

# Cztery dekady rozwoju i zastosowania przepływomierzy coriolisa jako urządzeń pomiarowych w gazownictwie. Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych Coriolisa do pomiarów LNG.

Four decades of development and use of Coriolis flow meters as measuring devices in gas industry. Possibilities of applying Coriolis mass flow meters for LNG measurements.

Grzegorz Roślonek\*

**Słowa kluczowe:** Przepływomierz masowy, Coriolis, LNG, pomiar rozliczeniowy

## Streszczenie

W artykule przedstawiono historię rozwoju przepływomierzy masowych Coriolisa jako urządzeń pomiarowych dla pomiarów rozliczeniowych gazów i cieczy kriogenicznych ze szczególnym uwzględnieniem gazów ziemnych i LNG (Liquid Natural Gas). Omówiono zasadę działania przepływomierza Coriolisa i przedstawiono historię jego komercjalizacji. Opisano ogólne założenia projektów SMOK prowadzonych w PGNiG (obecnie Orlen) w latach 2016-2020 mających na celu powszechne zastosowanie przepływomierzy Coriolisa do rozliczeń w obszarze LNG małej skali. Zaprezentowano wyniki badań przemysłowych dotyczących systemów okresowych wzorcowań i zapewnienia spójności pomiarowej przepływomierzy Coriolisa z wykorzystaniem stanowisk wodnych i do zastosowań w pomiarach płynów kriogenicznych.

**Keywords:** mass flow meter, Coriolis, LNG, custody transfer measurement

## Abstract

The article presents the history of the development of Coriolis mass flow meters as measurement devices for custody transfer measurements of gases and cryogenic fluids with particular emphasis on natural gases and LNG (Liquid Natural Gas). The principle of operation of the Coriolis flowmeter is discussed and the history of its commercialization is presented. The general assumptions of the SMOK projects carried out at PGNiG (currently Orlen) in 2016-2020 are described, aimed at the widespread use of Coriolis flow meters for custody transfer procedures in the small-scale LNG area. The results of industrial research on periodic calibration systems and ensuring measuring traceability of Coriolis flowmeters using water stations and for applications in the measurement of cryogenic fluids are presented.

## Wstęp

Siła Coriolisa, na której oparto istotę pomiaru przepływu płynów w przepływomierzach Coriolisa, znana jest w świecie fizyki od prawie dwustu lat. Pojęcie siły Coriolisa jest utożsamiane z tzw. efektem Coriolisa, czyli zjawiska – pojawienia się dodatkowej pozornej siły – występującego gdy dane ciało porusza się w obracającym się układzie odniesienia. Jeżeli takie ciało poruszałoby się ruchem jednostajnym, to zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki Newtona powinien to być ruch prostoliniowy. Jednakże, jeżeli ciało to będzie poruszać się w obracającym się układzie odniesienia to tor jego ruchu ulega „zakrzywieniu”. Musi to oznaczać działanie dodatkowej, pozornej siły, powodującej to zakrzywienie i takie zjawisko jest właśnie istotą siły Coriolisa, np. [2], wzór (1):

$$\vec{F}_c = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (1)$$

gdzie:

$F_c$  – siła Coriolisa

$m$  – masa poruszającego się ciała

$\omega$  – prędkość kątowa układu

$v$  – prędkość liniowa ciała

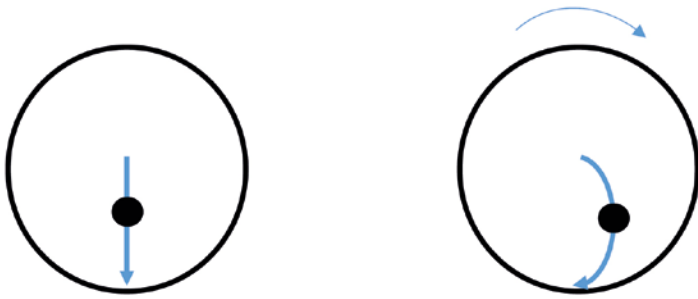
Wzór (1) został zapisany w postaci iloczynu wektorowego, w którym iloczyn dwóch wielkości wektorowych ( $\omega$ ,  $v$ ) musi dać w wyniku kolejną wielkość wektorową ( $F_c$ ). Masa, która jest skalarzem i współczynnik liczbowy zmienia tylko wartość wypadkowej wielkości wektorowej.

Graficzny obraz toru ruchu ciała poruszającego się ruchem jednostajnym w układzie stacjonarnym, oraz zakrzywienia toru poruszającego się ciała po wprowadzeniu całego układu w ruch obrotowy i tym samym efektu wystąpienia siły Coriolisa, pokazano graficznie na Rys.1.

Zjawisko Coriolisa zostało nazwane od nazwiska jego odkrywcy, francuskiego fizyka i matematyka – Gaspard de Coriolis (1792-1843) – członka Francuskiej Akademii Nauk, który był bardzo zasłużony dla rozwoju nauki światowej. Jemu zawdzięczamy także wprowadzenie pojęcia „pracy”, „energii kinetycznej” czy „przyspieszenia”. Nic więc dziwnego, że nazwisko Gaspard de Coriolis znalazło się na liście 72 nazwisk umieszczonych na Wieży Eiffła w Paryżu, francuskich uczonych zasłużonych dla rozwoju nauki światowej.

Wykorzystanie siły Coriolisa do pomiaru przepływu mediów jest pomysłem stosunkowo młodym. Za komercyjnego twórcę idei przepływomierza opartego na sile Coriolisa uważany jest

\* Grzegorz Roślonek – Orlen S.A, 01-224 Warszawa, Kasprzaka 25 (grzegorz.roslonek@pgnig.pl)



tor ruchu ciała poruszającego się ruchem jednostajnym w układzie stacjonarym

tor ruchu ciała poruszającego się ruchem jednostajnym w układzie „obrotowym”

Rys. 1. Graficzny obraz ruchu ciała poruszającego się ruchem jednostajnym w układzie stacjonarym i obrotowym.

