

KOREKCJA SIŁY WYPORU W POMIARACH MASY

nowa funkcja wag serii 2Y

Publikacja zawiera opis oddziaływania siły wyporu na proces ważenia materiałów o różnych gęstościach z wykorzystaniem wag elektronicznych. Pokazuje możliwości kompensowania wpływu siły wyporu poprzez zastosowanie dwóch metod. Pierwsza wykorzystuje wzorce masy, druga wykorzystuje czujniki elektroniczne. Omówiona została dokładność pomiaru przedstawionych rozwiązań oraz różnice jakie pomiędzy nimi występują. Opracowanie zawiera informację o wagach w jakich zastosowano omawiane metody kompensacji siły wyporu.

Opracowanie:
Sławomir Janas
Stanisław Karpisz



RADWAG WAGI ELEKTRONICZNE

26-600 RADOM, ul. Bracka 28
e-mail: radom@radwag.pl <http://www.radwag.pl>

Spis treści

1. Wstęp	3
2. Siła wyporu.....	4
2.1. Ocena błędów pochodzących od siły wyporu	5
2.2. Praktyczne znaczenie współczynnika korygującego wpływ siły wyporu na wynik pomiaru	7
2.3. Wartość siły wyporu podczas ważenia materiałów o różnych gęstościach.....	9
2.4. Pomiar masy ładunków w zmiennych warunkach otoczenia	10
3. Badanie i wyniki testów praktycznych.....	14
3.1. Stanowisko badawcze	14
3.2. Wyniki testów	15
3.2.1. Analiza zmiany masy próbki aluminiowej.....	15
3.2.2. Analiza zmiany masy próbki gumy.....	16
3.2.3. Analiza zmiany masy filtrów wykorzystywanych w pomiarach zapylenia	17
4. Analiza błędów związanych z wyznaczaniem masy skorygowanej.....	18
4.1. Powtarzalność wskazań wagi, stabilność czułości	18
4.2. Wpływ błędu pomiaru temperatury na wyznaczenie gęstości powietrza.....	19
4.3. Wpływ błędu pomiaru wilgotności na gęstość powietrza.....	20
4.4. Wpływ błędu pomiaru ciśnienia na gęstość powietrza	21
4.5. Wpływ dokładności pomiaru warunków środowiskowych – podsumowanie.....	22
4.6. Wpływ dokładności gęstości próbki na wskazanie skorygowane o siłę wyporu	23
5. Sposoby korekcji siły wyporu wykorzystywane w wagach RADWAG.....	24
5.1. Metoda 1 półautomatyczna z zastosowaniem wzorców masy.....	24
5.2. Metoda 2 automatyczna z wykorzystaniem czujników	26
5.3. Wzorcowanie czujników	28
5.4. Wagi z zintegrowanymi czujnikami warunków środowiskowych	29
5.5. Porównanie metod.....	31
6. Podsumowanie	32

1. Wstęp

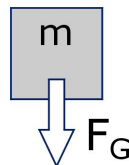
Poszukiwanie nowych rozwiązań w zakresie szeroko rozumianej myśli technicznej wymaga wielu testów i badań. Wszelkie urządzenia pomiarowe wykorzystywane w tym celu powinny cechować się odpowiednią dokładnością. Analizując proces pomiaru obecnie dostrzega się szereg czynników, które kiedyś zanedbywano.

Taka tendencja jest wynikiem powszechnego dostępu do wiedzy, którą przenosi się na aspekty praktyczne. W odniesieniu do wag elektronicznych sprowadza się to do wykonania analizy systemu pomiarowego. Ta ocena powinna obejmować nie tylko typowe parametry wagi takie jak powtarzalność czy stabilność wskazań wagi, ale również oddziaływanie warunków środowiskowych np. wpływ wilgotności czy zmian ciśnienia.

Należy pamiętać o tym, że pomiar masy z wykorzystaniem wag elektronicznych polega na określeniu siły, z jaką ważony obiekt jest przyciągany przez Ziemię. Tę zależność można wyrazić jako:

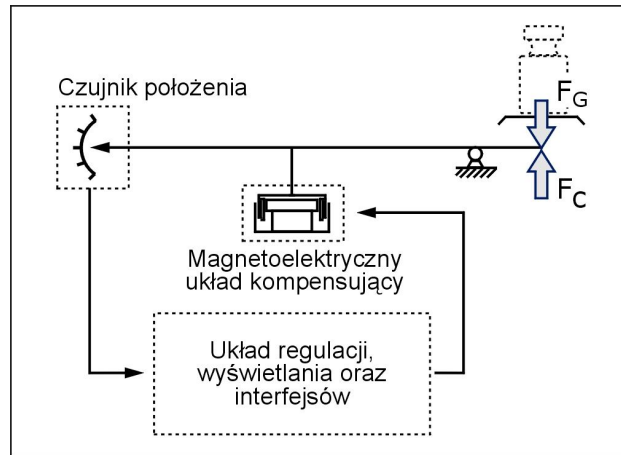
$$F_G = m \cdot g$$

gdzie: F_G – siła grawitacyjna [N]
 m – masa ciała [g]
 g – przyspieszenie ziemskie [ok. 9,81 m/s²]



Rys. 1. Siła grawitacyjna w procesie ważenia

Żeby otrzymać wynik ważenia należy zrównoważyć siłę [F_G] z jaką ładunek jest przyciągany przez Ziemię a następnie zmierzyć sygnał równoważący [F_C] i powiązać go z konkretną masą. Sygnałem który jest mierzony może być napięcie, rezystancja, poziom wypełnienia sygnału lub inna wartość zależnie od konstrukcji wagi. Wszystkie te czynności realizowane są przez producenta w czasie tzw. adiustacji fabrycznej. Użytkownik otrzymuje wagę już wyskalowaną – jej wskazania są poprawne.



Rys. 2. Schemat działania wagi magnetoelektrycznej

Z zasady pomiaru jaki jest wykorzystywany przez wagi elektroniczne wynika, że:

- istnieje dość silna zależność wyniku pomiaru od zmian przyśpieszenia ziemskiego
- podczas powszechnie dokonywanych pomiarów nie uwzględnia się wpływu siły wyporu

2. Siła wyporu

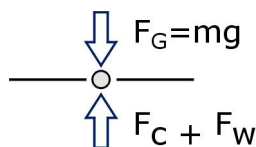
Siła wyporu jest to siła działająca na ciało zanurzone w płynie czyli w cieczy lub gazie w obecności ciężaru. Jest skierowana pionowo do góry, przeciwnie do ciężaru. Wartość siły wyporu jest równa ciężarowi płynu wypartego przez to ciało.

$$F_w = \rho \cdot g \cdot V$$

gdzie:

- ρ – gęstość ośrodka, w którym znajduje się ciało (cieczy lub gazu)
- g – przyspieszenie ziemskie
- V – objętość wypieranego płynu równa objętości części ciała zanurzonego w płynie.

W przypadku wag elektronicznych mamy więc następujący układ sił biorących udział w procesie ważenia:



Rys. 3. Układ sił w procesie ważenia

gdzie:

- F_G – siła grawitacyjna
- F_C – siła równoważąca siłę grawitacyjną
- F_W – siła wyporu

Analizując ten układ sił można stwierdzić, że siła grawitacyjna jest wartością stałą w danym miejscu pracy. Siła równoważąca jest odpowiedzią wagi na siłę grawitacyjną więc również jest wartością stałą. Jedyną zmienną, która powinna być kalkulowana praktycznie w trybie ciągłym dla wag o dużych rozdzielczościach jest siła wyporu.

Taki wymóg wynika z tego, że siła wyporu jest zależna od gęstości powietrza atmosferycznego w miejscu pracy. Gęstość jest natomiast zależna od:

- ciśnienia
- temperatury
- wilgotności

Korygując uzyskany wynik ważenia o siłę wyporu uzyskujemy prawdziwą masę próbki – podobnie jak podczas ważenia w próżni. Można wówczas analizować dryfty masy próbki w czasie np. ważenie różnicowe eliminując błąd pochodzący od zmiennej siły wyporu. Jest to ważne, gdy pomiar odbywa się z dużą rozdzielczością np. $200 \text{ g} \times 10 \text{ } \mu\text{g} \div 2 \text{ g} \times 0,1 \text{ } \mu\text{g}$. Oczywiście zakłada się, że proces wagowy jest realizowany poprawnie tzn. im mniejsza masa próbki tym większa dokładność wagi.

Praktycznie taką procedurę stosuje się do wzorcowania państwowych wzorców pomiarowych masy oraz najwyższej klasy wzorców pomiarowych masy.

2.1. Ocena błędów pochodzących od siły wyporu

Zmiana gęstości powietrza (zmienna siła wyporu) podczas pomiarów masy może wpływać na błąd wskazań. Wielkość tego błędu zależy również od gęstości ważonej próbki oraz jej masy. Wagi są adiustowane fabrycznie za pomocą wzorców stalowych o gęstości około 8000 kg/m^3 w związku z tym:

- pomiar masy próbek o gęstościach zbliżonych do gęstości stali będzie prawie zawsze poprawny
- dla próbek o małych gęstościach rzędu $500 - 4000 \text{ kg/m}^3$ błąd wynikający ze zmian gęstości powietrza może być znaczny. Wielkość tego błędu jest zależna od masy próbki.

Żeby skorygować wpływ siły wyporu na proces ważenia należy wyznaczyć dwie wartości. Pierwsza z nich to gęstość powietrza, druga to gęstość badanej próbki.

