Przeliczanie jednostek miar ─ proste, a jednak kłopotliwe

Dr hab. inż. Waldemar Magda, prof. nadzw. PG
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Już na samym początku artykułu będzie postawione Czytelnikowi krótkie i wydawałoby się proste pytanie. Który z następujących zapisów momentu siły równego jednemu i dwóm dziesiątym „niutonometra”[1] jest prawidłowy: 10,2, 10,2 Nm, 10.2 Nm, 10.2 N m, 10.2 N·m, 10.2Nm, 10.2N·m, 10,2N m? Odpowiedź brzmi – żaden, a poprawny zapis może mieć jedynie dwie postaci: 10,2 N m lub 10,2 N·m. W tym przypadku poprawność zapisu wartości momentu siły związana jest z trzema istotnymi obowiązującymi w naszym kraju zasadami:

[1] Określenie „niutonometr” zapisano w cudzysłowie, gdyż tak naprawdę oficjalnie nie istnieje tego rodzaju jednostka w układzie SI, a nazwa niutonometr jest nazwą uproszczoną i zwyczajową. Poprawną nazwą jednostki stosowanej w mechanice jest niuton razy metr.

– zasadą pisowni liczb,
– zasadą pisowni jednostek miar,
– zasadą pisowni wartości parametrów mianowanych czyli liczb w połączeniu z jednostką miary.

PISOWNIA LICZB

Zasady pisowni liczb wynikają przede wszystkim z polskiej tradycji typograficznej i edytorskiej. Wobec braku odpowiednich dokumentów prawnych (ustawy, rozporządzenia) jedyną wyrocznią są opinie wybitnych polonistów oraz niekwestionowanych autorytetów w dziedzinie edycji tekstów, takich jak np. Adam Wolański [26]. Według opinii ekspertów językoznawstwa oraz przyjętej w Polsce i innych krajach kontynentalnej Europy konwencji nazewnictwa i zapisu liczb przecinka używa się do oddzielania liczby całkowitej od części ułamkowej w ułamkach dziesiętnych [27]. Kropka natomiast używana bywa, ze względu na ułatwienie czytelności liczby, do rozdzielania grup trzycyfrowych (np. 12.345,67, co oznacza dwanaście tysięcy trzysta czterdzieści pięć i sześćdziesiąt siedem setnych), przy czym trzeba od razu zaznaczyć, że według polskiej konwencji edytorskiej separatorem takim jest spacja nierozdzielająca (12 345,67). W krajach anglosaskich zasada jest odwrotna – kropka jest używana do oddzielenia w liczbie rzeczywistej części całkowitej od ułamkowej, a grupy trzycyfrowe oddziela się przecinkami (12,345.67). Nie poleca się jednak stosowania spacji nierozdzielającej we wzorach oraz liczbach tworzących wartość mianowaną; każdy przyzna, że zapisy a = 0,123 4 b (wzór) oraz c = 98 765 m (wartość mianowana parametru) wyglądają dość dziwnie i mogą być źle zrozumiane. Wiele istotnych i ciekawych zasad pisowni liczb przedstawiono na przykład w pracy [25].

