrukcja współczesnych przepływomierzy Coriolisa umoż-  
 liwia wykorzystanie ich do pomiarów LNG i cieczy krioge-  
 nicznych, takich jak np. ciekły azot, ciekły tlen, ciekły argon  
 czy ciekły ditlenek węgla.

Urządzenia robocze muszą być okresowo weryfikowa-  
 ne i wzorcowane poprzez porównanie z urządzeniami wzor-  
 cowymi. Częstotliwość takich wzorcowań zależy od zasto-  
 sowań, potrzeb pomiarowych czy stabilności metrologicznej  
 urządzeń. Stabilność taką można jednak ocenić dopiero po  
 dłuższym czasie eksploatacji danego urządzenia. Weryfikacja  
 pomiarowych urządzeń roboczych do pomiarów LNG nie

powinna być przeprowadzana rzadziej niż co jeden rok, co wynika bezpośrednio z przepisów prawa (Rozporządzenie z 13 kwietnia 2017 r.). Na rysunku 2 przedstawiono pierwsze w Polsce urządzenie wzorcowe stosowane w Polskim Górnictwie Naftowym i Gazownictwie SA (PGNiG), któremu nadano roboczą nazwę SMOK. Aktualnie PGNiG SA Oddział Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze (CLPB) posiada dwa urządzenia typu SMOK, dla których we współpracy z Laboratorium Przepływów Głównego Urzędu Miar (GUM) wykonano ekspertyzy metrologiczne. W wyniku takich ekspertyz zestawy SMOK zostały uznane za krajowe przewoźne punkty legalizacyjne dla urządzeń pomiarowych do cieczy kriogenicznych (Rosłonek, 2017), jako stanowiska weryfikacyjne (rys. 1). Testy w GUM wykonano z wykorzystaniem wody jako medium testowego.



**Rys. 2.** Przykład urządzenia referencyjnego SMOK do wzorcowań i legalizacji przepływomierzy masowych do cieczy kriogenicznych  
**Fig. 2.** Example of master SMOK installation for calibration and legalization of mass flow meters for cryogenic fluids

Wszelkiego rodzaju porównania pomiędzy urządzeniami roboczymi a weryfikacyjnymi – odpowiednio najniższy i środkowy prostokąt na piramidzie metrologicznej na rysunku 1 – powinny być wykonywane z wykorzystaniem cieczy kriogenicznej. Chodzi o to, aby urządzenia robocze wzorcować/weryfikować w warunkach maksymalnie zbliżonych do ich warunków pracy. Oczywiście ze względów bezpieczeństwa bardzo często tego rodzaju testy przeprowadza się przy użyciu ciekłego azotu (LN2). Temperatury LNG i LN2 pod normalnym ciśnieniem nie różnią się zbytnio: odpowiednio około  $-161^{\circ}\text{C}$  i  $-196^{\circ}\text{C}$ .

Ponieważ każdy rodzaj urządzeń pomiarowych musi być okresowo sprawdzany i wzorcowany, dlatego te same zasady są również obowiązujące w przypadku każdego urządzenia weryfikacyjnego, które należy okresowo weryfikować na

stanowiskach referencyjnych (rys. 1). Problem polega jednak na tym, że wszelkie testy referencyjne powinny być wykonywane w warunkach bardzo podobnych do tych, w których przeprowadza się rutynowe pomiary. Niestety, do tej pory na świecie nie ma wiele referencyjnych stanowisk metrologicznych do użytku komercyjnego przeznaczonych do testów referencyjnych przepływomierzy dla mediów kriogenicznych. Przykładowo, jedno z nich, pracujące z wykorzystaniem LN2, znajduje się w Kolorado w USA – CEESI (Colorado Engineering Experimental Station). W Europie wkrótce powstanie obiekt referencyjny LNG na terminalu LNG Gate w Rotterdamie, ale obiekt jest jeszcze wciąż w budowie (LNG Metrology). Wkrótce będzie także kilka takich obiektów w Chinach, ale również one są w trakcie budowy (China-certification).