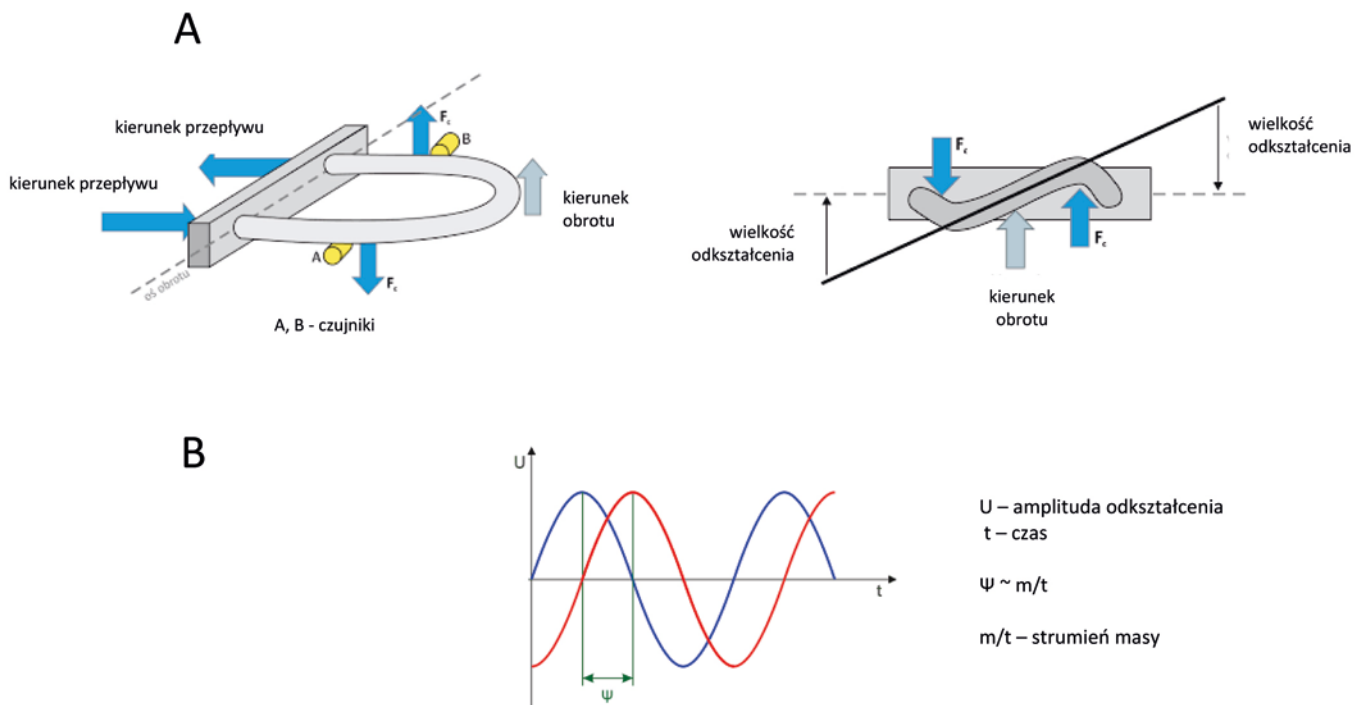
Fig. 1. A graphic image of the motion of a body moving uniformly in a stationary and rotating system.

amerykański inżynier James E. Smith. Oparł on opracowany przez siebie przepływomierz na elementach przepływowych w kształcie „U-rurek”, które były wprowadzane w wymuszone drgania płaszczyzny rurek przepływowych wokół osi montażu przepływomierza, co generowało siłę Coriolisa. J.E.Smith opatentował swoją konstrukcję [36] oraz założył firmę Micro Motion w Boulder w USA w stanie Colorado, która miała się zająć komercyjną promocją i sprzedażą na świecie przepływomierzy Coriolisa. W kolejnych latach, po roku 1977, firma Micro Motion dokonywała kolejnych modyfikacji przepływomierzy co również chronione było kilkoma następczymi patentami, np. [37,38]. Aktualnie, od roku 1984, firma Micro Motion należy do grupy Emerson [16,17]. Zasada konstrukcyjna przepływomierza masowego Coriolisa opracowana przez J.E.Smith’a jest stosowana do dziś we wszystkich współcześnie produkowanych przepływomierzach masowych opartych na zjawisku Coriolisa.

Dla jasności warto wspomnieć, że istnieje również wersja, że inwentorami przepływomierzy masowych opartych na wykorzystaniu siły Coriolisa wykorzystujących „U-rurki” byli dwaj francuscy uczeni – Yves Clouet i Michael Crozat – pracujący dla Europejskiej

Organizacji Badań Jądrowych CERN. Miałyby to mieć miejsce również około roku 1977. Ten wątek istnieje w postaci informacji, które stosunkowo łatwo znaleźć w przestrzeni internetowej, ale trudno jest to podeprzeć sprawdzoną fachową literaturą.

Gwoli ścisłości, należy wspomnieć, że zjawisko Coriolisa pojawiało się w urządzeniach do pomiaru ilości przepływających gazów i cieczy już znacznie wcześniej niż przełom lat siedemdziesiątych i osiemdziesiątych XX w. [20]. Patenty dla takich przepływomierzy pojawiały się nawet w latach pięćdziesiątych, ale były to konstrukcje różniące się od tych, jakie są stosowane współcześnie [35]. W tych starszych rozwiązaniach medium mierzone wprowadzane było w ruch obrotowy w specjalnych kanałach, często spiralnych i wywoływana w ten sposób siła Coriolisa była wprost proporcjonalna do prędkości kątowej „wirującego” płynu i strumienia masy. Konstrukcje tego typu urządzeń nie przyjęły się jednak, głównie z powodu dużych wymiarów i dużej masy przepływomierzy, a także mniejszych dokładności pomiarowych, w porównaniu ze współcześnie stosowanymi przepływomierzami z powodu mniej dokładnego oszacowania wartości siły Coriolisa.



Rys. 2. (A) Schemat działania przepływomierza Coriolisa (źródło: [14]); (B) Wykres poglądowy obrazujący przesunięcie fazowe odkształcenia rurki pomiarowej przepływomierza Coriolisa – proporcjonalnego do strumienia masy danego płynu

Fig. 2. (A) Coriolis flowmeter operation diagram (source: [14]); (B) An overview diagram showing the phase shift of the deformation of the measuring tube of the Coriolis flowmeter – proportional to the flow mass rate of a selected fluid

W aktualnie stosowanych przepływomierzach Coriolisa elementami konstrukcyjnymi są dwie wygięte rurki przepływowe, najczęściej w kształcie greckiej litery „Ω”, przez które przepływa mierzony płyn i które wprowadza się w wymuszone drgania-oscylacje wokół podstawy (litery Ω) ale w przeciwnych kierunkach odchylenia. Wymuszone drgania-oscylacje generują powstawanie siły Coriolisa, której wartość jest wprost proporcjonalna do strumienia masy medium mierzonego. Siła ta powoduje opóźnienie fazy drgań rury w części dolotowej oraz jej przyspieszenie na odcinku wylotowym. Przesunięcie fazowe jest wprost proporcjonalne do strumienia masy. Poprzez pomiar częstotliwości rezonansowej drgań rur pomiarowych można także bezpośrednio wyznaczać gęstość płynu przepływającego przez przepływomierz.

Metoda pomiaru z wykorzystaniem siły Coriolisa jest stosunkowo „młoda” na rynku przepływomierzy, jednakże w przeciągu dwu ostatnich dekad była najszybciej rozwijającą się technologią do pomiarów w przemyśle. Organizacje standaryzacyjne na całym świecie wciąż przyjmują nowe wytyczne, dotyczące zastosowania tego typu przepływomierzy, podając szczegółowe wytyczne odnośnie instalacji, eksploatacji i nadzoru metrologicznego, aby przepływomierze te mogły być z powodzeniem stosowane w pomiarach fiskalnych i pomiarach ogólnego przeznaczenia [1,19].