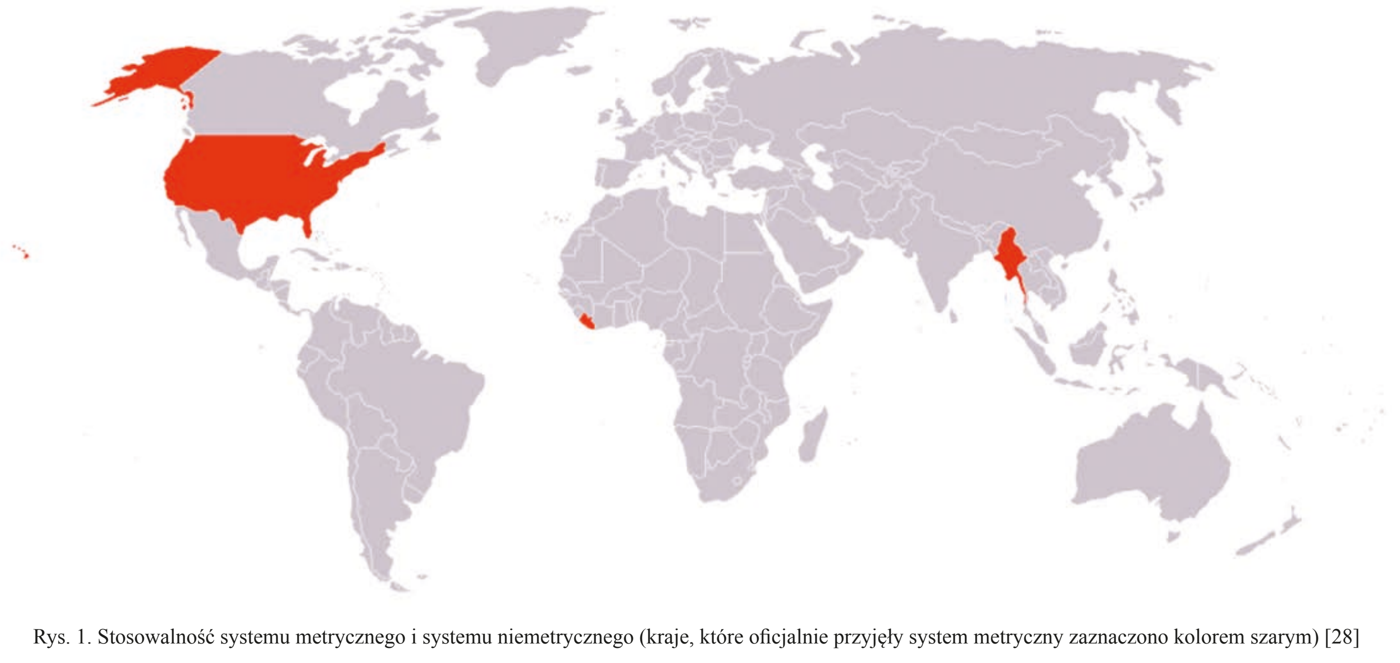
Wiele banków, głównie zagranicznych, funkcjonujących w naszej rzeczywistości od wielu lat próbowało początkowo narzucać usilnie polskim klientom anglosaski sposób zapisu liczb, stosując kropkę jako separator części dziesiętnej. Jednak kilka spektakularnych procesów sądowych „przywołało je do porządku" i dzisiaj nie spotyka się już tego rodzaju dziwacznych, a co najistotniejsze – błędnych w naszej kulturze językowej zapisów. Tylko zwolennicy globalizacji i „europejczycy pełną piersią", dla których snobizm i tak zwany lans są zawsze na pierwszym miejscu, stawiający wyższość norm Międzynarodowej Organizacji Normalizacyjnej (ISO, ang. *International Organization for Standardization*) z siedzibą w Genewie nad polskimi normami językowymi, będą uparcie stawiać kropkę zamiast przecinka. Jednak odrobina prawdziwego (a nie tylko deklarowanego) patriotyzmu połączona z szacunkiem do języka ojczystego (to znaczy polskiego, żeby nie było wątpliwości) i aktywnym przeciwstawianiem się jego kaleczeniu powinna zapobiegać tego rodzaju nagannym praktykom w sposób bierny (zwracając uwagę na spotykane nieprawidłowości językowe) i czynny (pisząc i publikując teksty zgodnie z zasadami przyjętymi i uznanymi za obowiązujące w naszym kraju).

PISOWNIA JEDNOSTEK MIAR

Ludzkość posługuje się jednostkami miar i wag od niepamiętnych czasów. W miarę upływu czasu stworzono różne układy jednostek miar. Obecnie świat jest podzielony na dwie strefy (rys. 1), w których obowiązują:

- Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (fr. *Système International d'unités*), potocznie nazywany układem SI – znormalizowany układ jednostek miar zatwierdzony na XI Generalnej Konferencji Miar w Paryżu w październiku 1960 roku. Układ SI stworzono w oparciu o metryczny system miar.
- Anglosaski (anglosaksoński) układ jednostek miar, obowiązujący oficjalnie jeszcze tylko w trzech krajach naszego globu: Stanach Zjednoczonych, Liberii i Republice Związku Mjanmy (Mjanma, Birma) [23].