### Postępowanie przejściowe

Od kilkunastu lat trwają liczne dyskusje dotyczące możliwości wykorzystania wody jako nośnika do wzorcowań dla przepływomierzy masowych (np. Dworak, 2003), zarówno do zastosowań na gazowej infrastrukturze liniowej, jak i dla obszarów SSLNG. Istnieją dwie istotne zalety takiego podejścia: 1) bezpieczeństwo – bez mediów palnych i wybuchowych oraz 2) koszt wzorcowań – znacznie niższy dzięki zastosowaniu wody bez specjalistycznych urządzeń kriogenicznych. Istnieje również jedna poważna wada takiego podejścia z wykorzystaniem wody jako czynnika do wzorcowań – wzorcowanie za pomocą wody oznacza, że przepływomierz po wzorcowaniu będzie pracował w innych warunkach od tych, jakie panowały podczas wzorcowania. Jest to tzw. wzorcowanie pośrednie, które stosuje się rzadko, ale w metrologii nie jest ono nowością. Wpływ temperatury mierzonych mediów, a pośrednio także gęstości, i rzeczywisty zakres liczb Reynoldsa w rzeczywistości nie jest w pełni brany pod uwagę. Bez dużej liczby urządzeń roboczych do wzorcowań kriogenicznych w przemyśle gazowniczym wykonywanie wzorcowania przy użyciu wody wydaje się najbardziej popularnym podejściem – jako podejście tymczasowe. Jednakże w przypadku tego typu wzorcowań ważna jest świadomość dodatkowych ocen ewentualnych błędów wzorcowań w warunkach niekriogenicznych w odniesieniu do hipotetycznych warunków kriogenicznych.

Dzięki przeprowadzonym z sukcesem w Grupie Kapitałowej PGNiG projektom SMOK<sup>1</sup> obserwuje się dla SSLNG w Polsce

<sup>1</sup>Projekt polegający na opracowaniu i budowie kompletnego przewoźnego stanowiska legalizacyjno-pomiarowego do cieczy kriogenicznych, w tym LNG. Grupa projektów SMOK w PGNiG rozpoczęto w grudniu 2017 r.

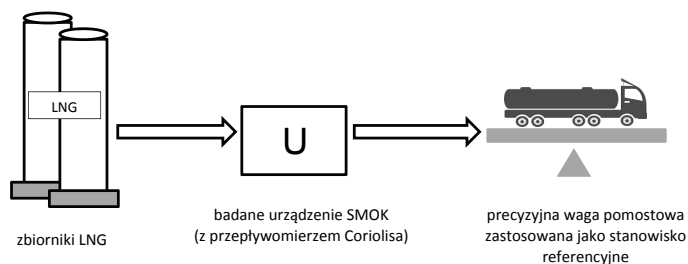
wyraźny trend stosowania bezpośrednich systemów pomiarowych przy użyciu kriogenicznych przepływomierzy masowych Coriolisa. W ten sposób dąży się do wykorzystania możliwości pomiaru bezpośredniego z użyciem właściwych przepływomierzy masowych do cieczy kriogenicznych zamiast pośrednich statycznych metod masowych (metody wagowe z wykorzystaniem wag pomostowych). Podejście takie musi być jednak związane z koniecznością przygotowania odpowiednich procedur pomiarowych, urządzeń pomiarowych, stanowisk do wzorcowań tych urządzeń oraz stanowisk referencyjnych wykorzystujących media kriogeniczne.

Ze względu na brak w Europie referencyjnych stanowisk do wzorcowań kriogenicznych okresowe sprawdzenia urządzeń wzorcowych (weryfikacyjnych) wykorzystywanych do okresowych wzorcowań urządzeń roboczych (rys. 1) muszą być przejściowo wykonywane w sposób pośredni – mieszany system statyczno-dynamiczny, co opisano poniżej.