Nie od razu przepływomierze Coriolisa zaczęły się przyjmować na rynku jako dokładne i powszechnie stosowane urządzenia pomiarowe. Stopniowo przemawiały za nimi ich przewagi eksploatacyjne i metrologiczne, jak:

- dokładność – mierzą przepływ masy nawet z dokładnością poniżej  $\pm 0,1\%$ ,
- możliwość pomiaru kilku parametrów, np. masa (strumień masy), gęstość,
- nie wymaga się odcinków prostych na dolocie i odpływie, co oznacza że profil prędkości nie ma wpływu na pomiar,
- praktycznie nie jest wymagane odpowiednie miejsce instalacji w systemie,
- niskie koszty instalacji,
- możliwość pomiaru kilku faz: gazowej, ciekłej, także zawieszin i past, oraz możliwość pomiaru mediów wielofazowych,
- duży zakres pomiarowy – praktycznie od 0,1kg/h do 2000 t/h – dotyczy to oczywiście nie poszczególnych urządzeń a całego zespołu przepływomierzy [40].

Zanim ugruntowana pozycja przepływomierzy, jako dokładnych urządzeń pomiarowych, stała się faktem, to borykano się z kilkoma niedogodnościami, głównie związanymi z (np. [2,6,7,9,10,39]):

- niestabilnością „zera”,
- stratami ciśnienia,
- czasem odpowiedzi,
- pulsacjami przepływu, w tym głównie takimi, których częstotliwość była zbliżona do częstotliwości wewnętrznej Coriolisa,
- drganiami mechanicznymi instalacji (oruwowania), również o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości wewnętrznej Coriolisa,
- drganiami na innych częstotliwościach niż powyższe,
- wirami i zwiększonymi turbulencjami na dopływie,
- asymetrycznym profilem na dopływie,
- kawitacją,
- naprężeniami montażowymi,
- trudnościami związanymi z okresowym wzorcowaniem i rodzajem zastosowanego medium do wzorcowania (np. wody).

Powyższe problemy techniczne były przedmiotem licznych publikacji międzynarodowych i krajowych, np. [9,10], dlatego nie są przedmiotem szczegółowego omawiania w niniejszej publikacji. Producenci przepływomierzy masowych Coriolisa umieli przez ostatnie dwie dekady wyciągnąć pozytywne wnioski z badań przemysłowych tych urządzeń. Dziś przemysł, zajmujący się produkcją

tych urządzeń, doskonale sobie radzi ze stałym wyeliminowaniem wcześniejszych mankamentów technicznych, dotyczących przepływomierzy Coriolisa.

Można powiedzieć, że również od co najmniej dwóch dekad, przepływomierze Coriolisa są globalnie stosowane do pomiarów w przemyśle gazu ziemnego, jako urządzenia technologiczne i rozliczeniowe. Początek powszechnego stosowania przepływomierzy Coriolisa, jako gazomierzy rozliczeniowych, miał miejsce pod koniec lat dziewięćdziesiątych XX w. w Australii. Wewnętrzne zmiany organizacyjne systemu gazowniczego w Australii w stanie Victoria, polegające na podziale firmy gazowniczej AGL (Australian Gas Light) na firmę przesyłową, trzy firmy dystrybucyjne i trzy przedsiębiorstwa obrotu, co wymagało również budowy całkowicie nowego wewnętrznego systemu pomiarowego dla infrastruktury liniowej gazu ziemnego. System ten oparto w znacznej części na gazomierzach Coriolisa [10,24], oraz założono, że dla przyszłych okresowych wzorcowań tego typu przepływomierzy będą stosowane stanowiska wzorcowe operujące na wodzie zamiast na powietrzu czy gazie ziemnym [24]. Bardziej szczegółowe omówienie zagadnień związanych z wzorcowaniem przepływomierzy Coriolisa przedstawiono w dalszej części niniejszej publikacji.

Po doświadczeniach australijskich dalsze „otwarcie” na przepływomierze Coriolisa, jako urządzeń pomiarowych, stosowanych w gazownictwie, nastąpiło na rynkach Ameryki Północnej i w Europie [10]. W Polsce pierwsze zastosowania przepływomierzy Coriolisa miały miejsce na początku XXI w., ale były to początkowo zastosowania na kopalniach gazu ziemnego do celów technologicznych a nie rozliczeniowych [10].

Aktualnie przepływomierze masowe Coriolisa są powszechnie stosowanymi urządzeniami pomiarowymi dla gazów i cieczy, w tym także cieczy kriogenicznych [41]. Zaznaczył się też wyraźny trend wykorzystania Coriolisów jako urządzeń pomiarowo-rozliczeniowych dla gazu ziemnego skroplonego LNG (Liquefied Natural Gas), zarówno w obszarze dużej skali [22], jak i średniej i małej skali [27,28,30,32].

## Pomiary płynów w warunkach kriogenicznych

Mówiąc o pomiarach w warunkach kriogenicznych należy mieć na uwadze pomiary mediów w zakresie temperatur od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$  (od 73 to 120 K). Najprawdopodobniej pierwszy certyfikat zatwierdzenia przepływomierza Coriolisa do celów rozliczeniowych w obszarze kriogeniki, co dotyczyło przepływomierza D-Series firmy Micro-Motion, przez NTETC (*National Type Evolution Technical Committee*), był wydany w 1987 r. z przeznaczeniem dla skroplonych gazów technicznych: tlen, argon, azot [4,8]. Sięgano nawet do zakresów znacznie niższych temperatur, czyli nawet takich jak ciekły hel i intensywne badania przemysłowe dotyczące helu też przeprowadzano, np. [8]. Ostatnio, można także zauważyć na rynku gotowe produkty przeznaczone dla ciekłego wodoru (LH2, 20 K) [4,11].

Na przełomie lat dziewięćdziesiątych XX w. i dwutysięcznych rozpoczął się już „boom” związany z LNG i wtedy zaczęły się intensywne badania przemysłowe przepływomierzy Coriolisa z przeznaczeniem do późniejszych zastosowań w obszarze LNG. W badaniach tych wykorzystywano początkowo głównie ciekły azot (LN2) z uwagi na zbliżone temperatury z LNG, a jednak znacznie większy komfort bezpieczeństwa [4,8].

Możliwości wykorzystanie przepływomierzy Coriolisa do pomiarów mediów kriogenicznych były połączone z wieloma nowymi trudnościami technicznymi, które należało rozwiązać. Trudności te wiązały się z zmianami charakterystyk mechanicznych przepływomierzy pod wpływem niskich temperatur, oraz zmianami własności metrologicznych, również spowodowanych

wpływem temperatury medium mierzzonego. Początkowo wręcz niemożliwym, z praktycznego punktu widzenia, było stosowanie Coriolisów wzorcowanych w warunkach temperatur otoczenia do późniejszych pomiarów cieczy kriogenicznych, takich jak np. LNG, ciekły azot, ciekły tlen, ciekły argon, czy nawet ciekły dwutlenek węgla, ponieważ błędy pomiarowe były nieakceptowalne. Przede wszystkim prace rozwojowe szły w kierunku dopracowania konstrukcyjnego przepływomierzy dedykowanych do pomiaru mediów kriogenicznych oraz zmian algorytmów przeliczeniowych.