Na podstawie Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 23 czerwca 1966 roku w sprawie ustalenia legalnych jednostek miar przyjęto w Polsce Międzynarodowy Układ Jednostek Miar (SI). Od początku nowego milenium obowiązywały w Polsce normy: PN-ISO 31-0:2001 (wersja polska) pt. „Wielkości fizyczne i jednostki miar – Zasady ogólne" oraz PN-ISO 1000:2001 (wersja polska) pt. „Jednostki miar SI i zalecenia do stosowania ich krotności oraz wybranych innych jednostek miar". Polski Komitet Normalizacyjny w dniu 26 lipca 2013 roku wycofał te normy i jednocześnie – bazując na międzynarodowym standardzie ISO/IEC 80000 opisującym i określającym nazwy, symbole i definicje jednostek miar – wprowadził na ich miejsce normę PN-EN ISO 80000-1:2013-07 (wersja angielska) pt. „Wielkości i jednostki – Część 1: Postanowienia ogólne".



Rys. 1. Stosowalność systemu metrycznego i systemu niemetrycznego (kraje, które oficjalnie przyjęły system metryczny zaznaczono kolorem szarym) [28]

Niestety także i Polski Komitet Normalizacyjny nie ustrzegł się negatywnego wpływu wszechobecnej globalizacji i europeizacji naszego życia. Dowodem tego jest właśnie norma PN-EN ISO 80000-1:2013-07 wydana w wersji angielskiej! Jednocześnie należy zauważyć, że wersja polska tej normy w ogóle nie istnieje. Podobnie sprawa ma się z większością pozostałych części tej normy, na przykład PN-EN ISO 80000-4:2013-07 pt. „Wielkości i jednostki miar – Część 4: Mechanika", którą również wydano po angielsku. O dziwo, wyjątkiem jest PN-EN ISO 80000-8:2009 pt. „Wielkości fizyczne i jednostki miar – Część 8: Akustyka", wydana w języku polskim 16 czerwca 2009 roku.

Najwidoczniej POLSKI Komitet Normalizacyjny zapomniał do jakich celów został powołany. POLSKI Komitet Normalizacyjny (PKN), jako POLSKA jednostka normalizacyjna, odpowiadająca za organizację działalności normalizacyjnej w POLSCE, będąca podmiotem prawa publicznego w POLSCE, powinna publikować swoje dokumenty prawne dla POLSKIEGO obywatela i czytelnika przede wszystkim w języku POLSKIM. Oczywiście nie byłoby żadnego problemu, gdyby przedmiotowa norma ukazała się najpierw w swojej podstawowej wersji polskojęzycznej, a następnie w wersji obcojęzycznej. Jednak w tym konkretnym przypadku tak nie jest, gdyż wersji polskojęzycznej w ogóle nie ma, chociaż od dnia publikacji normy w wersji angielskiej minęło już ponad sześć lat. Dla kogo więc jest ta norma? Odpowiedź sama ciśnie się na usta – otóż dla nikogo. Może już pora, aby któraś z instytucji nadrzędnych przyjrzała się działalności wydawniczej PKN. Poza tym wydaje się, że każda dobra kancelaria prawna bez trudu byłaby w stanie zanegować stosowanie w Polsce postanowień zawartych w normie PN-EN ISO 80000-1:2013-07 oraz pozostałych jej częściach wydanej wyłącznie w wersji angielskiej.

Wobec braku polskojęzycznych uregulowań normatywnych dotyczących jednostek miar polskiemu Czytelnikowi pozostaje skorzystanie z innych wartościowych publikacji, na przykład z książki pt. „Legalne jednostki miar i stałe fizyczne", wydanej przez Wydawnictwo Naukowe PWN w 1999 roku [8], a także – podobnie jak w przypadku zasad pisowni liczb – z odpowiednich reguł edytorskich stosowanych przy tworzeniu polskojęzycznych tekstów (głównie artykułów i książek naukowo-technicznych). Zgodnie z podstawową regułą wartość mianowana parametru fizycznego musi zawsze składać się z wartości liczbowej i następującym po niej symbolu jednostki miary. Chociaż reguła ta wydaje się oczywista, to jednak nader często spotykane są sytuacje, w których autorzy publikacji zapominają o stosowaniu symbolu jednostki miary, co – szczególnie z punktu widzenia Czytelnika – należy uznać za wysoce naganne. Druga z reguł dotyczy bezwzględnego pozostawienia spacji pomiędzy liczbą a symbolem jednostki miary. Dla przykładu, prawidłowy zapis długości wynoszącej siedem mil morskich to 7 Mm, a nie 7Mm lub, co gorsze, 7*Mm*. Biorąc pod uwagę dodatkową bardzo istotną zasadę pisowni jednostek miar polegającą na używaniu tylko i wyłącznie zwykłej prostej czcionki tekstowej, zapis 7*Mm* nie oznacza wcale długości, a jedynie działanie matematyczne w postaci mnożenia, którego inną poprawną postacią byłby zapis $7{\cdot}M{\cdot}m$, gdzie M i m oznaczają w tym wypadku pewne parametry.