### Badania metrologiczne

Od wielu lat jeden z oddziałów Polskiego Górnictwa Naftowego i Gazownictwa SA, z siedzibą w Odolanowie, zajmuje się produkcją ciekłego helu i LNG dla SSLNG. Ilości każdego ładunku LNG z Odolanowa przewożonego cysternami samochodowymi są precyzyjnie mierzone za pomocą dużych wag pomostowych w pełni nadzorowanych przez krajową administrację miar. Tego rodzaju wagi pomostowe wykorzystano w PGNiG SA O/CLPB do weryfikacji jednego z urządzeń typu SMOK z zastosowaniem kriogenicznego medium pomiarowego, jakim było LNG. Schemat instalacji badawczej użytej w PGNiG O/CLPB do weryfikacji urządzenia SMOK przedstawiono na rysunku 3. Na rysunku 4 pokazano przykładową fotografię z prowadzonych testów kriogenicznych na terenie zakładu w Odolanowie. Przed przystąpieniem do badań na obiekcie referencyjnym, jakim było stanowisko załadunku cystern samochodowych w PGNiG SA w Odolanowie, posiadano odpowiednie certyfikaty:

- certyfikat wzorcowania badanego zestawu urządzeń wydany przez laboratorium producenta (błędy wzorcowania dla każdego punktu pomiarowego poniżej 0,1%);
- certyfikat wzorcowania SMOK w Głównym Urzędzie Miar w Warszawie dla wody jako medium wzorcowania (maksymalny względny błąd wzorcowania 0,1% dla strumieni przepływu powyżej 4 t/h przy względnej niepewności wzorcowania 0,1% w pełnym zakresie);
- certyfikat legalizacji wagi pomostowej jako obiektu referencyjnego wydany przez krajową administrację miar (maksymalny błąd podczas testów legalizacji wagi pomostowej w zakresie 0,4–50 ton był poniżej 0,1%).



**Rys. 3.** Schemat procesu sprawdzeń porównawczych stanowiska SMOK z referencyjną wagą pomostową z wykorzystaniem medium kriogenicznego LNG

**Fig. 3.** Schematic diagram of the process of comparison tests of SMOK installation with reference weighbridge using LNG cryogenic medium



**Rys. 4.** Przykład testu porównawczego zestawu typu SMOK z precyzyjną wagą pomostową w PGNiG SA w Odolanowie

**Fig. 4.** Example of a comparison test of the SMOK installation and weighbridge in PGNiG SA, Odolanów Branch

Zastosowana metoda badawcza polegała na pomiarze masy LNG załadowywanej do cysterny do przewozu LNG dokonywanym za pomocą precyzyjnej wagi pomostowej przy stanowisku załadunku cystern w PGNiG SA w Odolanowie oraz porównaniu zmierzonej masy (masy referencyjnej) ze wskazaniami stanowiska SMOK. Badania porównawcze wykonano w okresie marzec–kwiecień 2018 r. w powtarzalnych warunkach otoczenia:

- badania wykonywano zawsze w tym samym miejscu – ta sama waga pomostowa i ta sama cysterna;
- badania wykonywano w dniach, kiedy nie było żadnych opadów atmosferycznych, które mogłyby zmieniać masę ważonej cysterny;
- badania wykonywano w dni bezwietrzne<sup>2</sup>;
- badania wykonywano każdego dnia w godzinach południowych (między 11.00 a 15.00), aby unikać ewentualnych efektów osiadania rosy na powierzchni cysterny i w ten sposób zmiany masy cysterny o dużej powierzchni poszycia;

<sup>2</sup>Instalacja do napełniania cystern w PGNiG SA w Odolanowie znajduje się na wolnym powietrzu, ale jest otoczona budynkami technologicznymi, dodatkowo osłaniającymi wagi pomostowe przed ewentualnymi podmuchami i wiatrami atmosferycznymi.

- badania wykonywano przy względnie niewielkim zakresie zmian temperatur otoczenia (10–14°C), aby uniknąć ewentualnych zmian kondensacyjnych wilgoci atmosferycznej (patrz powyżej);
- na wadze pomostowej umieszczano samą cysternę, bez ciągnika samochodowego, aby nie wprowadzać dodatkowych błędów w pomiarze masy całego zestawu samochodowego, wynikających ze zmiany masy zużywanego paliwa samochodowego, ewentualnej masy zanieczyszczeń błotnych opon ciągnika samochodowego itp.

Wyniki badań porównawczych przeprowadzonych w Odolanowie przedstawiono na zbiorczym rysunku 5.