W przypadku niskich temperatur mediów pomiarowych, uwzględniono w algorytmach przeliczeniowych zmiany parametrów liniowych (wydłużenia i skracania wymiarów liniowych), wywołane zmianami termicznymi, oraz co za tym idzie, zmiany parametrów sprężystości elementów pomiarowych (rurek pomiarowych), powodowanych zmianami termicznymi. W praktyce termiczne zmiany sprężystości powodują zmiany takiego parametru mechanicznego jak Moduł Younga ( $E$ ), nazywany modulem odkształcalności liniowej lub modulem sprężystości podłużnej [34]. Wielkość ta określa sprężystość danego materiału przy rozciąganiu i ściskaniu, powodując zmiany wielkości liniowych, w tym także spowodowane zmianami temperatur. Moduł Younga wyraża więc charakterystyczną zależność odkształcenia liniowego dla danego elementu, wykonanego z danego rodzaju materiału od naprężenia jakie w nim występuje [4].

Drugim wspomnianym powyżej wyzwaniem było odpowiednie dopracowanie konstrukcji przepływomierzy, aby mogły być stosowane w pomiarach mediów kriogenicznych. Od początku wykorzystywania przepływomierzy Coriolisa, główne elementy pomiarowe – rurki pomiarowe – były o bardzo różnych kształtach [2,40,41], od „rurek prostych” po różnie ukształtowane rurki „wygięte”. W dzisiejszych komercyjnych urządzeniach wszystkie te rozwiązania konstrukcyjne dalej stosuje się w praktyce. Rurki wygięte okazały się jednak najlepsze do pomiarów ilości cieczy w warunkach kriogenicznych, ponieważ takie kształty są mniej podatne na odkształcanie w warunkach niskich temperatur niż „rurki proste” [41]. Przede wszystkim, w sytuacji nagłej zmiany temperatury, naprężenie osiowe wytwarzane w prostej rurce może być bardzo wysokie i w skrajnym przypadku może nawet przekroczyć wytrzymałość materiału, ponieważ jego dwa końce są sztywno związane. Jednak w przypadku rurek „wygiętych” („U”-rurki, „V”-rurki, „Ω”-rurki) indukowane osiowo naprężenia są znacznie mniejsze i tak konstruuje się przepływomierz aby naprężenia te mieściły się w dopuszczalnej wytrzymałości materiału. Z tych samych powodów przepływomierze z „wygiętymi” rurkami w warunkach kriogenicznych są dokładniejsze niż te z rurkami „prostymi”, właśnie z uwagi na znikomą wartość naprężenia osiowego i lepszą stabilność „zera” [2,10].

Dla celów kriogeniki szczelne obudowy przepływomierzy masowych, czyli obudowy rurek pomiarowych, są na ogół wypełniane inercyjnymi gazami bardzo suchymi, aby spadki temperatur nie powodowały kondensacji i szronienia wilgoci zawartej w gazie wypełniającym obudowę, co w dodatkowy sposób zmieniłoby parametr sprężystości elementów pomiarowych.

Do rozwiązania pozostawał dalej problem okresowych wzorcowań tych przyrządów.

## Wzorcowanie

Jak w przypadku każdego urządzenia pomiarowego, które okresowo należy wzorcować, to tak samo i w przypadku przepływomierzy Coriolisa, co pewien czas należy poddawać je procedurom wzorcowania. Podstawową zasadą metrologii jest, że podczas wzorcowania należy dążyć aby warunki wzorcowania były jak najbardziej zbliżone do przyszłych warunków pracy.

W przypadku pomiarów związanych z LNG, czy każdym innym płynem kriogenicznym, trudność ta polega na tym, że aby dokładnie odwzorować warunki pracy to wzorcowania musiałyby się również odbywać z wykorzystaniem danego płynu kriogenicznego. Jeszcze do niedawna było to zupełnie niemożliwe z powodu braku na świecie odpowiednich stanowisk czy instalacji wzorcujących z wykorzystaniem mediów kriogenicznych. Z tego powodu wzorcowanie przepływomierzy Coriolisa wykonywano z wykorzystaniem wody. Tak wywzorcowany przepływomierz na wodzie był później wykorzystywany do pomiarów innych mediów, w tym gazu ziemnego. Błędy pomiarowe mogły być wtedy duże. Gdy zaczęto wykorzystywać przepływomierze Coriolisa do pomiarów cieczy kriogenicznych to takie proste wzorcowanie, z wykorzystaniem wody, wydawało się nie do zaakceptowania z powodu zbyt dużych błędów pomiarowych.

Zawsze w procesie wzorcowania, po wykonaniu wzorcowania, ustala się poprawki pomiarowe lub od razu zmienia się charakterystykę metrologiczną urządzenia i tym samym dokonuje się okresowych korekcyjnych. Równanie pomiaru dla przepływomierza Coriolisa, podające zależność na strumień masy, opisuje się poniższym wzorem (2):

$$\dot{m} = K_R t_d \quad (2)$$

gdzie:

$K_R$  – współczynnik wzorcowania (kalibracji),

$t_d$  – oznacza opóźnienie czasowe wywołane przepływem medium pomiędzy dwoma ruchami (odkształceniami) elementu pomiarowego.

Jeżeli w wyniku wzorcowania ewentualne poprawki pomiarowe byłyby zbyt wysokie, to należałoby dokonać zmian wartości współczynników kalibracji „ $K_R$ ”. Konieczna jest do tego doskonała znajomość oprogramowania sterującego urządzeniem oraz dostęp do ustawień wewnętrznych przepływomierza, który może udzielić jedynie producent. Prostszy rozwiązaniem może się okazać zmiana charakterystyki pomiarowej urządzenia, poprzez uwzględnienie i zaimplementowanie rozszerzonego równania pomiaru, uwzględniającego zmiany sprężystości elementów pomiarowych ze zmianami temperatury. Zmiany równania pomiaru polegają na uwzględnieniu termicznych zmian takiego parametru jak Moduł Younga [34] dla danego elementu pomiarowego i ostatecznie równanie może przyjąć postać [41]:

$$\dot{m} = K_R [1 + (k_E + \alpha) \delta_T] t_d \quad (3)$$

gdzie:

$k_E$  – współczynnik zmian termicznych Modułu Younga,

$\alpha$  – liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej ( $= (E - E_R) / [E_R (T - T_R)]$ ); gdzie  $E$  i  $E_R$  oznacza wartość Modułu Younga odpowiednio w danej temperaturze roboczej i temperaturze referencyjnej, zwykle 20°C),

$\delta_T$  – współczynnik temperaturowy ( $= T - T_R$ ; gdzie  $T$  oznacza temperaturę roboczą w warunkach pomiaru;  $T_R$  oznacza temperaturę referencyjną, zwykle 20°C)),

Pozostałe symbole jak w równaniu (2).