Powyżej przedstawiono zaledwie kilka drobnych, ale jakże wymownych przykładów możliwych błędnych zapisów wartości mianowanych w układzie SI jednostek miar. Błędy takie, o charakterze czysto formalnym, mogą czasami prowadzić do kuriozalnych sytuacji, a nawet do poważnych błędów konstrukcyjnych w zagadnieniach inżynierskich i nie tylko.

Ryzyko popełnienia błędu zostaje zwielokrotnione, gdy w trakcie rozwiązywania zagadnienia naukowego lub inżynierskiego zachodzi potrzeba skorzystania z dwóch różnych układów jednostek miar, na przykład układu metrycznego (SI) i układu anglosaskiego (anglosaksońskiego, imperialnego). Historię powstania obu układów jednostek miar oraz ich wzajemne interesujące wpływy przedstawiono w bardzo ciekawym artykule [13].

W przypadku „mieszania się" informacji pochodzących z dwóch różnych układów jednostek miar możliwe do popełnienia błędy mogą być wynikiem:

– pomylenia układów jednostek miar,
– nieprawidłowego przeliczenia (konwersji) wartości danego parametru fizycznego z jednego układu jednostek miar na jednostki drugiego układu.

RZECZYWISTE PRZYPADKI AWARII I KATASTROF

Przypadków awarii i katastrof spowodowanych ewidentnymi błędami, wynikającymi z zastosowania niewłaściwego systemu miar i wag lub niepoprawnego współczynnika konwersji pomiędzy dwoma różnymi układami jednostek miar jest wiele [29, 30]. Jednak do najbardziej spektakularnych w skali światowej wydarzeń należy zaliczyć przede wszystkim dwa przypadki związane z:

– lotem samolotu Boeing 767 linii *Air Canada* (tzw. *Gimli Glider* [22, 33],
– lotem sondy NASA *Mars Climate Orbiter* na Marsa [21, 31, 32].

Przypadek 1 – *Gimli Glider*

Samolot Boeing 767-200 linii *Air Canada* 23 lipca 1983 roku odbywał lot rejsowy z Montrealu do Edmonton w Kanadzie. Mniej więcej w połowie lotu, będąc na wysokości 41000 stóp (około 12000 m) kapitan otrzymał ostrzeżenie ze strony czujników dwóch pomp paliwowych o niskim poziomie paliwa. Po krótkiej chwili nastąpiło zatrzymanie pracy obu silników odrzutowych samolotu. Szczęśliwym trafem kapitan samolotu wiedział o pobliskim nieczynnym już lotnisku bazy wojskowej w Gimli (prowincja Manitoba), znajdującym się w odległości około 20 km od aktualnej pozycji samolotu w chwili zasygnalizowania awarii. Schodzenie samolotu z wysokości 12000 m aż do momentu lądowania odbywało się lotem ślizgowym z prędkością 410 km/h i ze względu na ten właśnie fakt oraz miejsce lądowania słynny już wypadek lotniczy nosi nazwę „szybowca z Gimli" (ang. *Gimli Glider*). Zupełny przypadek sprawił, że kapitan samolotu był bardzo doświadczonym pilotem szybowcowym znającym techniki lotu rzadko wykorzystywane w lotach odrzutowych samolotów pasażerskich. W trakcie awaryjnego lądowania samolot przekroczył końcową granicę pasa startowego lotniska w Gimli w wyniku nadmiernej prędkości podejścia do lądowania (około 333 km/h), gdyż awaria obu silników uniemożliwiła użycie klap w celu zredukowania prędkości. Przy

Rys. 2. Samolot „Gimli Glider" po wylądowaniu na płycie nieczynnego już lotniska [34]

ryzykownym lądowaniu zniszczeniu uległo przednie podwozie, a dziób samolotu opadł na płytę lotniska (rys. 2). Z całkowitej liczby 69 osób na pokładzie (61 pasażerów i 8 członków załogi) tylko 10 osób doznało niegroźnych obrażeń, głównie w trakcie ewakuacji.