Wykresy na rysunku 5 przedstawiają wyniki i trendy względnych błędów wzorcowań (poprawek) przeprowadzonych w GUM z wykorzystaniem wody jako medium oraz w Odolanowie z wykorzystaniem LNG jako medium testowego w zależności od wartości masowego strumienia przepływu cieczy. Dla porównania na rysunku 5 pokazano również wyniki z wzorcowania fabrycznego badanego przepływomierza CFM przez producenta po jego wyprodukowaniu. Błędy wzorcowań uzyskane na stanowisku producenta są znacznie mniejsze niż w GUM, ale nie jest to przedmiotem analizy w niniejszym artykule, ponieważ nie są znane parametry techniczne stanowiska producenta i wzorcowaniu na tym stanowisku podlegał sam przepływomierz bez pozostałych elementów instalacji SMOK (oruruwanie).

W obszarze typowych strumieni przepływu dla przetankowań LNG zbiornik–cysterna–zbiornik wynoszących od 4 do 10 ton/h błędy wzorcowania mieściły się w zakresie  $\pm 0,2\%$  zarówno dla wzorcowań z użyciem wody w GUM, jak i sprawdzeń<sup>3</sup> z użyciem LNG na instalacji PGNiG w Odolanowie. Maksymalną wartość względnej niepewności rozszerzonej dla sprawdzenia zestawu SMOK z wykorzystaniem LNG oszacowano jako  $\pm 0,2\%$  (według Bogucki et al., 2018):

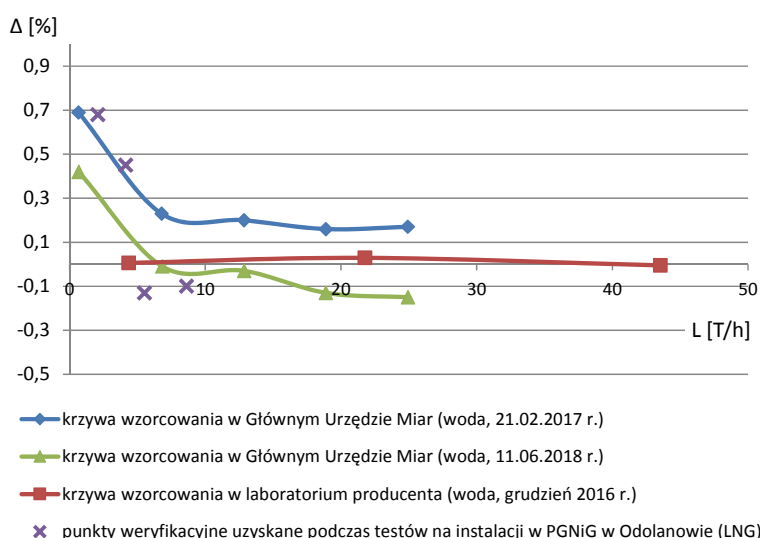
$$U_{\%}(M_{LNG}) = 2 \cdot \frac{\sqrt{u^2(d_k) + u^2(m_l) + u^2(m_w) + u^2(m_c)}}{M_{LNG}} \quad (1)$$

gdzie:

$u(d_k)$  – oznacza element niepewności dotyczący działki legalizacyjnej wagi pomostowej ( $d_s = 20$  kg),

$u(m_l)$  – oznacza element niepewności dotyczący przyrostu masy napełnionej cysterny wynikającego z oblo-

<sup>3</sup>W niniejszym artykule testy z wykorzystaniem LNG w Odolanowie są celowo nazywane sprawdzeniami, ponieważ w odróżnieniu od klasycznych wzorcowań zostały przeprowadzone na nierutynowym stanowisku i według nierutynowych procedur. W wyniku testów nie wystawiano również klasycznych dokumentów certyfikacyjnych.



**Rys. 5.** Wyniki wzorcowań/weryfikacji (względny błąd  $\Delta$  [%]) dla instalacji SMOK dla różnych strumieni przepływu cieczy L [T/h]

**Fig. 5.** Results of calibration/verification tests (relative error  $\Delta$  [%]) for SMOK installation for various flow rates L [T/h]

dzenia/oszronienia niektórych elementów cysterny w trakcie jej napełniania (oszacowany przyrost masy  $\pm 10$  kg),

$u(m_w)$  – oznacza element niepewności dotyczący przyrostu masy zestawu cysterna–ciągnik spowodowanego ewentualnymi opadami lub kondensatami atmosferycznymi podczas napełniania cysterny (0 kg, pomiary przy braku opadów i braku kondensatów atmosferycznych),