Opierając się na zmodyfikowanym równaniu (2) urządzenie wzorcowane w warunkach niekriogenicznych (np. z wykorzystaniem wody) mogłoby być wykorzystywane do poprawnego pomiaru w warunkach kriogenicznych i wyniki pomiarów powinny być poprawne. Kilku producentów od ponad dekady stosuje takie podejście ale nie zawsze było to akceptowane przez ten czas, przez użytkowników, także samych producentów, jak i administracje miar w różnych krajach, jako uznaną metodę pomiarowo-rozliczeniową. Istotną, może nawet główną, przeszkodą w uznaniu skorygowanej metody wzorcowania przepływomierzy Coriolisa był brak na Świecie uznanych stanowisk do wzorcowania w warunkach

kriogenicznych, które mogłyby być okresowymi stanowiskami referencyjnymi. Pod tym względem, tzn. pod względem istnienia i dostępności kriogenicznych stanowisk do wzorcowania, sytuacja ta powoli zmienia się ale wciąż jest daleka od doskonałej.

Pierwszym na świecie stanowiskiem kriogenicznym, wykorzystywanym do wzorcowania przepływomierzy masowych z wykorzystaniem ciekłego azotu, było funkcjonujące do dziś w USA stanowisko CEESI (*Colorado Engineering Experiment Station Inc.*) należące do NIST (*National Institute of Standards and Technology*) w stanie Clorado [15]. Stanowisko to zmagало się jednak przez ostatnich kilka lat ze zbyt wysokim poziomem tzw. Najlepszej Zdolności Pomiarowej (ang. CMC, *Calibration and Measuring Capabilities*), która była na poziomie 0,5% natomiast oczekiwanie było na co najmniej połowę mniejszą [3,15]. Zakres pomiarowy z użyciem LN2 wynosił od 3 do 26t/h. Także w Europie dostępne jest już praktycznie stanowisko zlokalizowane na terenie terminala rozładunkowego LNG w Rotterdamie, uruchomione komercyjnie w 2023 r., zarządzane przez Niderlandzki Narodowy Instytut Miar – VSL B.V. Część dotycząca LNG przechodzi obecnie dalszą rozbudowę i jest zapowiedź, że instalacja dla LNG będzie uruchomiona na początku roku 2024 [18] ale że zostanie przeniesiona z Rotterdamu w inne miejsce. Wtedy też będą dokładnie znane możliwości wzorcowania przepływomierzy na tym stanowisku – zakres przepływów, CMC – choć już dziś wiadomo, że odnośnie parametru CMC wyzwaniem jest poziom rzędu 0,1% lub nawet poniżej. Istnieją także doniesienia, że kilka tego typu stanowisk do wzorcowania przepływomierzy w warunkach kriogenicznych powstaje w Chinach [21] z przeznaczeniem dla gazu ziemnego z możliwością rozszerzenia dla LNG, oraz w innych krajach Dalekiego Wschodu (Japonia, Australia). Doniesienia te jednak są trudne na dzień dzisiejszy do jednoznacznego udokumentowania pod względem usług komercyjnych.

## Projekty „SMOK”

Projekty SMOK prowadzone w latach 2016-2020 w ówczesnym PGNiG SA (obecnie Orlen S.A.) były związane z rozwijającym się obszarem LNG małej skali. Projekty te miały na celu wsparcie rynku wewnętrznego LNG w Polsce, likwidację „technicznych białych plam” związanych z systemem rozliczeń, poprzez zapewnienie dokładnych i wiarygodnych rozliczeń, oraz wykreowanie zupełnie nowych odbiorców. Tymi nowymi odbiorcami mieli być przede wszystkim tacy, którzy byliby zainteresowani partiami LNG mniejszymi niż jedna pojedyncza cysterna, odbiorcy zainteresowani LNG jako paliwami do pojazdów i paliwami bunkrowymi dla mniejszych jednostek pływających, drobny przemysł, czy nawet transport kolejowy. Projekty SMOK miały dać całkowicie alternatywne narzędzie pomiarowe w obszarze LNG, które mogłoby zastąpić tradycyjną na ówczesny czas metodę wagową o dokładności pomiarowej nie gorszej niż  $\pm 0,1\%$  [27]. Metoda ta, choć bardzo dokładna i precyzyjna, mogła być stosowana bez problemów na terminalach załadunkowych ale problem rozliczeniowy dotyczył bardziej miejsc rozładunkowych, gdzie metoda wagowa na ogół nie mogła być powszechnie stosowana [27,29]. Metody wagowe nie rozwiązywały też problemów związanych ze zjawiskiem starzenia się LNG i przede wszystkim z powstawaniem w wyniku tego zjawiska trudnej do rozliczenia frakcji oparów, powstających w wyniku naturalnego odparowywania fazy ciekłej w czasie transportu. Wszystkie te mankamenty miały być rozwiązane poprzez możliwość dokonywania rozliczeń w miejscach odbioru LNG za pomocą metody pomiarowej opartej na dokładnych przepływomierzach Coriolisa, które mogły być elementami stacjonarnych systemów pomiarowych na terenowych obiektach LNG, np. stacje regazyfikacji, lub raczej mogły być montowane bezpośrednio na pokładach cystern.

Projekty SMOK podzielone były na kilka celów i realizowane były etapami:

- a) budowa wzorcowego stanowiska – stanowisko SMOK-1<sup>1)</sup> – do pomiarów i legalizacji przepływomierzy; w analogiczne systemy miały być następnie wyposażane cysterny do przewozu LNG i ewentualnie lądowe stacje regazyfikacji,
- b) zatwierdzenie stanowisk SMOK jako krajowych przewoźnych stanowisk legalizacyjnych, uznanych i zaakceptowanych przez Krajową Administrację Miar (Główny Urząd Miar (GUM) lub Okręgowe Urzędy Miar (OUM)),
- c) stworzenie systemu nadzoru metrologicznego i zapewnienie systemu spójności pomiarowej dla stanowisk wzorcowych SMOK – poprzez wzorcowanie na stanowiskach wodnych i weryfikację na stanowisku referencyjnym z wykorzystaniem LNG,
- d) stworzenie typoszeregu stanowisk SMOK,
- e) stworzenie systemu pomiarowo-rozliczeniowego opartego na przepływomierzach masowych dla LNG w obszarze małej skali.

Zagadnienia związane z powyższymi podpunktami a)-c) były już przedmiotem wielu publikacji, np. [27,32] i licznych prezentacji na konferencjach naukowo-technicznych [3,29,31], także międzynarodowych [28], dlatego nie będą szczegółowo opisywane w niniejszym artykule. Wszystkie cele, które były postawione zgodnie z punktami a)-c) zostały osiągnięte i zakończyły się sukcesem.