Formuła dla wyliczenia gęstości powietrza wg. przedstawiona jest poniżej [1]:

$$\rho_a = \frac{0,348444 \cdot p - h(0,00252 \cdot t - 0,020582)}{273,15 + t} \quad [1]$$

gdzie: ρ_a – gęstość powietrza [kg/m^3]
 p – ciśnienie atmosferyczne ($600 \text{ hPa} \leq p \leq 1100 \text{ hPa}$)
 h – wilgotność powietrza ($20\% \leq h \leq 80\%$)
 t – temperatura powietrza ($15^\circ\text{C} \leq t \leq 27^\circ\text{C}$)

Celem wyliczenia poprawnej masy (skorygowanej o siłę wyporu) należy otrzymany wynik ważenia pomnożyć przez współczynnik wg. poniżej zależności [2] :

$$m_c = m \cdot \frac{1 - \frac{\rho_0}{\rho}}{1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}} \quad [2]$$

gdzie: m_c – masa próbki
 ρ_0 – gęstość powietrza [kg/m^3]
 ρ – gęstość wzorca, którym była adjustowana waga [8000 kg/m^3]
 ρ_c – gęstość próbki która jest ważona [kg/m^3]
 m – wynik ważenia pokazany przez wagę

Przykład:

Ciśnienie powietrza 996 hPa, wilgotność 45 %, temperatura 25 °C,
próbka typu skóra o gęstości 860 kg/m^3 i masie $m_1=80 \text{ g}$

Wyliczenie gęstości powietrza:

$$\rho_a = \frac{0,348444 \cdot 996 - 45 \cdot (0,00252 \cdot 25 - 0,020582)}{273,15 + 25} = 1,1576 \text{ kg/m}^3$$

¹ EURAMET/cg-18v.02 Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments

² OIML D-28 „Conventional value of the result of weighing In air”

Wyliczenie rzeczywistej masy m_2 próbki:

$$m_2 = \frac{1 \cdot \frac{1,1576 \text{ kg/m}^3}{8000 \text{ kg/m}^3}}{1 \cdot \frac{1,1576 \text{ kg/m}^3}{860 \text{ kg/m}^3}} \cdot 80 \text{ g} = 80,096238 \text{ g}$$

Rzeczywista masa próbki czyli masa próbki w próżni wynosi 80,096238g co w praktyce oznacza, że udział siły wyporu w tym procesie ważenia wynosi:

$$m_2 - m_1 = 80,096238 \text{ g} - 80 \text{ g} = 0,096238 \text{ g}$$

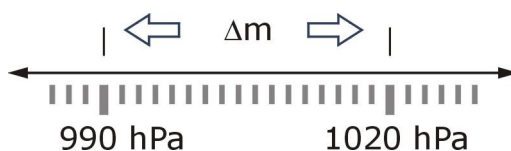
Pomiar masy próbek w próżni jest dość rzadko wykonywany w praktyce laboratoryjnej ze względu na brak wyposażenia. Zasadne wydaje się więc zastosowanie współczynnika kompensującego wpływ siły wyporu – jest to rozwiązanie znacznie prostsze. W wagach serii 2Y produkcji RADWAG wszystkie przeliczenia są wykonywane automatycznie, w zasadzie jedyną wymaganą informacją, którą należy wpisać w odpowiednim menu jest gęstość próbki.

2.2. Praktyczne znaczenie współczynnika korygującego wpływ siły wyporu na wynik pomiaru

Współczynnik korygujący wpływ siły wyporu na pomiar masy jest konieczny wówczas, gdy:

- wymagana jest informacja o rzeczywistej masie próbki. Może to mieć dość istotne znaczenie wtedy, gdy ta sama próbka jest wielokrotnie ważona w dużych odstępach czasu.
- Obserwowana jest zmiana masy próbki w długim okresie czasu

Wpływ zmiennej gęstości powietrza na wynik pomiaru może być wówczas znaczący. Żeby tego uniknąć musimy wiedzieć jak zmienna gęstość powietrza wpływa na pomiar.

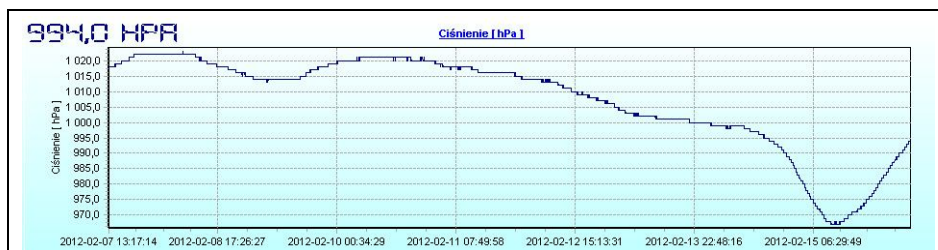


Rys. 4. Dryft masy wynikający ze zmian ciśnienia atmosferycznego

Wielkość błędu jaki może powstać, gdy tę samą próbkę ważymy w pewnych odstępach czasu jest zależna od:

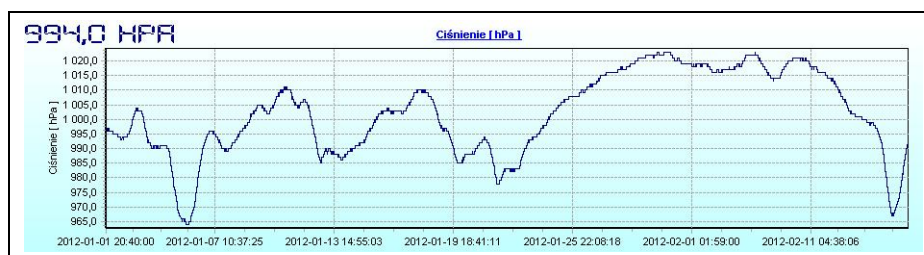
- zmian gęstości powietrza w czasie
- różnicy jaka występuje pomiędzy gęstością wzorca (8000 kg/m^3), którym adiustowana jest waga a gęstością próbki.

Przy założeniu, że typowa zmiana ciśnienia powietrza wynosi ok. 30 hPa, a pomieszczeniu wagowym temperatura i wilgotność są wielkościami stałymi, możliwe jest oszacowanie zmienności masy praktycznie każdej próbki. Takie działania są zasadne wtedy, gdy rejestrujemy masę próbki z odpowiednią dokładnością. Poniżej są przedstawione wykresy pokazujące dryft ciśnienia w krótszym i dłuższym okresie czasu.



Rys. 5. Rejestracja zmian ciśnienia atmosferycznego w okresie 07/02÷ 16/02/2012

Całkowita zmiana ciśnienia w tym okresie wyniosła 55 hPa, a w okresie od 13 do 15 lutego ciśnienie zmieniło się o 35 hPa.



Rys. 6. Rejestracja zmian ciśnienia atmosferycznego w okresie 01/01÷ 16/02/2012

Rejestracja zmian ciśnienia w dłuższym okresie czasu (47 dni) pokazuje, że ten czynnik cechuje się dość dużą zmiennością. Należy to uwzględnić wówczas, gdy prowadzi się długotrwałą obserwację masy próbki.

2.3. Wartość siły wyporu podczas ważenia materiałów o różnych gęstościach

Wielkość błędu jaki wnosi do wyniku ważenia siła wyporu można ocenić zakładając stałość wszystkich parametrów w warunkach odniesienia. Różnica pomiędzy masą wskazaną przez wagę a masą skorygowaną (o siłę wyporu) będzie zależna od objętości ładunku (jego masy). Przyjmując, że ciśnienie wynosi 1013 hPa, temperatura = 20°C, wilgotność = 40% uzyskujemy następujące wartości dla przykładowych materiałów.

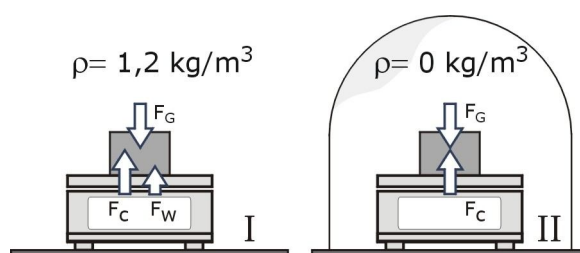
Masa próbki	Drewno 800 kg/m ³	Woda 1000 kg/m ³	Guma 1600 kg/m ³	Kreda 2000 kg/m ³	Tantal 16600 kg/m ³
Odchylenie od wartości prawdziwej [mg]					
0,001 g	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
0,01 g	0,013	0,010	0,006	0,003	0,000
0,1 g	0,135	0,105	0,060	0,033	- 0,008
1 g	1,352	1,051	0,600	0,330	- 0,078
10 g	13,520	10,513	6,005	3,302	- 0,777
20 g	27,041	21,025	12,009	6,603	- 1,554
40 g	54,081	42,051	24,018	13,206	- 3,109
60 g	81,122	63,076	36,027	19,810	- 4,663
80 g	108,163	84,101	48,036	26,413	- 6,217
100 g	135,203	105,127	60,045	33,016	- 7,772

Tabela 1. Wpływ siły wyporu na pomiar różnych próbek

Z danych tabelarycznych wynikają zależności, które można opisać następująco:

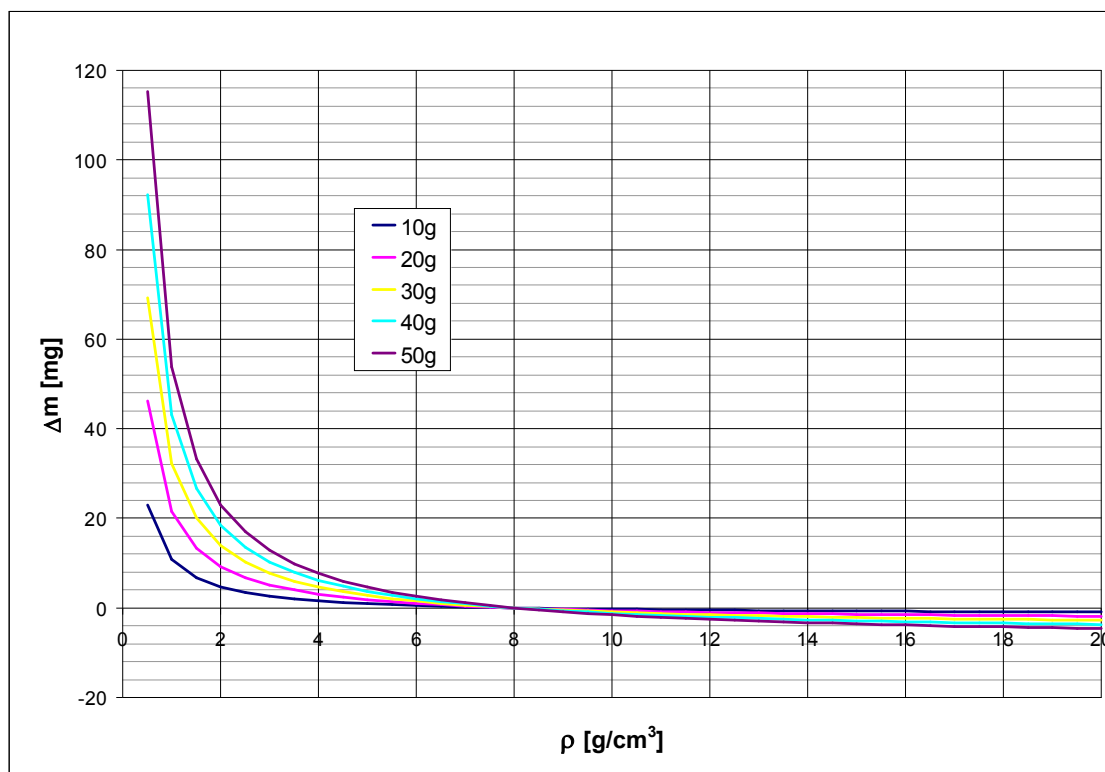
- im mniejsza gęstość próbki tym większe odchylenie od wartości prawdziwej.
- im mniejsza masa próbki przy danej gęstości tym mniejsze odchylenie od wartości prawdziwej.