$u(m_c)$  – oznacza element niepewności dotyczący przyrostu/ubytku masy ciągnika spowodowanego ubytkiem paliwa, ewentualnym obłożeniem kół zestawu podczas jakiegokolwiek przetaczania zestawu (0 kg, pomiary wagowe były dokonywane dla cysterny po odczepieniu ciągnika),

$M_{LNG}$  – oznacza masę LNG w cysternie (po napełnieniu około 17 ton, do obliczeń przyjęto 8 ton z uwagi na pomiary przy jednym napełnieniu cysterny dla dwóch różnych strumieni przepływu).

Obowiązujące wymagania metrologiczne w stosunku do sprawdzeń przepływomierzy przeznaczonych do cieczy innych niż woda dopuszczają podczas sprawdzeń błąd maksymalny MPE (ang. *maximum permissible error*) wynoszący  $\pm 2,5\%$  (OIML R 117-1, 2007; Rozporządzenie z 13 kwietnia 2017 r.; Bogucki et al., 2018). Przy takich wymaganiach instalacje typu SMOK całkowicie nadają się do wykonywania w przyszłości wszelkich sprawdzeń przepływomierzy przeznaczonych do cieczy innych niż woda. Obecnie trwają prace na szczeblu międzynarodowym, aby zaostrzyć powyższe wymagania do MPE wynoszącego 1,5%, ale nawet w takim przypadku instalacje SMOK będą odpowiednie.

Ocena błędów i niepewności wzorcowań na stanowisku w GUM z użyciem wody i porównanie do wyników sprawdzeń na stanowisku w Odolanowie z użyciem LNG pokazuje, że wzorcowanie wodne jest poprawne i adekwatne do potencjalnych przyszłych zastosowań instalacji typu SMOK – tzn. legalizacji i pomiarów rozliczeniowych w obszarze SSLNG.

### Podsumowanie i wnioski

Projekty SMOK prowadzone w PGNiG SA miały pokazać, że dynamiczne metody pomiarowe, czyli bezpośrednie pomiary fazy LNG podczas procesów przeładunkowych w obszarze SSLNG, są możliwe do stosowania. Metody te eliminują wiele wad metod statycznych (Rosłonek, 2017; Bogucki et al., 2018) – metod wagowych z wykorzystaniem wag pomostowych. Przede wszystkim eliminuje się problem nierozliczonych ilości LNG spowodowanych odparowaniem podczas transportu czy problemy związane ze zjawiskiem starzenia się LNG podczas transportu (ang. *LNG ageing*).

Projekty SMOK pokazują, że metody dynamicznych rozliczeń masowych z wykorzystaniem przepływomierzy masowych Coriolisa są bardzo dokładne. Błędy pomiarowe i niepewności pomiaru są tego samego rzędu wielkości, czyli co najwyżej  $\pm 0,2\%$ , a niepewność wzorcowania przepływomierza na stanowisku producenta była nawet znacznie poniżej  $0,1\%$ .

Obecnie globalnym problemem jest brak powszechnej możliwości wykonywania wzorcowań stanowisk weryfikacyjnych (rys. 1) z wykorzystaniem innego medium niż woda, przynajmniej do czasu wybudowania stanowisk referencyjnych, powstających w wielu krajach świata. Projekty SMOK udowadniają jednak, że wzorcowania z wykorzystaniem wody jako medium są metrologicznie poprawne. Rekomendacją PGNiG jest, aby wzorcowania weryfikacyjnych stanowisk pomiarowych (np. instalacje SMOK), z wykorzystaniem LNG czy innych mediów kriogenicznych na stanowiskach referencyjnych, były wykonywane okresowo. W pierwszym okresie proponuje się okresy dwuletnie, które będą mogły być powiększone do trzech lat, jeżeli sprawdzenia w odstępach dwuletnich będą pozytywne, a docelowo realne wydają się również okresy pięcioletnie. Pomiędzy sprawdzeniami/wzorcowaniami z wykorzystaniem mediów kriogenicznych niezbędne jest wzorcowanie z wykorzystaniem wody jako medium (Bogucki et al., 2018).