Początkowo, stanowiska wzorcowe SMOK oparto na typoszeregu przepływomierzy Coriolisa dla zakresu przepływowego od 600 kg/h do 32 ton/h<sup>2)</sup>. Kilka wzorcowych stanowisk SMOK, zabudowanych na specjalnych przewoźnych skidach montażowych, zostało stworzonych z przeznaczeniem na cele badawcze i użytkowe. Wszystkie przeszły zatwierdzenia Głównego Urzędu Miar i każdy z nich uzyskał ostatecznie certyfikat krajowego stanowiska przewoźnego do wykonywania następujących okresowych legalizacji innych przepływomierzy, montowanych na cysternach do przewozu LNG i innych skroplonych gazów kriogenicznych, czy obiektach stacjonarnych takich jak stacje regazyfikacji LNG.

Mniej więcej dwa lata po rozpoczęciu projektów SMOK – grudzień 2016 – zaczęły się pojawiać cysterny, na których również montowano systemy pomiarowe, oparte na przepływomierzach Coriolisa, lub na części z nich można było spotkać przepływomierze kryzowe. Systemy pomiarowe na cysternach wyposażone w przepływomierze kryzowe są bardziej popularne dla przewozu skroplonych czystych gazów kriogenicznych (np. ciekły azot, ciekły tlen, ciekły argon, czy ciekły dwutlenek węgla) a nie mieszanin, takich jak LNG. Wynika to z tego, że przepływomierze kryzowe są przepływomierzami typu objętościowego a nie masowego i do algorytmu/procedury rozliczeniowej, w przypadku zastosowania przepływomierza kryzowego, konieczna jest znajomość gęstości rozliczanego medium. W przypadku skroplonych czystych gazów kriogenicznych, dla danej temperatury, są to wartości stałe. W przypadku LNG, które z założenia jest mieszaniną mogącą mieć różny skład i która ulega procesom starzenia się, na ogół trudno jest mieć wiedzę nt. gęstości rozliczanego medium, jeżeli gęstość ta nie zostanie in-situ zmierzona. Argument ten również przyczynia się do tego, że przepływomierze Coriolisa są właściwe do procesów rozliczeniowych LNG w obszarze małej skali, ponieważ Coriolisy mierzą także gęstość.

Od początku realizacji projektów SMOK dużym wyzwaniem było zapewnienie odpowiedniego statusu metrologicznego dla stosowanych instalacji z przepływami Coriolisa, aby zgodnie z przepi-

<sup>1)</sup> W latach 2016-2020 wyprodukowano cztery instalacje SMOK, w tym jedna całkowicie do celów komercyjnych.

<sup>2)</sup> Nazwa producenta i typ przepływomierza celowo nie są podawane z powodów marketingowych, natomiast były wymieniane w kilku innych pozycjach literaturowych autorstwa autora niniejszego artykułu i podawanych w Bibliografii.

sami prawa mogły być legalnie wykorzystywane do pomiarów i legalizacji. W tym celu nawiązana była współpraca z Laboratorium Przepływów Głównego Urzędu Miar w Warszawie, gdzie instalacje SMOK poddawano szczegółowym badaniom i ekspertyzom metrologicznym. Badania wykonywano na stanowisku wodnym, ponieważ do dziś nie ma możliwości przeprowadzenia tego typu badań na stanowiskach z użyciem LNG, zarówno w Polsce jak i w Europie, dla przepływomierzy w zakresie od kilkuset kg/h do kilkudziesięciu ton/h. Podstawowym celem badań i całego projektu było wykazanie:

1. możliwości wzorcowania przepływomierzy Coriolisa na stanowiskach wodnych, bez wykorzystywania LNG, lub innej cieczy kriogenicznej i możliwości dalszego ich wykorzystania w pomiarach ilości płynów w warunkach kriogenicznych,
2. wykazania, że przepływomierze Coriolisa są dokładnymi urządzeniami pomiarowymi, nadającymi się do zastosowań rozliczeniowych w obszarze małego LNG,
3. kontrolne sprawdzenie poprawności wzorcowania przepływomierzy Coriolisa na stanowiskach wodnych i na stanowisku z wykorzystaniem LNG,
4. wykazanie stabilności pomiarowej przepływomierzy Coriolisa w dłuższym okresie czasu – kilka lat,
5. popularyzacji przepływomierzy Coriolisa w zastosowaniach pomiarowo-rozliczeniowych jako rutynowych systemów pomiarowych w obszarze małej skali.

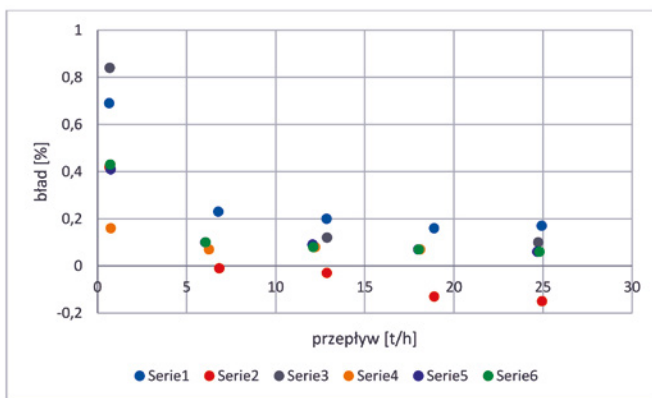
Badania z obszaru 1)-3) szczegółowo opisano w artykule [27] oraz [32]. Kontrolnego sprawdzenia na instalacji z wykorzystaniem LNG dokonano na stanowisku załadunku cystern w PGNiG SA w Odolanowie (obecnie Orlen S.A.) [27]. Wykazano, że przepływomierze Coriolisa są urządzeniami bardzo dokładnymi, dla których błędy pomiarowe nie przekraczały wartości  $\pm 0,2\%$  (w zakresie przepływów 5-30 t/h). Różnice pomiarowe między stanowiskami wodnym i z wykorzystaniem LNG nie przekraczały  $\pm 0,1\%$ .

Po zakończeniu badań w Laboratorium Przepływów GUM i na stanowisku LNG w Odolanowie pozostało jeszcze do wykazania, że przepływomierze Coriolisa zachowują stabilność pomiarową w dłuższym okresie czasu. Zgromadzony materiał z corocznych wzorcowań w laboratoriach w GUM w latach 2016-2023 pozwala na udokumentowane uogólnienia.