Przez wartość prawdziwą należy w tym przypadku rozumieć pomiar na który nie wpływa siła wyporu czyli pomiar w próżni. Graficzna interpretacja takiego podejścia jest przedstawiona poniżej.



Rys. 7. I – pomiar w warunkach otoczenia, II – pomiar w próżni

Poniżej przedstawiony jest wykres pokazujący zależność wielkości poprawki (Δm) od gęstości różnych (ρ) i ich masy.



Z analizy wykresu wynika, że dla materiałów o gęstości równej gęstości wzorca (8000 kg/m^3) jakim była adjustowana waga, poprawka Δm wynikająca z siły wyporu jest równa zero.

2.4. Pomiar masy ładunków w zmiennych warunkach otoczenia

Jak wykazano poprawka wynikająca z występowania siły wyporu może być dość znaczna. To czy tę poprawkę należy stosować zależy od wymagań co do dokładności jakie powinna spełniać analiza wagowa. Konieczna jest zatem indywidualna ocena błędów i niepewności związanych z procesem wagowym.

Podczas pomiarów masy wyróżniamy dwa główne obszary, które mogą być źródłami błędów. Pierwszy to parametry wagi a głównie powtarzalność wskazań i stabilności czułości. Tu można wykorzystać informacje pochodzące od producenta lub wykonać własny test. Co do powtarzalności to powinna ona być wykonana w rzeczywistych warunkach pracy, wykorzystując elementy które będą ważne.

Stabilność czułości jest utrzymywana na odpowiednio wysokim poziomie poprzez układy automatycznej adjustacji, które są standardem w wagach RADWAG. Waga okresowo samoczynnie wykonuje tę procedurę uwzględniając zmiany temperatury oraz upływ czasu.

Drugi obszar to informacje o parametrach środowiska i próbki a w tym:

- błąd pomiaru temperatury
- błąd pomiaru wilgotności
- błąd pomiaru ciśnienia atmosferycznego
- dokładność określenia gęstości próbki

Temperatura, wilgotność i ciśnienie mają wpływ na gęstość powietrza, toteż poprzez analizę zmian tych czynników otrzymamy niepewność wyznaczenia gęstości powietrza. Przez dokładność określenia gęstości próbki należy rozumieć wiarygodną ilość miejsc dziesiętnych (informacja np. 1300,1 kg/m³ jest mało dokładna).

2.5. WPŁYW WYPORU POWIETRZA NA WZORCOWANIE WZORCÓW MASY I ODWAŻNIKÓW

Przy wzorcowaniu wzorców masy i odważników wysokiej klasy dokładności, konieczne jest wprowadzenie poprawki wynikającej z działania sił aerostatycznych – tzw. poprawki na różnicę wyporu powietrza. Wynika to z faktu, że podczas pomiaru w powietrzu uzyskujemy tylko masę pozorną, która dla wzorców masy i odważników o jednakowej masie nominalnej ale wykonanych z różnych materiałów (o różnej gęstości), nie jest taka sama.

Podczas pomiaru masy dwóch odważników wykonanych z różnych materiałów otrzymamy różne wyniki. Procedura nakazuje więc obliczenie rzeczywistej masy odważników, tzn. masę w próżni poprzez wprowadzenie poprawki wynikającej z różnicy wyporu powietrza w wyznaczonej według poniższego równania:

$$W = w_B - w_k = (V_B - V_k) \cdot \rho$$

lub

$$w = w_B - w_k = m_n \left(\frac{1}{\rho_B} - \frac{1}{\rho_k} \right) \cdot \rho$$

gdzie:

w_B – masa powietrza wypartego przez wzorcowany odważnik

w_k – masa powietrza wypartego przez wzorzec odniesienia

V_B – objętość wzorcowanego odważnika

V_k – objętość wzorca odniesienia

ρ – gęstość powietrza

ρ_B – gęstość wzorcowanego odważnika

ρ_k – gęstość wzorca odniesienia

M_n – masa nominalna wzorcowanego odważnika

W praktyce dla wzorców masy i odważników klas E₂, F₁, F₂, M₁, M₂ i M₃ objętość nie jest wyznaczana, ale jest obliczana na podstawie znanej gęstości materiału z jakiego są wykonane wzorcowane wzorce masy lub odważniki. Gęstość odważników nie jest na ogół dokładnie znana dla poszczególnych nominałów. Jest to podyktowane faktem, że materiał z reguły nie jest jednorodny, odważniki posiadają jamę adiustacyjną oraz różnych wykonania.

Poprawka wynikająca z różnicy wyporu powietrza ulega zmianie w zależności od gęstości powietrza. Z tego też powodu należy utrzymywać stałe warunki środowiskowe w pomieszczeniu, gdzie wykonywane są pomiary.

Przyjęto, że „normalne warunki środowiskowe” są przy temperaturze powietrza 20 °C, wilgotności względnej powietrza 50 % i ciśnieniu atmosferycznym 1013,25 hPa. Przy takich parametrach warunków środowiskowych gęstość powietrza wynosi około 1,2 kg/m³. Średnie wahania gęstości powietrza mieszczą się w granicach ± 10 % jeśli zmiana temperatury powietrza mieści się w granicach ± 15 °C i ciśnienia atmosferycznego ± 46 hPa. Przy tych zmianach gęstości powietrza poprawka wynikająca z różnicy wyporu powietrza wynosi $2 \cdot 10^{-6}$ masy porównywanych odważników, np. ze stali nierdzewnej, gdzie gęstość wynosi około 7900 kg/m³ i mosiądzu, którego gęstość wynosi około 8400 kg/m³.

Jeżeli niepewność wyznaczania masy tych odważników wynosi około $1 \cdot 10^{-5}$, to poprawkę można pominąć. Jeśli natomiast oczekujemy mniejszej niepewności wówczas poprawkę należy uwzględnić. Ze względu na to, że gęstość wzorców masy i odważników nie jest dokładnie znana, jak również nie jest jednakowa, przyjęto umowną gęstość odważników zbliżoną do ich gęstości rzeczywistej. Obecnie umowną wartość gęstości odważników przyjmuje się na poziomie 8000 kg/m³ przy ważeniu w powietrzu o temperaturze 20 °C i średniej gęstości powietrza 1,2 kg/m³.

Aby ujednoczyć pomiary masy oraz zachować spójność przy porównywaniu wskazań i błędów granicznych dopuszczalnych, umowna gęstość odważników równa 8000 kg/m³ i średnia gęstość powietrza równa 1,2 kg/m³ zostały przyjęte w skali międzynarodowej.

Przyjęcie umownej gęstości wzorców masy i odważników eliminuje obliczenie poprawki wynikającej z różnicy wyporu powietrza, a tym samym upraszcza i ułatwia procedurę wzorcowania. Odważniki z różnych materiałów (o różnej objętości – gęstości), których masę wyznaczono przy przyjęciu umownej gęstości 8000 kg/m³, „równoważą się w powietrzu”.

W celu zapewnienia określonej dokładności pomiarów masy jest wymagane, aby rzeczywista gęstość odważników zawierała się w ściśle ustalonych granicach w stosunku do gęstości umownej. Gęstość wzorców masy i odważników powinna być dobierana w taki sposób, aby zmiana gęstości powietrza o 10 % w stosunku do wartości średniej gęstości powietrza 1,2 kg/m³ nie wprowadzała błędu większego niż 0,25 wartości błędu granicznego dopuszczalnego (M_{pe}) dla danego wzorca masy czy odważnika (Tabela 1 Dokumentu R111-1 OIML).

W Zaleceniu R111-1 OIML możemy znaleźć minimalne i maksymalne granice dla gęstości wzorców masy i odważników:

Wartość nominalna	$\rho_{\min}, \rho_{\max} (10^3 \text{ kg/m}^3)$							
	Klasa odważników							
	E_1	E_2	F_1	F_2	M_1	M_{1-2}	M_2	M_{2-3}
$\geq 100 \text{ g}$	7,934-8,067	7,81-8,21	7,39-8,73	6,4-10,7	$\geq 4,4$	$\geq 3,0$	$\geq 2,3$	$\geq 1,5$
50 g	7,92-8,08	7,74-8,28	7,27-8,89	6,0-12,0	$\geq 4,0$			
20 g	7,84-8,17	7,50-8,57	6,6-10,1	4,8-24,0	$\geq 2,6$			
10 g	7,74-8,28	7,27-8,89	6,0-12,0	$\geq 4,0$	$\geq 2,0$			
5 g	7,62-8,42	6,9-9,6	5,3-16,0	$\geq 3,0$				
2 g	7,27-8,89	6,0-12,0	$\geq 4,0$	$\geq 2,0$				
1 g	6,9-9,6	5,3-16,0	$\geq 3,0$					
500 mg	6,3-10,9	$\geq 4,4$	$\geq 2,2$					
200 mg	5,3-16,0	$\geq 3,0$						
100 mg	$\geq 4,4$							
50 mg	$\geq 3,4$							
20 mg	$\geq 2,4$							