Dalsze prace w ramach projektów SMOK w PGNiG SA będą miały na celu:

- kolejne weryfikacje poprawności metrologicznych stanowisk typu SMOK w układzie woda–LNG przy zwiększaniu okresów weryfikacji z wykorzystaniem medium kriogenicznego;
- prowadzenie badań dla przepływomierzy masowych Coriolisa pochodzących od różnych producentów;

- prowadzenie badań dla różnych wielkości przepływomierzy Coriolisa, większych (np. do zastosowań przy bunkrowaniu jednostek pływających) lub mniejszych (np. do dystrybutorów paliw LNG) niż w dotychczasowych badaniach, które były wykonywane dla przepływomierzy 2-calowych;
- docelowe przygotowanie zapisów standaryzacyjnych, np. standard IGG, aby zasady postępowania metrologicznego przepływomierzy Coriolisa były jednakowe, powszechnie stosowane i akceptowane przez wszystkie zainteresowane strony; planowana jest także współpraca pod tym względem na szczeblu międzynarodowym, np. poprzez grupę GERG (The European Gas Research Group) czy zagraniczne narodowe instytuty metrologiczne współpracujące z GUM. Prace dotyczące rozwoju metod pomiarowo-rozliczeniowych w obszarze LNG są w PGNiG SA O/CLPB koordynowane przez specjalnie do tego celu utworzony zespół zadaniowy określony jako Centrum Kompetencji Technicznych LNG (Bogucki et al., 2017).

### Uwagi końcowe

Ponieważ zgodnie z polityką jakości PGNiG SA O/CLPB, jako laboratorium akredytowanego i notyfikowanego, deklarowane jest pełne zachowanie niezależności i brak jakiegokolwiek stronniczości wobec badanych przyrządów i ich producentów, dlatego w niniejszym artykule nie identyfikowano nazw producentów przepływomierzy Coriolisa ani nie przytaczano numerów seryjnych tych urządzeń i odpowiadających im certyfikatów wzorcowań.

Nazwa SMOK, z odpowiednim znakiem graficznym, została w maju 2019 r. zgłoszona przez PGNiG SA do Urzędu Patentowego RP do zastrzeżenia dla metod, stanowisk i urządzeń pomiarowych do LNG wykorzystujących przepływomierze Coriolisa. Znak graficzny SMOK pokazano na rysunku 6. Znak ten, z czasowym oznaczeniem <sup>TM</sup>, jest już oficjalnie stosowany na każdym zestawie SMOK wytwarzanym od maja 2019 r.

TM



Rys. 6. Znak graficzny SMOK zgłoszony do zastrzeżenia w Urzędzie Patentowym RP przez PGNiG SA (maj 2019).

Fig. 6. SMOK graphic symbol submitted to the Patent Office of the Republic of Poland by PGNiG SA (May 2019)

**Podziękowania**

Specjalne podziękowania dla Pana Tomasza Jaskólskiego, Dyrektora Oddziału PGNiG SA w Odolanowie, za umożliwienie przeprowadzenia badań na terenie stanowiska do załadunku cystern LNG w Odolanowie oraz dla Pana Janusza Brzezichy za nadzór od strony BHP i ppoż. podczas wykonywania badań. Składane są również podziękowania dla kierownictwa firmy PGS Sp. z o.o. z Odolanowa za użyczenie cysterny LNG do badań.

**Literatura**

- Bogucki A., Chołast K., Kowalczyk S., Rosłonek G., Urbanowicz A., 2018. Wykorzystanie infrastruktury PGNiG SA Oddział w Odolanowie do weryfikacji wzorca roboczego do przepływomierzy kriogenicznych. *Konferencja Naukowo-Techniczna FORGAZ 2018, Muszyna, 10–12.01.2018*: 141–150.
- Bogucki A., Czapnik P., Rosłonek G., 2017. Centrum Kompetencji Technicznych LNG. *Przegląd Gazowniczy*, 56: 28–29.
- China-certification. <<http://china-certification.com>> (dostęp: czerwiec 2019).
- Colorado Engineering Experimental Station Inc. <<http://www.ceesi.com>> (dostęp: czerwiec 2019).
- Dworak P., 2003. GERG project report, project no. 1.48: Determine the State of Art in Coriolis Gas Meters. *PGNiG*.
- LNG Metrology. <<http://lngmetrology.info>> (dostęp: czerwiec 2019).
- Rosłonek G., 2016. Skroplony gaz ziemny – LNG. Część 1 – Zagadnienia ogólne i podstawy procesu rozliczeniowego. *Nafta-Gaz*, 2: 87–94. DOI: 10.18668/NG.2016.02.02.
- Rosłonek G., 2017. Pomiary rozliczeniowe małego LNG. *I Bałtyckie Warsztaty LNG – „Zimna Zośka”, Gdańsk, 16–17.05.2017*.
- The European Gas Research Group. <[www.gerg.eu](http://www.gerg.eu)> (dostęp: czerwiec 2019).