Na rys. 3 pokazano na wykresie błędy wzorcowania instalacji SMOK-1 [5] w okresie 2017-2023, wg danych z publikacji [23]. Pokazano sześć serii pomiarowych (wzorcowań) w laboratorium Przepływów GUM, na stanowisku wodnym, odpowiednio w latach: 2017 (serie1), 2018 (serie2), 2020 (serie3), 2021 (serie4), 2022 (serie5), 2023 (serie6). Analiza danych na wykresie wyraźnie pokazuje, że dla przepływów powyżej 5t/h, błędy wzorcowania są bardzo niewielkie i mieszczą się w granicach  $\pm 0,2\%$  przez okres 7 lat (niepewność wzorcowań wynosiła  $\pm 0,1\%$  [32]). Obecne, zastrzegające się europejskie wymagania metrologiczne [23], w odniesieniu do sprawdzeń przepływomierzy przeznaczonych do pomiaru cieczy innych niż woda, w tym LNG, dopuszczają podczas sprawdzeń błąd maksymalny MPE (ang.: Maximum Permissible Error) wynoszący  $\pm 1,5\%$  dla systemów pomiarowych i  $1,0\%$  dla przepływomierzy. Przepisy krajowe [38] są łagodniejsze dopuszczając  $2,5\%$  dla instalacji pomiarowych. W porównaniu z MPE w projektach SMOK ( $\pm 0,2\%$ ) jest to różnica niemalże o rząd wielkości na korzyść badań SMOK.

Analiza danych na wykresie na rys.3 pozwala na jeszcze jeden istotny wniosek. Aktualnie w Polsce<sup>3)</sup> i wielu innych krajach europejskich wymagania prawne narzucają obowiązkowy czasookres wzorcowań przepływomierzy Coriolisa do zastosowań do pomiarów rozliczeniowych LNG wynosi on jeden rok [33]. Badania stabilności przepływomierzy (rys.3) wyraźnie wskazują, że z uwagi

na stabilność wskazań wykazaną podczas okresowych wzorcowań w dłuższym okresie czasu (7 lat), to czasookres obowiązkowych wzorcowań może być bezproblemowo przedłużony – np. do 5 lat.



Rys. 3. Zależność błędów wzorcowania dla przepływomierzy Coriolisa (CMF200); serie pomiarowe 1-6 wykonane odpowiednio w latach 2017, 2018, 2020, 2021, 2022, 2023) na stanowisku wodnym Laboratorium Przepływów GUM w Warszawie  
 Fig. 3. Dependence of calibration errors for the Coriolis flowmeter (CMF200); measurement series 1-6 performed in 2017, 2018, 2020, 2021, 2022, and 2023 respectively, at the water station of the GUM Flow Laboratory in Warsaw

## Podsumowanie i wnioski

Po 45 latach od wynalezienia przepływomierza masowego, opartego na sile Coriolisa można powiedzieć, że jest to jeden z najbardziej popularnych urządzeń pomiarowych. Może być wykorzystywany do pomiarów większości płynów, w tym gazów i ich mieszanin, cieczy i ich mieszanin, cieczy z zawiesinami materiałów stałych, układów wielofazowych oraz cieczy w warunkach kriogenicznych.

Dzięki rozwijającym w latach 2016-2020 w PGNiG SA (obecnie ORLEN S.A.) projektom SMOK od ośmiu lat przepływomierze masowe Coriolisa są z powodzeniem stosowane jako elementy systemów pomiarowych w obszarze małego LNG, eliminując wszelkie problemy rozliczeniowe jakie były napotykanne przy stosowaniu statycznych metod wagowych, związanych głównie z trudnościami rozliczeniowymi, związanymi z obecnością fazy oparów (BOG) i starzeniem się LNG. Przepływomierze Coriolisa są dziś podstawą przy rozliczeniach dostaw LNG na cysternach. W tym obszarze udało się stworzyć nie tylko układy rozliczeniowe Coriolisa na pokładach cystern, ale także krajowy system nadzoru takich mobilnych układów pomiarowych. System ten jest nadzorowany poprzez krajowe stanowiska wzorcowe Coriolisa, mające zatwierdzenie Głównego Urzędu Miar, jak i system weryfikacji tych właśnie stanowisk przewoźnych z wykorzystaniem stanowisk przepływowych stanowiących wzorce państwowe jakimi dysponuje Krajowa Administracja Miar. W ten sposób zapewniono też spójność pomiarową dla przepływomierzy Coriolisa, wykorzystywanych do pomiarów rozliczeniowych w obszarze całej kriogeniki, w tym także do LNG. Badania w ramach projektów SMOK wykazały także wysoką stabilność przepływomierzy Coriolisa wykorzystywanych w kriogenice. Daje to także podstawy do weryfikacji (złagodzenia) dotychczasowych wymagań krajowych [33] odnośnie obowiązkowych corocznych legalizacji przepływomierzy Coriolisa w kierunku znacznego zmniejszenia tych częstotliwości legalizacji – np. raz na 5 lat. Odpowiednia inicjatywa w tej sprawie jest podejmowana przez Izbę Gospodarczą Gazownictwa [32]. Pozwoliłoby to na dalsze zachowanie ciągłego nadzoru pomiarowego nad tymi systemami ale przy okazji znacznie obniżyłoby koszty ich eksploatacji i uprościłoby procedury eksploatacyjne. Warto wspomnieć, że analogiczne podejście jak w projektach SMOK odnośnie wzorcowania i zachowania spójności pomiarowej Corio-

<sup>3)</sup> Analogicznie w niektórych innych krajach europejskich, np. na Litwie.

lisów z wykorzystaniem stanowisk wodnych, są dziś powszechnie zaakceptowane i stosowane przez producentów tych urządzeń, np. [13].

Aktualnie zdecydowana większość cystern, przeznaczonych do przewozu LNG i innych kriogenicznych gazów skroplonych (około 300 w skali całego kraju), jest już wyposażona w systemy pomiarowe oparte na przepływomierzach Coriolisa. Te które jeszcze nie są wyposażane a są w eksploatacji, są sukcesywnie doposażane w systemy Coriolisa. Taką metodę pomiaru LNG w obszarze małego LNG można już uznać za standardową. Aktualnie na ukończeniu jest standard Izby Gospodarczej Gazownictwa [25], który zawiera praktyczne rekomendacje i zasady postępowania, dotyczące wykorzystywania przepływomierzy masowych Coriolisa w pomiarach rozliczeniowych LNG w obszarze małej skali.

Możliwości przepływomierzy Coriolisa w zastosowaniach dla kriogeniki nie kończą się na skroplonych gazach czystych czy na LNG. W ramach Komitetu Standardu Technicznego Izby Gospodarczej Gazownictwa tworzony jest także standard określający możliwości i rekomendacje w zastosowaniach przepływomierzy Coriolisa do pomiarów dwutlenku węgla [26], jaki w niedługiej przyszłości będzie transportowany systemami rurociągowymi do miejsc jego składowania.

W literaturze technicznej są już pozytywne doniesienia odnośnie możliwości wykorzystania przepływomierzy Coriolisa do pomiarów ciekłego wodoru [12] (temperatura – 253°C).