Tabela 2. Minimalne i maksymalne granice gęstości dla wzorców masy

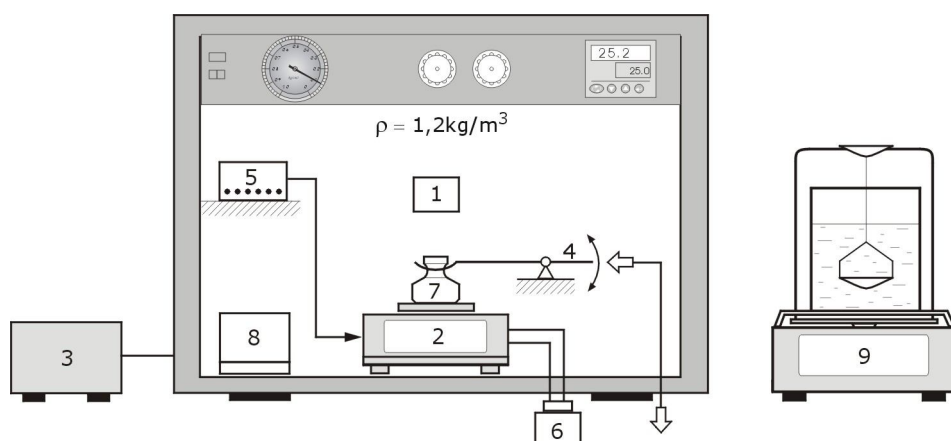
3. Badanie i wyniki testów praktycznych

3.1. Stanowisko badawcze

Badanie wpływu zmiennej gęstości powietrza na proces ważenia wymaga specjalnego stanowiska badawczego na które składa się:

- hermetyczna komora ciśnieniowa [1]
- waga elektroniczna MYA 5/2Y [2]
- kompresor [3]
- automatyczny układ nakładania kontrolowanych mas [4]
- czujnik warunków środowiskowych: ciśnienie, temperatura, wilgotność, gęstość powietrza [5]
- układy zdalnego sterowania pracą wagi oraz zasilania [6]
- obiekt ważony [7]
- czujnik kontrolny ciśnienia [8]
- zestaw KIT 85 do wyznaczania gęstości ciał stałych i cieczy [9]

Schemat takiego stanowiska pokazuje poniższy rysunek.



Rys. 8. Stanowisko do badania wpływu siły wyporu na proces ważenia

Proces badania polega na określeniu zmian masy próbki w normalnych warunkach ($\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$) oraz w nadciśnieniu lub podciśnieniu. Hermetyczna komora [1] połączona jest z kompresorem [3], który utrzymuje zadane ciśnienie. Z czujnika warunków środowiskowych [5] waga [2] pobiera informację o ciśnieniu, wilgotności, temperaturze oraz gęstości powietrza. Na tej podstawie wyznacza współczynnik korygujący wpływ siły wyporu na ważoną próbkę [7]. Układ nakładania kontrolowanych mas [4] jest sterowany sygnałem zewnętrznym i umożliwia nałożenie i zdjęcie z platformy wagi próbki [7]. Poprzez układ zdalnego sterowania [6] odbywa się rejestracja wyników pomiarów oraz proces adjustacji wagi. Gęstość próbek wyznacza się wykorzystując zestaw KIT 85 [9].

3.2. Wyniki testów

Celem badania jest potwierdzenie poprawności założeń teoretycznych opisujących wpływ siły wyporu na proces ważenia oraz ocena skuteczności działania współczynnika korygującego. Badanie zmienności masy próbek przy różnych gęstościach powietrza wykonano w dwóch układach:

- pomiar bez współczynnika korygującego siłę wyporu
- pomiar ze współczynnikiem korygującym siłę wyporu

Badanie ma pokazać jaki jest udział siły wyporu w procesie ważenia próbki aluminiowej o gęstości 2700kg/m^3 oraz gumowej o gęstości 1367kg/m^3 gdy zachodzą typowe zmiany ciśnienia. Testy wykonano rejestrując masę próbki w różnych ciśnieniach atmosferycznych. Założono, że maksymalna zmiana ciśnienia może wynosić 30 hPa. Przed rozpoczęciem testu wykonano adjustację wagi wewnętrzną masą celem ustalenia dokładności.

3.2.1. Analiza zmiany masy próbki aluminiowej

Podczas testu nr 1 nie korzystano ze współczynnika korygującego siłę wyporu. Uzyskano tym samym dwie masy m_1 - masa próbki przy ciśnieniu otoczenia p_1 oraz m_2 - masa próbki przy ciśnieniu $p_1 - 30\text{hPa}$. Wyniki z testu nr 1 zawiera poniższa tabela:

$p_1 = 996 \text{ hPa}$	$p_2 = 966 \text{ hPa}$	$\Delta p = 30 \text{ hPa}$
$m_{AL-1} = 3,591667 \text{ g}$	$m_{AL-2} = 3,591688 \text{ g}$	$\Delta m = 0,000021 \text{ g}$

Z danych pomiarowych wynika, że podczas ważenia tej samej próbki w zmiennym ciśnieniu otrzymujemy błąd wskazań $21 \mu\text{g}$. Ta wartość może być znacząca podczas ważenia różnicowego tej próbki np. wagowa ocena procesu starzenia się powierzchni, pokrywania powierzchniowego warstwami ochronnymi i dekoracyjnymi.

W drugim etapie badania celem wyeliminowania zmian masy wynikających ze zmian ciśnienia zastosowano współczynnik korygujący siłę wyporu. Dla poprawnego działania tego współczynnika wymagane są informacje o gęstości próbki oraz o aktualnej gęstości powietrza. Gęstość próbki zbadano wykorzystując zestaw KIT 85 otrzymując wynik $2,701167 \text{ g/cm}^3$. Informację o gęstości powietrza pobierano w trybie on-line z czujnika warunków środowiskowych. Wyniki z testu nr 2 zawiera poniższa tabela:

$p_1 = 996 \text{ hPa}$	$p_2 = 966 \text{ hPa}$	$\Delta p = 30 \text{ hPa}$
$m_{AL-3} = 3,592662 \text{ g}$	$m_{AL-4} = 3,592664 \text{ g}$	$\Delta m = 0,000002 \text{ g}$

Otrzymana różnica pomiędzy masami m_1 oraz m_2 pokazuje, że współczynnik działa prawidłowo. Tym samym długotrwałe badanie próbki nie będzie obarczone błędem wynikającym ze zmian ciśnienia. Rozbieżność pomiędzy masami m_{AL-3} i m_{AL-4} wynika z powtarzalności wskazań wagi dla danej masy oraz warunków badania. Różnica pomiędzy masami w teście nr 1 oraz nr 2 wynika z działania współczynnika korygującego wpływ siły wyporu.

3.2.2. Analiza zmiany masy próbki gumy

Podczas testu nr 1 nie korzystano ze współczynnika korygującego siłę wyporu. Uzyskano tym samym dwie masy m_1 - masa próbki przy ciśnieniu otoczenia p_1 oraz m_2 - masa próbki przy ciśnieniu $p_1 - 30\text{hPa}$. Wyniki z testu nr 1 zawiera poniższa tabela:

$p_1 = 996 \text{ hPa}$	$p_2 = 966 \text{ hPa}$	$\Delta p = 30 \text{ hPa}$
$m_{G-1} = 5,502322 \text{ g}$	$m_{G-2} = 5,502425 \text{ g}$	$\Delta m = 0,000103 \text{ g}$

Pomiar masy próbki w różnych ciśnieniach obarczony jest błędem w wielkości $103 \mu\text{g}$. Różnica pomiędzy masami jest większa niż w przypadku próbki aluminiowej ponieważ

- gęstość gumy jest znacznie mniejsza niż gęstość aluminium
- masa próbki z gumy była większa niż masa próbki z aluminium.

Otrzymaną różnicę w masach można odnieść do innej (znacznie większej) mierzonej masy uwzględniając to, że zależność błąd / masa ma charakter liniowy. Tak więc dla próbki o masie 55g otrzymamy błąd około 1 mg .

W drugim etapie badania, test nr 2 wykorzystano współczynnik korygujący wpływ siły wyporu podczas pomiarów. Gęstość próbki wyznaczono uzyskując wynik 1367 kg/m^3 . Informację o gęstości powietrza pobierano w trybie on-line z czujnika warunków środowiskowych. Wyniki z testu nr 2 zawiera poniższa tabela.

$p_1 = 996 \text{ hPa}$	$p_2 = 966 \text{ hPa}$	$\Delta p = 30 \text{ hPa}$
$m_{G-3} = 5,506125 \text{ g}$	$m_{G-4} = 5,506129 \text{ g}$	$\Delta m = 0,000004 \text{ g}$

Widoczna różnica pomiędzy masami wynosi $4 \mu\text{g}$ i zawiera się w granicach powtarzalności wskazań wagi dla danego obciążenia. Współczynnik korygujący wpływ siły wyporu działa skutecznie w różnych ciśnieniach.

Wyniki otrzymane podczas pomiarów w teście nr 1 różnią się wyraźnie od wyników z testu nr 2. Ta różnica wynika z tego, że podczas testu nr 1 nie wykorzystywano współczynnika korygującego, otrzymaliśmy więc tzw. masę „pozorną”. Podczas testu nr 2 zastosowano współczynnik, tak więc każda masa jest masą skorygowaną czyli masą próbki jaką miałyby gdyby pomiar odbył się w próżni.

3.2.3. Analiza zmiany masy filtrów wykorzystywanych w pomiarach zapylenia

Podczas badań zanieczyszczeń powietrza pyłem PM 2,5 czy też PM 10 wykorzystuje się filtry o dość małych średnicach. Masy tych filtrów zawierają się w granicach od ok. 50 mg do ok. 200 mg. Wpływ siły wyporu na tak małe obiekty jest w zasadzie pomijalny. Jednakże w takich badaniach stosuje się również duże filtry o masach ponad 3g. W takich przypadkach udział siły wyporu jest już znaczący uwzględniając to, że wynik końcowy jest wynikiem różnicowym z badanych mas.

Podczas badania wpływu siły wyporu wykorzystywano czyste filtry ze szkła boro-krzemowego typu GF/A oraz GF/C o masie około 0,8 g. Założono tym samym, że wpływ masy pyłu jaki znajdzie się na filtrze po dokonaniu pomiaru np. aspiratorem jest nieistotny (zbyt mała masa). Główny błąd wynika zatem z procesu ważenia gdy występuje zmienna gęstość powietrza.