**Akty prawne i normatywne**

International Recommendation OIML R 117-1, Ed. 2007, Dynamic measuring systems for liquids other than water. Part 1: Metrological and technical requirements.

Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 13 kwietnia 2017 r. w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz zakresu tej kontroli (Dz.U z 2017 r. poz. 885).



Dr Grzegorz ROSŁONEK  
Dyrektor Oddziału  
Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze  
Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA  
ul. Kasprzaka 25 B  
01-224 Warszawa  
E-mail: [grzegorz.roslonek@pgnig.pl](mailto:grzegorz.roslonek@pgnig.pl)



Dr inż. Adam BOGUCKI  
Kierownik Działu Metrologii, Analiz Technicznych i Normalizacji, Centralne Laboratorium Pomiarowo-Badawcze  
Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA  
ul. Kasprzaka 25 B, 01-224 Warszawa  
E-mail: [adam.bogucki@pgnig.pl](mailto:adam.bogucki@pgnig.pl)



Dr Adam URBANOWICZ  
Kierownik Samodzielnego Laboratorium Przepływów  
Główny Urząd Miar  
00-139 Warszawa  
ul. Elektoralna 2  
Email: [adam.urbanowicz@gum.gov.pl](mailto:adam.urbanowicz@gum.gov.pl)



Inż. Stanisław KOWALCZYK  
Główny metrolog  
Samodzielne Laboratorium Przepływów  
Główny Urząd Miar  
00-139 Warszawa  
ul. Elektoralna 2  
E-mail: [stanislaw.kowalczyk@gum.gov.pl](mailto:stanislaw.kowalczyk@gum.gov.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU UŻYTKOWANIA PALIW

- badania typu urządzeń spalających paliwa gazowe według norm odniesienia w celu potwierdzenia zgodności z Rozporządzeniem UE 2016/426 (GAR);
- badania sprawności kotłów wodnych zasilanych paliwami gazowymi i olejowymi na zgodność z Dyrektywą 92/42/EWG;
- badania instalacji elektrycznych urządzeń gazowych i drobnego sprzętu domowego na zgodność z Dyrektywą 2014/35/UE „Niskie napięcia”;
- badania urządzeń grzewczych typu kominki oraz kuchnie i kotle na paliwo stałe, w oparciu o normy zharmonizowane z Rozporządzeniem UE CPR 305/2011;
- badania zapalniczek gazowych i ich zgodności z wymaganiami normy PN-EN ISO 9994 oraz ich zabezpieczenia przed uruchomieniem przez dzieci, zgodnie z normą PN-EN 13869;
- badania kominów metalowych i ceramicznych na zgodność z normami zharmonizowanymi z Rozporządzeniem UE CPR 305/2011;
- badania i wydawanie opinii technicznych o możliwości bezpiecznego użytkowania przemysłowych urządzeń zasilanych gazem;
- projektowanie i wykonanie mieszalni gazów oraz badanie zamienności paliw;
- ekspertyzy sądowe w zakresie użytkowania gazu;
- ekspertyzy termograficzne instalacji technicznych, maszyn i urządzeń mechanicznych, elektrycznych gazowych i grzewczych.



Kierownik: mgr inż. Robert Wojtowicz Adres: ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków  
Telefon: 12 617 74 65 Faks: 12 653 16 65 E-mail: [robert.wojtowicz@inig.pl](mailto:robert.wojtowicz@inig.pl)



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
– Państwowy Instytut Badawczy