Jedną z głównych przyczyn katastrofy „szybowca z Gimli" była awaria systemu kontroli lotniskowego procesu tankowania samolotu w Montrealu, co wymusiło wykonanie ręcznych obliczeń potrzebnej ilości paliwa. Niestety do wypadku doszło w czasie, kiedy to w Kanadzie następował proces przechodzenia z anglosaskiego układu jednostek miar na układ metryczny (SI). Samolot Boeing 767-200 dostąpił zaszczytu bycia pierwszym w liniach lotniczych *Air Canada*, którego obsługa wymagała stosowania jednostek układu SI (kilogramów i litrów), zastępując jednostki układu anglosaskiego (funty i galony).

Wymagana do zatankowania w Montrealu ilość paliwa wynosiła 22300 kg. Po przylocie samolotu do Montrealu w zbiornikach paliwowych znajdowało się jeszcze 7682 l paliwa. Znając ciężar właściwy paliwa w danej temperaturze (ρ_p = 0,803 kg/l), w celu obliczenia ilości paliwa wymaganego do dotankowania należało wykonać następujące kroki obliczeniowe:

– 7682 l × 0,803 kg/l = 6169 kg – masa paliwa znajdującego się na pokładzie samolotu przed dotankowaniem,
– 22300 kg – 6169 kg = 16131 kg – masa paliwa wymaganego do dotankowania,
– 16131 kg / 0,803 kg/l = 20088 l – objętość paliwa wymagana do dotankowania.

Niestety załoga bunkrowa zastosowała w obliczeniach przelicznik masy paliwa do jego objętości wyrażony w od lat stosowanych jednostkach układu anglosaskiego, czyli ρ_p = 1,77 lb/l (lb oznacza funt masy), zamiast zalecanego od niedawna przelicznika wyrażonego w jednostkach układu SI czyli ρ_p = 0,803 kg/l. Korzystając z błędnej wartości współczynnika przeliczeniowego, otrzymano następujące wyniki:

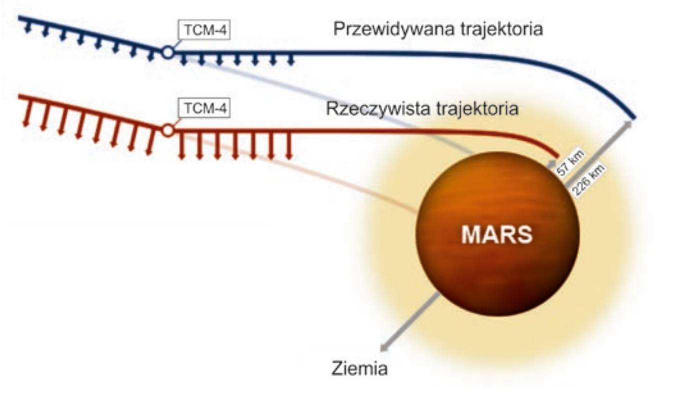
– 7682 l × 1,77 lb/l = 13597 lb – przyjęto złą wartość współczynnika przeliczeniowego, ale wynik obliczeń zinterpretowano według zalecanych dla tego samolotu jednostek układu SI, czyli przyjęto, że na pokładzie znajduje się 13597 kilogramów paliwa,
– 22300 kg – 13597 kg = 8703 kg – masa paliwa wymaganego do dotankowania,
– 8703 kg / 1,77 lb/l = 4917 l·(kg/lb) – objętość paliwa wymagana do dotankowania; przyjęto złą wartość współczynnika przeliczeniowego, ale wynik obliczeń zinterpretowano ponownie według jednostek układu SI, czyli przyjęto, że należy dotankować 4917 litrów paliwa.

Ostatecznie na pokładzie samolotu znalazło się 7682 + 4917 = 12599 litrów paliwa, co w jednostkach masy oznacza 12599 l × 0,803 kg/l = 10117 kilogramów paliwa. Popełniony błąd skutkował zatankowaniem prawie dokładnie dwukrotnie mniejszej masy paliwa względem masy wymaganej dla planowanego lotu (22300 kg). Współczynnik błędu, jaki w tym przypadku popełniono, wynosił w_b = 1,77 / 0,803 ≈ 2,2 lb/kg.