Podczas testu nr 1 nie korzystano ze współczynnika korygującego siłę wyporu. Uzyskano tym zmienność masy filtra przy wymuszonej zmianie ciśnienia o 30 hPa. Wyniki z testu nr 1 zawiera poniższa tabela:

$p_1 = 996 \text{ hPa}$	$p_2 = 966 \text{ hPa}$	$\Delta p = 30 \text{ hPa}$
$m_{F-1} = 0,875558 \text{ g}$	$m_{F-2} = 0,875570 \text{ g}$	$\Delta m = 0,000012 \text{ g}$

Pomiar masy filtrów w różnych ciśnieniach obarczony jest błędem w wielkości 12 μg . Otrzymany wynik odniesiony do masy filtra ok. 3g daje błąd pomiaru ok. 40 μg . W każdym przypadku oceniając czy to jest wielkość znacząca należy odnosić ją do ilości zaabsorbowanego pyłu.

Podczas testu nr 2 wykorzystano współczynnik korygujący siłę wyporu. Gęstość próbki wyznaczono jako 2,79 g/cm³, informacje gęstości powietrza pobierano z czujnika warunków środowiskowych. Uzyskane wyniki zawiera tabela.

$p_1 = 996 \text{ hPa}$	$p_2 = 966 \text{ hPa}$	$\Delta p = 30 \text{ hPa}$
$m_{F-3} = 0,875792 \text{ g}$	$m_{F-4} = 0,875797 \text{ g}$	$\Delta m = 0,000005 \text{ g}$

Po zastosowaniu mechanizmu korygującego masę filtra otrzymano różnicę w masach 5 μg . W tym przypadku poprawa stabilności masy próbki wynosi około 50% i ma to związek ze specyfiką próbki a głównie z jej wielkością oraz budową wewnętrzną.

4. Analiza błędów związanych z wyznaczaniem masy skorygowanej

Każdy proces w którym wyznaczana jest jakaś wartość jest obarczony błędami wynikającymi ze stosowanej aparatury pomiarowej, użytych czujników oraz wybranej metody. Oszacowanie na ile wyznaczona w czasie badania wartość jest prawdziwa jest możliwe po wykonaniu analizy błędów. Pozwala to ocenić przydatność stosowanych przyrządów oraz metod. Wykorzystując te informacje można również modyfikować stanowisko badawcze osiągając pożądaną dokładność pomiaru.

4.1. Powtarzalność wskazań wagi, stabilność czułości

Powtarzalność wskazań według Międzynarodowego Słownika Metrologii VIM 2010, jest to precyzja pomiaru w warunkach powtarzalności pomiaru, które zawierają:

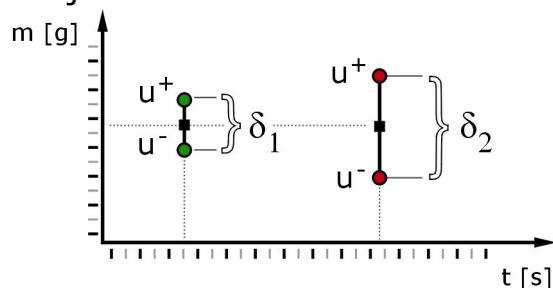
- te samą procedurę
- tego samego wykonawcę pomiaru
- ten sam układ pomiarowy
- te same warunki użytkowania, to samo miejsce
- krótki interwał pomiędzy wykonywanymi pomiarami.

W procesie wyznaczania masy skorygowanej powtarzalność można rozpatrywać w dwóch aspektach. Dla małych mas wynoszących około 10% ÷ 20% Max jest to główny składnik niepewności pomiaru, udział innych błędów jest pomijalny. Można zatem stwierdzić, że wskazanie wagi jest prawdziwe, ale obarczone błędem wynikającym z powtarzalności wskazań.

Dla mas znacznie większych poza powtarzalnością należy uwzględnić inne czynniki takie jak np. centryczność czy liniowość. Jednakże to jak dokładnie wskazuje waga zależy w zasadzie od dwóch czynników:

- od tego jaką posiada powtarzalność wskazań oraz
- od klasy wzorców (ich błędów), którymi była ustalana jej dokładność.

Ogólnie prawdziwe jest stwierdzenie, im lepsza powtarzalność, tym mniejszy błąd przypadkowy δ . Interpretacja graficzna tych zależności przedstawiona jest poniżej.



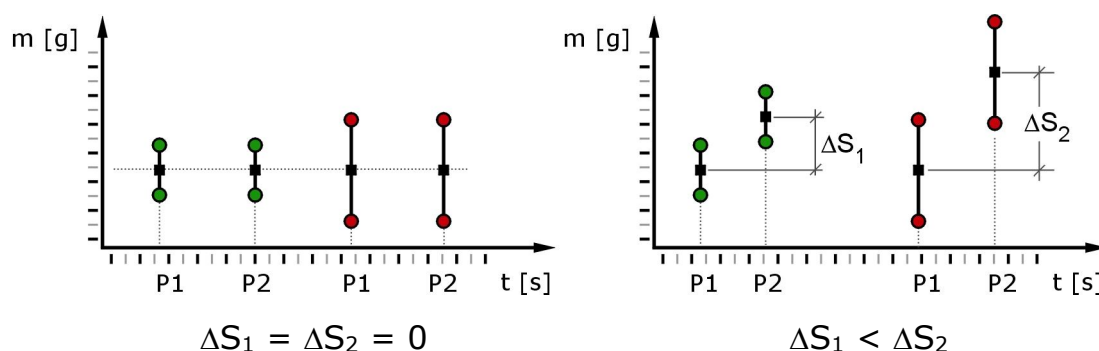
Rys. 9. Powtarzalność jako parametr wagi

Z powyższych rysunków widać, że im lepsza powtarzalność (mniejszy błąd pojedynczego pomiaru), tym mniejszy błąd przypadkowy podczas ważenia próbki.

$$\delta_1 < \delta_2$$

Pewną poprawę powtarzalności można uzyskać poprzez optymalizację parametrów wagi względem warunków użytkowania.

Stabilność czułości $[\Delta S]$ to inaczej zdolność wagi do wskazywania tego samego wyniku dla stałej masy, która jest okresowo ważona. Przy założeniu, że stabilność czułości jest idealna ($\Delta S = 0$) to jedynym źródłem błędów będzie np. powtarzalność wskazań (niepewność pomiaru).



Rys. 10. Stabilności czułości w czasie

Praktycznie nie ma urządzeń idealnych toteż waga, która posiada lepszą stabilność czułości (ΔS_1) wprowadza do końcowego wyniku analizy różnicowej znacznie mniejszy błąd. Błąd wynikający ze zmian czułości (dryftów) eliminuje się poprzez adjustację wagi. Dobrą Praktyką jest wykonywanie jej przed pomiarami.

4.2. Wpływ błędu pomiaru temperatury na wyznaczenie gęstości powietrza

Zastosowane w wadze układy pomiaru temperatury umożliwiają pomiar z dokładnością $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Tym samym należy oszacować jak taki rozrzut pomiaru temperatury wpływa na proces wyznaczania gęstości powietrza a tym samym współczynnika korygującego siłę wyporu.

Wykorzystując równanie [1] można określić jak błąd pomiaru temperatury w wielkości $0,4^\circ\text{C}$ względem wielkości prawdziwej (przy innych stałych czynnikach) wpływa na wyznaczenie gęstości powietrza. Uzyskana różnica w gęstości powietrza wynosi $0,0017725\text{ kg/m}^3$.

Mając skrajne wartości gęstości powietrza można wykorzystując równanie [2] określić błąd pomiaru masy. Dla przykładowego materiału o gęstości 2500kg/m^3 otrzymamy więc następujące różnice w pomiarach:

Masa próbki [g]	δm [μg]
0,001 g	0
0,01 g	0
0,1 g	0
1 g	0,5
10 g	4,9
20 g	9,8
40 g	19,50
60 g	29,30

Tabela 3. Wpływ niedokładności pomiaru temperatury na błąd pomiaru masy

Jak pokazuje tabela błąd pomiaru masy wynikający tylko i wyłącznie z niedokładności pomiaru temperatury jest dość mały. Dla próbek o masie 60 g wynosi on tylko ok. 0,03 mg. Ta wielkość będzie praktycznie poza wszelką detekcją ponieważ powtarzalność określana jako odchylenie standardowe wag z działką elementarną $d = 0,01\text{mg}$ zawiera się w przedziale $0,015 \div 0,03$ mg.

To czy niepewność pomiaru temperatury ma znaczący wpływ jest oczywiście zależna od założeń początkowych tzn. zdefiniowania tego jak dokładnie należy wykonać pomiar.

4.3. Wpływ błędu pomiaru wilgotności na gęstość powietrza

Zastosowane w wadze układy pomiaru wilgotności umożliwiają pomiar z rozdzielczością 0,05%, jednakże parametr dokładność podaje tolerancję $\pm 1,8\%$. Wynika to z histerezy czujnika, toteż podczas analiz przyjęto, że pomiar może być obarczony błędem 3,6%. Wykorzystując równanie nr [1] oraz numer [2] można określić wpływ wilgotności na pomiar gęstości powietrza a następnie na błąd pomiaru masy. Dla przykładowego materiału o gęstości 2500kg/m^3 otrzymamy zależnie od masy następujące różnice w pomiarach:

Masa próbki [g]	δm [μg]
0,001 g	0
0,01 g	0
0,1 g	0
1 g	0,1
10 g	1
20 g	2
40 g	4,1
60 g	6,1

Tabela 4. Wpływ niedokładności pomiaru wilgotności na błąd pomiaru masy

Wilgotność ma stosunkowo mały skutek na gęstość powietrza w porównaniu z wpływem temperatury.