## LITERATURA

- [1] APAGA Report no. 11, 2023 – *Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter*.
- [2] Baker R.C. 2016. *Flow Measurement Handbook, Industrial designs, Operating principles, performance, and Applications*, Cambridge University Press, Second Ed.: 560-602.
- [3] Bogucki A., Cholaś K., Kowalczyk S., Rosłonek G., Urbanowicz A. 2018. „Wykorzystanie infrastruktury PGNiG SA Oddział w Odolanowie do weryfikacji wzorca roboczego do przepływomierzy kriogenicznych”, Konferencja FORGAZ, INiG Kraków.
- [4] Buttler M., Emerson, Dep. Energy-Application-Innovation, Boulder, Colorado, USA – komunikat prywatny, 2023.
- [5] Certyfikat ekspertyzy metrologicznej GUM nr L.9.417.9.2017.783.1
- [6] Cheesewright R., Clark C., Bisset D.1999.” Understanding the experimental response of Coriolis mass flowmeters to flow pulsations” *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* (10):207–215.
- [7] Cheesewright R., Clark C., Bisset D.2000.”The identification of external factors which influence the calibration of Coriolis mass flowmeters” *Journal of Flow Measurement and Instrumentation* (11):1–10.
- [8] de Jonge T., Patten T., Rivetti A., Serio L., *Development of a mass flowmeter based on the coriolis acceleration for liquid, supercritical and superfluid helium*, Repopr CERN-LHC/2002-19 (19th International Cryogenic Engineering Conference ICE-19, 22-26 July 2002, Grenoble, France.
- [9] Dworak P., *Determine the State of Art. in Coriolis Gas Meters*, GERG Project No.1.48, Warsaw 2003.
- [10] Dworak P.2004.” Gazomierze masowe Coriolisa” *Nowoczesne Gazownictwo* (4):11-18.
- [11] Emerson Flyer.2021. „*Liquid hydrogen and ultra cryogenic solutions. Micro Motion ELITE Criolis flow meter*”.
- [12] Emerson Flyer.2023. „*Emerson Micro-Motion Coriolis Meter Tackles Cryogenic Liquid Hydrogen Flow Measurement*”, AN-002260, 2023.
- [13] Endress and Hauser, Technical White Paper, „*Transferability of water calibration to gas applications in Promass flowmeters*”.
- [14] <https://www.akademia-automatyki.pl/blog/2015/04/21/przeplywomierze-masowe-coriolisa/> (listopad 2023r.).
- [15] <https://www.ceesi.com> (grudzień 2023r.).
- [16] <https://www.controlglobal.com/home/article/11288737/emerson-celebrates-45-years-of-coriolis-leadership> (listopad 2023r.).
- [17] <https://www.micro-motion-45th-anniversary.pdf> (emerpol.pl) (listopad 2023r.).
- [18] <https://www.vsl.nl/nieuws/european-center-for-flow-measurement-viert-iso-17025-accreditatie-en-heropening-ling-faciliteit/> (grudzień 2023r.).
- [19] ISO 10790:2015 – *Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements)*.
- [20] Li Y.T., Lee S.Y., *A fast response true mass rate flowmeter*, Transactions on ASME, 75 (1953), 835-841.
- [21] Liang G., Qi Z., Mingchang G., Di X., Dianje G., *The biggest calibration facility to be built for actual natural gas in China*, FLOMEKO 2003, 11th IMEKO TC9 Conference on Flow Measurement Groningen, Netherlands, 12 – 14 May 2003.
- [22] LNG Custody Transfer Handbook, GIIGNL, 2021, Ed. 6<sup>th</sup>, pp: 15,87,95-96,115.
- [23] OIML R-117-1 *International Recommendation. Dynamic Measuring Systems for Liquids Other than Water, Part 1 – Metrological and Technical Requirements*, Ed 2019.
- [24] Potocki A.C.<sup>4)</sup>, *Transformation in the Australian Gas Industry*, Warsaw, Dec. 2003 (referat wygłoszony podczas spotkania ‘kick-off meeting’ przy realizacji europejskiego projektu GERG 1.48, w którym ówczesny PGNiG S.A. był liderem kojnorsorcjum (patrz pozycja literaturowa [9]).
- [25] Projekt Standardu Izby Gospodarczej Gazownictwa pr-ST-IGG-2702 (2024), „*Rozliczenia dostaw LNG na obiektach małej skali*”.
- [26] Projekt Standardu Izby Gospodarczej Gazownictwa pr-ST-IGG-4601 (2024), „*Zalecenia dotyczące projektowania i eksploatacji rurociągów do transportu dwutlenku węgla*”.
- [27] Rosłonek G., Bogucki A., Urbanowicz A., Kowalczyk S.2019.” Możliwości zastosowania przepływomierzy masowych typu Coriolis do pomiarów rozliczeniowych w obszarze LNG małej skali oraz innych cieczy kriogenicznych, *Nafta-Gaz* (10): 633-639.
- [28] Rosłonek G.2018. *LNG prover with Coriolis master meter*, Emerson Global User Exchange, Hague.
- [29] Rosłonek G., „*Pomiary rozliczeniowe małego LNG*”, I Bałtyckie Warsztaty LNG – „Zimna Zośka”, 16-17.05.2017, Gdańsk.
- [30] Rosłonek G.2016. „*Skroplony gaz ziemny – LNG. Część 1 – Zagadnienia ogólne i podstawy procesu rozliczeniowego*”, *Nafta-Gaz* (2): 87–94.
- [31] Rosłonek G., „*SMOK – Instalacja do legalizacji dystrybutorów LNG jako paliwa do pojazdów*”. Forgaz 2020, INiG Kraków.
- [32] Rosłonek G., Starczewski C.2023.” *Pomiary rozliczeniowe dynamiczne w obszarze LNG małej skali – pomiary na miarę czasu*” *Przegląd Gazowniczy* 2(78):59-62.
- [33] Rozporządzenie Ministra Rozwoju i Finansów z dnia 13 kwietnia 2017r w sprawie rodzajów przyrządów pomiarowych podlegających prawnej kontroli metrologicznej oraz zakresu tej kontroli (Dz.U z 2017r. poz. 885).
- [34] Skorko M.1979, *Fizyka*, PWN Warszawa : 149-152.
- [35] US Pat. No. 2.832.218 (1958)
- [36] US Apl. Pat. No. 818,475 (1977)
- [37] US Pat. No. 109,524 (1978)
- [38] US Pat. No. Re. 31,450 (1983)
- [39] Trigas A., Hope S.H.1991. *A comparison of the accuracy and process control capability of turbine and Coriolis flowmeters*, International Conference on Flow Measurement in Industry and Science, London.
- [40] Wang T., Baker R.C.2014.” Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions”. *Flow Measurement and Instrumentation*, 40:99–123.
- [41] Wang T., Hussain Y.2009.” Coriolis mass flow measurement at cryogenic temperaturę”, *Flow Measurement and Instrumentation*, 20:110-115.

<sup>4)</sup> A.C.Potocki w latach 1983-2003 był pracownikiem australijskiej firmy AGL.