Przypadek 2 – Mars Climate Orbiter

Amerykańska Narodowa Agencja Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej (NASA) wysłała sondę kosmiczną *Mars Climate Orbiter* (MCO) na Marsa 11 grudnia 1998 roku, która była częścią programu *Mars Surveyor '98*, mającego na celu szczegółowe rozpoznanie klimatu, atmosfery oraz powierzchni na Marsie. Sonda ta miała także za zadanie ułatwienie przekazu radiowego kolejnej sondzie *Mars Polar Lander* wysłanej na czerwoną planetę. Koszt całego programu *Mars Surveyor '98* wynosił 328 mln USD. Po 286 dniach lotu, 23 września 1999 roku, sonda miała wejść na optymalną orbitę na wysokości 226 km ponad powierzchnią Marsa. Niestety na podstawie analiz obliczeniowych wykonanych po utracie sondy wykazano, że faktyczna wysokość orbity wynosiła tylko 57 km, co spowodowało, że sonda nie była w stanie utrzymać właściwej orbity i zaczęła spadać w kierunku Marsa (rys. 3). Prawdopodobnie sonda spłonęła w atmosferze Marsa lub ponownie weszła w przestrzeń heliocentryczną.

Misja sondy jest znaczącym przykładem na bardzo kosztowny błąd ludzki wynikający z „pomieszania" dwóch różnych układów jednostek miar, to znaczy układu SI i układu amerykańskiego. Chociaż już od lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia system metryczny (SI) jednostek miar stał się obowiązujący w NASA, to nadal zwykło się tam stosować współczynniki przeliczeniowe (konwersji) z układu metrycznego na układ amerykański.



Rys. 3. Trajektorie lotu (przewidywana i rzeczywista) sondy marsjańskiej Mars Climate Orbiter w końcowej fazie zbliżania do Marsa. Punkt TCM-4 oznacza miejsce rozpoczęcia ostatniego manewru korygującego trajektorię lotu (ang. *Trajectory Correction Maneuver*) [21]

Główną przyczyną katastrofy sondy był karygodny błąd w oprogramowaniu naziemnego systemu kontroli lotu, dostarczonym dla NASA przez firmę *Lockheed Martin Corporation*. Działanie tak zwanego oprogramowania „*Small Force*" powodowało, że wartości parametrów lotu otrzymywano w jednostkach amerykańskiego tradycyjnego układu jednostek miar (ang. *United States customary system*, w skrócie USCS lub USC), co pozostawało w ewidentnej sprzeczności z narzuconą wstępnie w zamówieniu NASA specyfikacji oprogramowania (ang. *Software Interface Specification*, w skrócie SIS). Natomiast użycie pozostałej części oprogramowania, opracowanego tym razem przez NASA, wymagało, aby parametry lotu, wynikające z działania oprogramowania „*Small Force*", były podawane w jednostkach układu metrycznego (SI). Tym samym oprogramowanie *Lockheed Martin Corporation* dostarczało wartości pędu wytworzonego pracą silników manewrowych, niezbędnych do zmiany kierunku lotu sondy, w jednostce funt-siła razy sekunda [$lb_f \cdot s$], podczas gdy oprogramowanie NASA wymagało danych na temat pędu sondy wyrażonych w jednostce niuton razy sekunda [$N \cdot s$]. Ponieważ 1 $lb_f \approx 4{,}448222$ N, współczynnik błędu popełnionego w przypadku sondy *Mars Climate Orbiter* wynosi $w_b \approx 4{,}45$ lb_f/N.

Pozostaje mieć nadzieję, że oprogramowanie 32 myśliwców wielozadaniowych *Lockheed Martin F-35 Lightning II* w wersji F-35A firmy *Lockheed Martin Corporation*, których zakup dla Sił Powietrznych RP jest planowany już wkrótce, będzie kompatybilne z naziemnymi systemami informatycznymi i polscy piloci nie będą zmuszeni do korzystania w trakcie lotu z kalkulatorów kieszonkowych po to, aby bezpiecznie móc dotrzeć do bazy lądowej.