Analizę otrzymanych wyników można sprowadzić do następujących stwierdzeń:

- Wpływ błędu pomiaru temperatury na wyznaczenie gęstości powietrza jest niewielki. Dla przykładowej masy 10g, która jest dość znaczna (dla mikrowag) otrzymujemy błąd ok. 5 μ g (odchylenie standardowe wag dla tych mas wynosi ok. 2 μ g). Dla masy 100 g (o gęstości 2500 kg/ m³) błąd wskazania wynosi 0,04 mg
- Wpływ błędu pomiaru wilgotności na wyznaczenie gęstości powietrza można uznać za mało znaczący. Błędy wynikające z tego czynnika są znacznie mniejsze niż powtarzalność wskazań wagi.

4.4. Wpływ błędu pomiaru ciśnienia na gęstość powietrza

Do pomiaru gęstości powietrza w wagach RADWAG wykorzystywane są czujniki o dokładności pomiarowej $\pm 0,2$ hPa. Należy więc zakładać, że podczas pomiaru może występować odchylenie maksymalnie 0,4 hPa względem wartości prawdziwej. Taka zmiana może powodować błąd wyznaczenia gęstości powietrza o 0,00047 kg/m³. Dla przykładowego materiału o gęstości 2500kg/m³ otrzymamy zależnie od masy następujące różnice w pomiarach:

Masa próbki [g]	δm [μ g]
0,001 g	0
0,01 g	0
0,1 g	0
1 g	0,1
10 g	1,3
20 g	2,7
40 g	5,2
60 g	7,9

Tabela 5. Wpływ niedokładności pomiaru ciśnienia na błąd pomiaru masy

Zastosowany czujnik pomiaru ciśnienia ma wystarczającą dokładność pomiarową. Błąd jaki może wynikać z błędnego wskazania ciśnienia jest znacznie mniejszy niż błąd wynikający z powtarzalności wskazań wagi dla danego obciążenia – podobnie jak w przypadku pomiaru temperatury i wilgotności. Tym samym detekcja błędu jaki generuje czujnik ciśnienia poprzez pomiar masy jest praktycznie niemożliwa.

4.5. Wpływ dokładności pomiaru warunków środowiskowych – podsumowanie

Zastosowane układy pomiarowe temperatury, wilgotności oraz ciśnienia mają niewielki wpływ na dokładność wyznaczenia gęstości powietrza a tym samym na skorygowany pomiar masy. Wielkości błędów jakie wprowadzają do procesu ważenia są znacznie mniejsze niż powtarzalność wskazań wagi dla danego obciążenia. Tym samym detekcja tych zmian poprzez ważenie jest problematyczna. Zestawienie zbiorcze dla kilku mas zawiera poniższa tabela.

Masa próbki [g]	Błąd pomiaru masy δm wynikający z niedokładności pomiaru			Parametry wagi d/sd
	Temperatura [$\pm 0,2^\circ\text{C}$]	Wilgotność [$\pm 1,8\%$]	Ciśnienie [$\pm 0,2$ hPa]	
100 mg	0,0 μg	0,0 μg	0,0 μg	0,1 μg / 1 μg
1 g	0,5 μg	0,1 μg	0,1 μg	0,1 μg / 1 μg
20 g	9,8 μg	2 μg	2,7 μg	1 μg / 3 μg
60 g	29,3 μg	6,1 μg	7,9 μg	10 μg / 30 μg

Tabela 6. Wpływ niedokładności pomiaru warunków środowiskowych na błąd pomiaru masy

Tabela zawiera również wartości działek elementarnych wagi [d] oraz powtarzalności wyrażonej jako odchylenie standardowe [sd]. Zakłada się tym samym, że do pomiarów stosuje się wagi o obciążeniach maksymalnych bliskich wartościom mierzonym.

Odchylenie standardowe jest miarą powtarzalności wskazań wagi i jest określane z zależności:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe

x_i – kolejny pomiar

\bar{x} – średnia arytmetyczna z serii pomiarów

n – liczba powtórzeń w serii pomiarów

Rzeczywisty rozrzut wskazań wagi jest trzykrotnie większy niż odchylenie standardowe. Jest to pewne przybliżenie, dokładną wartość należy wyznaczyć poprzez badanie.

4.6. Wpływ dokładności gęstości próbki na wskazanie skorygowane o siłę wyporu

Jedną z informacji jaka jest wymagana podczas wyliczenie masy skorygowanej o siłę wyporu jest gęstość próbki. Przy ocenie jak dokładność gęstości próbki wpływa na wartość masy skorygowanej można wykorzystać zależność [2]:

$$m_c = m \cdot \frac{1 - \frac{\rho_0}{\rho}}{1 - \frac{\rho_0}{\rho_c}}$$

gdzie: m_c – masa próbki
 ρ_0 – gęstość powietrza [kg/m^3]
 ρ – gęstość wzorca, którym była adjustowana waga [8000 kg/m^3]
 ρ_c – gęstość próbki która jest ważona [kg/m^3]
 m – wynik ważenia pokazany przez wagę

Przy założeniu, rzeczywista gęstość próbki wynosi 1600 kg/m^3 a błąd podania gęstości próbki wynosi $0,01 \text{ g/cm}^3$ oraz $0,1 \text{ g/cm}^3$ (wszystkie inne czynniki są stałe) otrzymujemy rozbieżność w wyznaczeniu masy skorygowanej jak niżej.

Masa próbki	Odchylenie od wartości prawdziwej gdy błąd podania gęstości próbki wynosi odpowiednio:	
	$0,01 \text{ g/cm}^3$	$0,1 \text{ g/cm}^3$
0,001 g	0,0 mg	0,0 mg
0,01 g	0,0 mg	0,0 mg
0,1 g	0,001 mg	0,004 mg
1 g	0,005 mg	0,044 mg
10 g	0,046 mg	0,441 mg
20 g	0,093 mg	0,882 mg
40 g	0,186 mg	1,764 mg
60 g	0,280 mg	2,647 mg
80 g	0,373 mg	3,529 mg
100 g	0,466 mg	4,411 mg

Tabela 7. Wpływ niedokładności gęstości próbki na błąd pomiaru masy

Mając na uwadze to, że błąd wynikający z niedokładności pomiarowej warunków środowiskowych zawiera się w granicach od kilku do kilkudziesięciu mikrogramów (patrz tabela nr 6) to decydujące znaczenie przy określeniu masy skorygowanej ma poprawne podanie gęstości próbki.

5. Sposoby korekcji siły wyporu wykorzystywane w wagach RADWAG

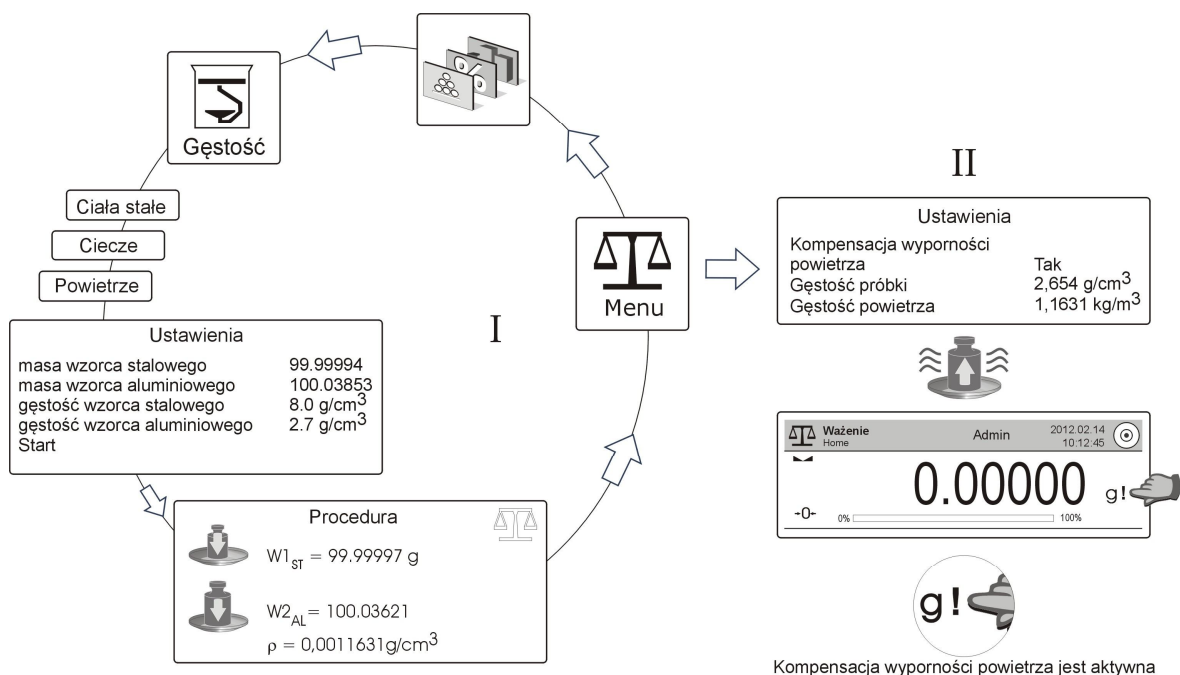
Funkcja Korygująca siłę wyporu wymaga informacji o aktualnej gęstości powietrza oraz o gęstości ważonej próbki. Na podstawie tych danych wyznaczany jest współczynnik korygujący. Podczas pomiaru mamy zatem udział tylko siły grawitacyjnej zgodnie z zależnością:

$$F = m \cdot g$$

W wagach produkcji RADWAG serii 2Y wykorzystywane są dwie metody korekcji siły wyporu. Poniżej omówiona jest ich zasada działania oraz zależności jakie pomiędzy nimi zachodzą.

5.1. Metoda 1 półautomatyczna z zastosowaniem wzorców masy

Jest metodą dwuetapową w której należy wyznaczyć gęstość powietrza poprzez ważenie dwóch wzorców (stalowego i aluminiowego) o takiej samej masie, ale o różnej gęstości. Następnie obliczoną wartość należy wykorzystać w funkcji korekcji wyporności. Schemat postępowania pokazuje poniższy rysunek.



Rys. 11. Kolejność postępowania w Metodzie 1

Ta metoda składa się z trzech zasadniczych elementów, gdzie można poszukiwać ewentualnych przyczyn niedokładności. Pierwszy to informacje dotyczące gęstości wzorców oraz ich mas. Gęstość wzorców powinna być wyznaczona poprzez badanie, wówczas jest ona wiarygodna.

Takie podejście jest konieczne gdyż jest ona wykorzystywana podczas wyliczania gęstości powietrza. Zarówno gęstość jak i masę wzorców

znajdziemy w świadectwie wzorcowania. Oczywiście wzorcowanie powinno wykonać Laboratorium Akredytowane. Dla szczegółowych analiz można szacować wpływ niepewności wyznaczenia tych wartości na końcowy wynik pomiaru.



Zestaw wzorców do wyznaczania gęstości powietrza
(1) – wzorzec aluminiowy, (2) – wzorzec stalowy

Drugi obszar to pomiar masy dwóch wzorców. Przy założeniu, że czułość wagi jest poprawna (działa automatyczna adjustacja) jedyne znaczenie ma powtarzalności wskazań wagi. W wagach RADWAG ten parametr zazwyczaj wynosi 1 działkę elementarną wagi. Gęstość powietrza wyliczana jest z zależności:

$$\rho_a = \frac{\frac{m_{AL} \cdot W_{ST} - m_{ST} \cdot W_{AL}}{m_{AL} \cdot W_{ST}}}{\rho_{AL}} - \frac{\frac{m_{ST} \cdot W_{AL}}{m_{ST} \cdot W_{AL}}}{\rho_{ST}}$$

gdzie:

- m_{AL} - skorygowana masa wzorca aluminiowego
- m_{ST} - skorygowana masa wzorca stalowego
- W_{ST} - wynik ważenia wzorca stalowego
- W_{AL} - wynik ważenia wzorca aluminiowego
- ρ_{AL} - gęstość wzorca aluminiowego (2.7 g/cm³)
- ρ_{ST} - gęstość wzorca stalowego (8.0 g/cm³)

Masę skorygowaną wzorca aluminiowego oraz stalowego wyznacza się wykorzystując poniższe zależności:

$$m_{ST} = M_{ST} \cdot \frac{1 - \frac{1,2 \text{ kg} / \text{m}^3}{8000 \text{ kg} / \text{m}^3}}{1 - \frac{1,2 \text{ kg} / \text{m}^3}{\rho_{ST}}} \qquad m_{AL} = M_{AL} \cdot \frac{1 - \frac{1,2 \text{ kg} / \text{m}^3}{8000 \text{ kg} / \text{m}^3}}{1 - \frac{1,2 \text{ kg} / \text{m}^3}{\rho_{AL}}}$$

gdzie:

- M_{ST} - wynik ważenia stalowej masy referencyjnej
- M_{AL} - wynik ważenia aluminiowej masy referencyjnej

Można przyjąć, że w idealnych warunkach wynik ważenia masy referencyjnej jest równy masie referencyjnej.

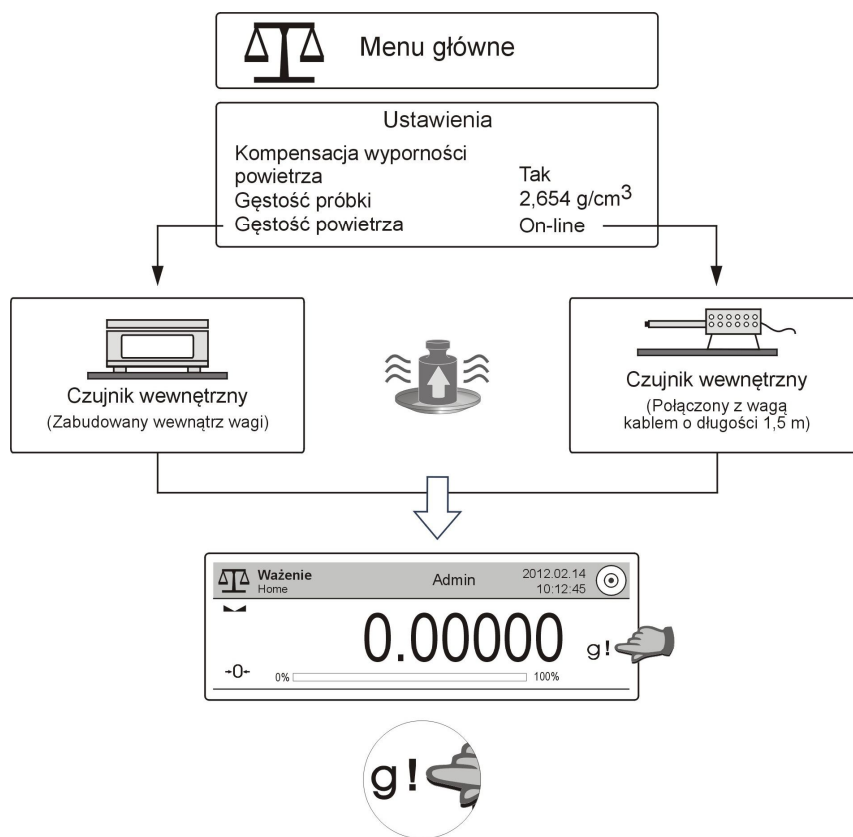
Trzeci obszar to wykorzystanie wyznaczonej gęstości powietrza w funkcji korekcji wyporu. Tu w zasadzie następuje tylko przeliczenie wartości, więc potencjalny błąd można wykluczyć. Analiza metody wyznaczania gęstości nasuwa wniosek, że najważniejszym elementem jest proces ważenia, które decyduje o dokładności tej metody.

5.2. Metoda 2 automatyczna z wykorzystaniem czujników

Rozwiązanie techniczne wykorzystane w tej metodzie jest nowością, działaniem innowacyjnym w konstrukcji wag laboratoryjnych. RADWAG jako pierwszy z producentów wag zastosował elektroniczny pomiar ciśnienia poprzez czujniki zintegrowane z wagą. W tej metodzie jedyną informacją jaka należy podać jest gęstość próbki. Wszystkie inne informacje związane z warunkami środowiskowymi pobierane są automatycznie w trybie on-line. Informacja o temperaturze, wilgotności, ciśnieniu oraz gęstości powietrza może być:

- przesłana z czujników zainstalowanych wewnątrz wagi lub
- pobrana z modułu zewnętrznego THB, moduł zewnętrzny jest mobilnym układem pomiarowym, który podłączamy do portu wagi.

Schemat postępowania pokazuje poniższy rysunek.



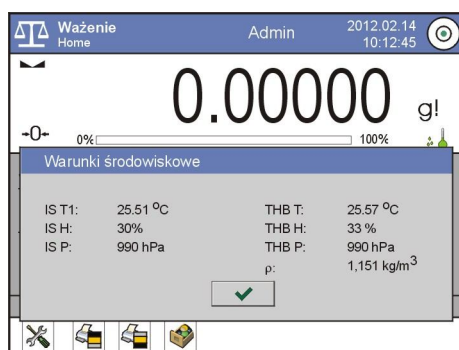
Kompensacja wyporności powietrza jest aktywna

Rys. 12. Kolejność postępowania w Metodzie nr 2

Moduł środowiskowy wagi może obsługiwać zarówno czujniki wewnętrzne jak i czujniki zewnętrzne.

W takim przypadku moduł zewnętrzny można wykorzystywać również do pomiaru temperatury i wilgotności w innej części Laboratorium.

Długość kabla łączącego moduł zewnętrzny z wagą wynosi 1,5 m. Dodatkową zaletą zewnętrznego modułu THB jest możliwość podłączenia go do programu komputerowego. Widok wyświetlacza wagi z aktywnymi czujnikami wewnętrznymi oraz podłączonym zewnętrznym modułem środowiskowym pokazuje poniższy rysunek.



Rys. 13. Wyświetlacz wagi z aktywnym panelem warunków środowiskowych

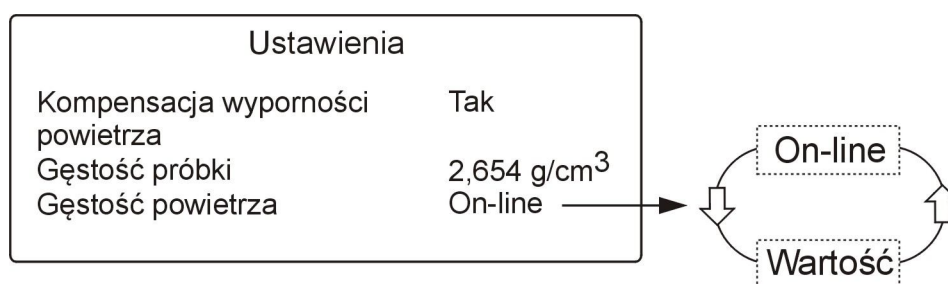
Czujniki wewnętrzne oznaczone są symbolami IS, natomiast czujniki zewnętrzne symbolami THB. Dodatkową informacją jest aktualna gęstość powietrza oznaczona symbolem ρ . Gęstość powietrza jest wyliczana wykorzystując informację z modułu zewnętrznego. W przypadku, gdy nie jest on aktywny, to ta sama informacja jest wyliczana biorąc pod uwagę wskazania czujników wewnętrznych.

Brak połączeń, przewodów, dodatkowych elementów powoduje, że zalecane jest rozwiązanie wykorzystujące tylko czujniki wewnętrzne. Pewnym ograniczeniem jest to, że pomiar odbywa się wewnątrz wagi. Biorąc pod uwagę mobilność, możliwość wykorzystywania z różnymi wagami serii 2Y, pomiar parametrów w otoczeniu wagi to zewnętrzny moduł środowiskowy wydaje się lepszym rozwiązaniem. Jak widać wybór rozwiązania jest zależny od wymagań jakie posiadamy.

Niezależnie od zalet i wad powyższych rozwiązań wagi serii MYA /2Y oraz XA /2Y posiadają w standardzie zainstalowane wewnętrzne czujniki. Nie wyklucza to jednakże możliwości wykorzystania równolegle czujników zewnętrznych. Dla wag serii AS /2Y należy korzystać z czujnika zewnętrznego THB, wagi te nie posiadają zainstalowanych czujników wewnętrznych.

Użytkownik może wyznaczyć współczynnik korygujący wpływ siły wyporu po aktywacji funkcji w następujący sposób:

1. należy podać gęstość próbki, która jest ważona a program wagi znając gęstość powietrza wyliczy poprawkę na wypór powietrza
2. należy podać gęstość próbki, która jest ważona oraz podać gęstość powietrza, program wagi wyliczy poprawkę na wypór powietrza. W tym przypadku informacja o gęstości powietrza może być pobrana z innych źródeł (przyrządy, informacje z stacji meteorologicznych itp.)