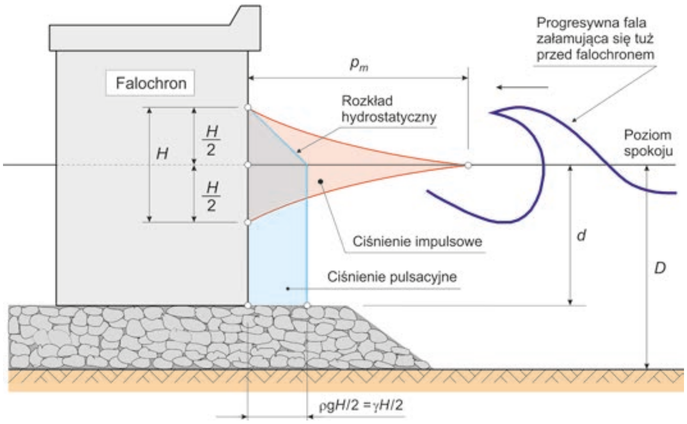
PRZYKŁADY ZACZERPNIĘTE Z INŻYNIERII MORSKIEJ I BRZEGOWEJ

Przykład 1 – Obciążenie impulsowe falochronu skrzyniowego (metoda Minikina)

Minikin [9, 10, 11] opracował metodę projektową określania obciążenia hydrodynamicznego działającego na pionową ścianę falochronu i pochodzącego od uderzenia progresywnej fali w chwili jej załamywania się. Pierwotne rozwiązanie Minikina dotyczyło przypadku falochronu mieszanego w postaci elementu pionowościennego (na przykład prefabrykowanej żelbetowej skrzyni) posadowionego na fundamencie narzutowym wykonanym z narzutu kamiennego (rys. 4).

Maksymalne hydrodynamiczne ciśnienie impulsowe (udarowe) powstałe od uderzenia załamującej się fali w pionowościenną budowlę występuje na poziomie spokoju i jest opisane zależnością, której postać, zawartą w oryginalnej publikacji [11] jako wzór (12), przedstawiono na rys. 5.

Niestety trzeba przyznać, że praca [11] jest napisana w nagannym stylu, biorąc pod uwagę poprawność symboli parametrów fizycznych i ich opisu, a także zapis (a dokładniej rzecz ujmując notoryczny brak zapisu) jednostek miar, w jakich wyrażane są poszczególne parametry fizyczne. Jak wygląda przykładowa legenda wzoru, Czytelnik może się przekonać, analizując fragment książki Minikina przedstawiony na rys. 5. Tego



Rys. 4. Schemat obciążenia falochronu mieszanego (prefabrykowany element pionowościenny posadowiony na fundamencie narzutowym) w wyniku uderzenia załamującej się fali progresywnej w pionową ścianę budowli (metoda Minikina)

D = 22 ft. and d = 12 ft. For full-scale use the peak pressure can then be approximated by —

$$p_m = \frac{2\pi d}{LD}\varrho Hg\left(\frac{D+d}{2}\right) \quad . \quad . \quad . \quad (12)$$

where H = 2h = wave height, trough to crest
L = 2l = wavelength, crest to crest

Equation (12) can be further simplified to —

$$p_m = 2{\cdot}9d\left(1+\frac{d}{D}\right)\frac{H}{L} \text{ tons per square foot} \quad . \quad . \quad (13)$$

Rys. 5. Fragment oryginalnej książki R. R. Minikina pt. „Winds, Waves and Maritime Structures" [11]

rodzaju niefrasobliwość ze strony autora publikacji powoduje, że jakiekolwiek wykorzystanie tej publikacji do dalszych prac staje się bardzo uciążliwe i zwykle jest przyczyną popełniania wielu błędów u osób, które chciałyby wykorzystać tego rodzaju publikację do dalszych analiz i obliczeń.

W celu dalszego łatwiejszego operowania wzorem (12) z rys. 5 wzór ten można przedstawić w uproszczonej postaci:

$$p_m = \frac{2\pi d}{LD}\rho Hg\left(\frac{D+d}{2}\right) = \pi\rho g\frac{Hd}{LD}(D+d) = \pi\rho g Z \qquad (1)$$

w której:

$$Z = \frac{Hd}{LD}(D+d) \qquad (2)$$

gdzie:
p_m – maksymalne ciśnienie impulsowe,
ρ – gęstość wody morskiej,
g – przyspieszenie ziemskie,
H – wysokość fali załamującej się przed falochronem mieszanym,
d – głębokość wody u podnóża pionowościennej skrzyni falochronu mieszanego,
D – głębokość wody u podnóża fundamentu narzutowego falochronu mieszanego,
L – długość fali propagującej na akwenie o głębokości wody D,
Z – długość zastępcza.