Rys. 14. Źródło danych dla odczytu warunków środowiskowych

5.3. Wzorcowanie czujników

W standardowym wykonaniu czujniki temperatury, wilgotności oraz ciśnienia nie są wzorcowane. Na etapie produkcji poprawność ich wskazań jest odnoszona do wskazań wzorcowanych termohigrobarometrów. W przypadku gdy zachodzi konieczność wzorcowania tych czujników to:

- dla czujników wbudowanych (zintegrowanych z wagą) wzorcowanie dotyczy całego obiektu toteż waga powinna być dostarczona do Laboratorium Wzorcującego,
- dla czujników zewnętrznych THB, wzorcowanie może dotyczyć tylko czujnika z tego względu, że wyświetlacz wagi jest tylko panelem informacyjnym. Można zatem otrzymać moduł zewnętrzny wraz ze świadectwem wzorcowania, który wykorzystujemy z różnymi typami wag.

5.4. Wagi z zintegrowanymi czujnikami warunków środowiskowych

Wewnętrzne zintegrowane czujniki temperatury, wilgotności oraz ciśnienia posiadają wagi serii 2Y z działką elementarną 0,1 mg i mniejszą. Odczyt z zewnętrznych czujników ciśnienia wymaga podłączenia do wagi modułu środowiskowego THB-2. Jest on wyposażeniem dodatkowym wag laboratoryjnych.

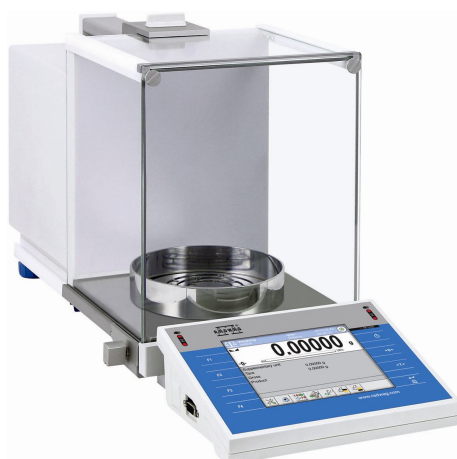


Mikrowaga MYA / 2Y

Parametry techniczne

Max 2 g ÷ 21 g
d = 0,1 µg ÷ 1 µg
e = 1 mg
Interfejs:
2×USB, 2×RS 232,
Ethernet,
2wejścia/2wyjścia

Mikrowagi mają budowę dwuelementową tzn. układ elektroniczny oraz precyzyjny mechaniczny układ pomiarowy znajdują się w osobnych obudowach. Takie rozwiązanie eliminuje głównie wpływ temperatury układu elektronicznego na układ mechaniczny. Mikrowagi poza licznymi aplikacjami posiadają w pełni automatyczną wewnętrzną adiustację. Komora ważenia wykonana jest z antystatycznego szkła. Dwa czujniki podczerwieni są swobodnie programowalne jako jeden z elementów personalizacji wagi.

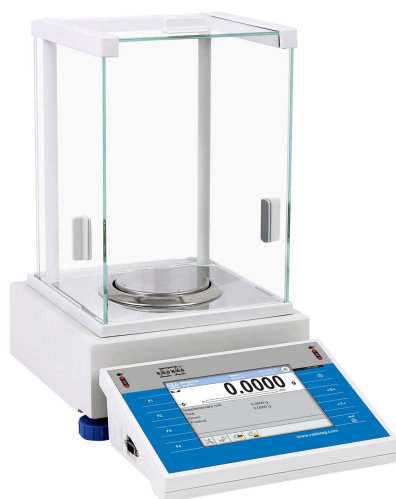


Waga analityczna XA / 2Y

Parametry techniczne

Max 52 g ÷ 310 g
d = 0,01 mg ÷ 0,1 mg
e = 1 mg ÷ 10 mg
Interfejs:
2×USB, RS 232,
Ethernet, 2 wejścia oraz
2wyjścia

Wagi analityczne posiadają dużą komorę ważenia z automatycznie otwieranymi drzwiami. Sterowanie wag XA/2Y realizowane jest za pomocą modułu wagowego z kolorowym 5,7" wyświetlaczem graficznym z panelem dotykowym. Głowica wagi może być umieszczona obok wagi, długość kabla 0,3 m. Automatyczna adiustacja wewnętrzną masą jest standardem dla tych wag.



Parametry techniczne

Max 110 g ÷ 510 g

d = 0,1 mg

e = 10 mg

Interfejs:

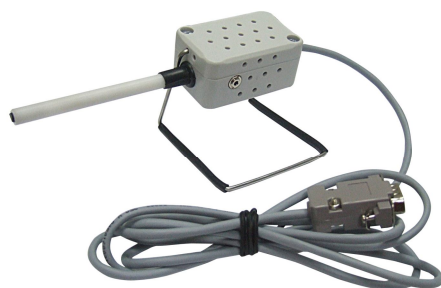
2×USB, RS 232,

Ethernet, 2 wejścia oraz

2 wyjścia

Waga analityczna AS / 2Y

Warunki środowiskowe dla wag serii AS /2Y mogą być nadzorowane tylko poprzez wykorzystanie zewnętrznego modułu środowiskowego THB. Jest to zasadnicza różnica jaka występuje pomiędzy tym typoszeregiem a serią MYA oraz XA. Moduł THB łączymy z wagą poprzez złącze RS 232, informacja o warunkach jest pobierana automatycznie z ich wizualizacją. Wagi serii AS/2Y posiadają w pełni automatyczną adiustację, panel odczytowy jest zainstalowany na elastycznym przewodzie (możliwość postawienia obok wagi)



Parametry techniczne

- Pomiar temperatury
dokładność 0,2°C,
sonda o dł. 95 mm;
- Pomiar wilgotności
dokładność 1,8%;
- Pomiar ciśnienia
dokładność 0,2 hPa
- Długość kabla 1,5 m
- Złącze RS 232 (DB 9)

Zewnętrzny moduł środowiskowy THB

5.5. Porównanie metod

Zasadnicza różnica pomiędzy metodami polega na sposobie wyznaczania gęstości powietrza. Metoda nr 1 wykorzystuje dwa wzorce, które należy zważyć. W tym przypadku pewien wpływ na końcowy wynik gęstości powietrza ma powtarzalność wskazań wagi – mamy podwójne ważenie masy. Wykorzystując własne informacje z pomiarów lub dane producenta można oszacować jaki duży błąd może powstać z tego powodu. Oczywiście zakłada się że podczas pomiarów wzorce masy stawiane są na środku szalki a waga jest wyregulowana pod względem czułości.

Metoda nr 2 wykorzystuje czujniki ciśnienia zainstalowane wewnątrz wagi lub w modułach zewnętrznych. Informacja o ciśnieniu jest więc efektem pomiaru elektronicznego, który następnie jest przetwarzany. W efekcie otrzymujemy gęstość powietrza. To jak dokładny jest ten pomiar zależy od klasy zainstalowanego czujnika ciśnienia. Oczywiście metoda nr 2 jest szybsza i mniej kłopotliwa. Zestawienie tabelaryczne pokazuje bardziej szczegółowe porównanie.

Metoda nr 1	Metoda nr 2
Wykorzystuje wzorce masy do wyznaczenia gęstości powietrza	Wykorzystuje czujniki wewnętrzne lub zewnętrzne do wyznaczenia gęstości powietrza
Procedura dwuetapowa: ważenie wzorców a następnie aktywacja funkcji kompensacji wyporu	Procedura jednoetapowa: Aktywacja funkcji kompensacji wyporu
Konieczność wielokrotnego wyznaczania gęstości powietrza	Praca online (weryfikacja gęstości odbywa się z interwałem min. 1 minuta)
Konieczność posiadania wzorców masy (stalowy oraz aluminiowy)	Nie dotyczy
Wpływ powtarzalności wskazań na pomiar podczas ważenia	Nie dotyczy
Szybkość (konieczność wykorzystania funkcji pośrednich – gęstość powietrza)	Szybkość (natychmiastowe korzystanie z funkcji)

Z porównania metod jednoznacznie wynika, że metoda 2 jest tym rozwiązaniem, które powinno być stosowane. Posiada nowatorskie rozwiązania dzięki którym w znacznym stopniu można skrócić i uprościć wszystkie czynności związane z określaniem poprawnej masy. Jest mniej narażona na błędy operatora związane z procesem ważenia. Eliminuje potencjalny błąd wzorców, który może wystąpić w metodzie nr 1.

6. Podsumowanie

Mechanizmy umożliwiające wskazywania wyników skorygowanych o siłę wyporu nie są powszechnie stosowane, pomimo tego, że możliwości takie istnieją w wagach od dłuższego czasu. Pewnym problemem był jak dotychczas sposób realizacji tej korekcji poprzez wykorzystanie wzorców masy. Procedura dwuetapowa z zasady nie jest atrakcyjna dla większości użytkowników. Nie bez znaczenia był też aspekt ekonomiczny czyli dodatkowy koszt związany z zakupem i utrzymaniem tych wzorców. Inną niezależną kwestią to niewielka ilość publikacji opisujących proces wyznaczania masy skorygowanej.

Poprzez wprowadzanie nowych rozwiązań technicznych do swoich wag RADWAG tworzy przyjazne, ergonomiczne aplikacje wagowe pokazując ich działanie w kontekście występujących zjawisk fizycznych. Poprzez takie działania przekazujemy wiedzę, która odpowiednio zastosowana pozwoli rozwiązywać skutecznie problemy jakie czasami występują podczas pomiarów masy.

Literatura

- [1] EURAMET/cg-18v.02 Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments
- [2] OIML D-28 „Conventional value of the result of weighing In air
- [3] Piotrowska B., Odważniki Przepisy i komentarze, Wydawnictwo ALFA, Warszawa 1986
- [4] OIML R 111-1 Edition 2004 Weights of classes E₁, E₂, F₁, F₂, M₁, M₁₋₂, M₂, M₂₋₃ and M₃, Part 1: Metrological and technical requirements