W pracy [11], wydanej w Londynie w 1963 roku, autor posłużył się, ogólnie rzecz biorąc, anglosaskimi jednostkami miar. Niestety Minikin w swojej pracy [11] notorycznie nie stosował precyzyjnych legend wzorów wraz z wyraźnym przypisaniem odpowiednich jednostek miar do poszczególnych parametrów występujących we wzorach. Jednak z treści książki można wywnioskować, że takie parametry długości, jak: H, d, L, D (a co za tym idzie także i Z), wyrażono w stopach [ft] (1 ft = 0,3048 m). W konsekwencji można przyjąć, że przyspieszenie ziemskie wyrażono w stopach na sekundę do kwadratu [ft/s^2]. Przyspieszenie ziemskie, g, najczęściej przyjmowane za równe przyspieszeniu ziemskiemu normalnemu, g_n, wynosi w układzie metrycznym $g = g_n$ = 9,80665 m/s^2, co odpowiada przyspieszeniu $g = g_n$ = 32,174049 ft/s^2 w układzie anglosaskim. Znaczenie i oznaczenie sekundy [s] pozostaje oczywiście identyczne bez względu na układ jednostek miar.

W jakich jednostkach wyrażono pozostałe parametry, czyli: p_m i ρ? Aby móc odpowiedzieć na to pytanie, należy najpierw dokładnie rozszyfrować układ jednostek miar, jakim posługiwał się Minikin. Do wyboru są trzy warianty tak zwanego układu FPS (ang. *Foot-Pound-Second*) jednostek miar, a mianowicie [36]:

– brytyjski grawitacyjny (ang. *British Gravitational*) układ jednostek miar (BG), nazywany także technicznym układem jednostek miar; wykorzystuje funta (ang. *pound*) jako podstawową jednostkę siły zamiast jednostki masy, którą jest *slug*; uwaga: często zamiast jednoznacznego symbolu [lb$_f$] lub [lbf] stosowany jest mylący symbol [lb]; najbardziej powszechny układ jednostek miar w Stanach Zjednoczonych,
– angielski inżynierski (ang. *English Engineering*) układ jednostek miar (EE), nazywany także brytyjskim inżynierskim układem jednostek miar, wykorzystujący jednostki funt-masa [lb] (lub [lb$_m$]) i funt-siła [lb$_f$] (lub [lbf]), odpowiednio jako podstawowe jednostki masy i siły; układ rzadko obecnie wykorzystywany w Wielkiej Brytanii, a jedynie w niektórych inżynierskich zagadnieniach w Stanach Zjednoczonych,
– angielski absolutny (ang. *Absolute English*) układ jednostek miar (AE), wykorzystujący jednostkę *poundal* [pdl] jako jednostkę siły oraz funta [lb] jako jednostkę masy.

W celu identyfikacji układu jednostek miar, jakim posługiwał się Minikin, pomocny okazuje się drugi ze wzorów pokazanych na rys. 5 (wzór nr (13)), który jest uproszczeniem wzoru nr (12):

$$p_m = 2{,}9d\left(1+\frac{d}{D}\right)\frac{H}{L} = 2{,}9d\left(\frac{D+d}{D}\right)\frac{H}{L} = \\ = 2{,}9\frac{H}{L}\frac{d}{D}(D+d) = 2{,}9Z \tag{3}$$

gdzie:
p_m – maksymalne ciśnienie impulsowe [ton/ft^2],
Z – długość zastępcza [ft].

Tym razem, jak podał sam autor (patrz wzór (13) na rys. 5), maksymalne ciśnienie impulsowe, p_m, wyrażono w tonach na stopę do kwadratu [ton/ft^2]. Warto w tym miejscu zauważyć, że jest to jednostka ciśnienia, a zatem tonę [ton] należy rozumieć jako tonę-siła [ton-force] (lub [tnf]). Dodatkowo, z racji: brytyjskiej narodowości autora pracy [11], brytyjskiej firmy *Maritime Engineering Consultant* (Bath, Anglia), w której autor pracy [11] był zatrudniony, a także ze względu na publikację pracy [11] w londyńskim wydawnictwie *Griffin*, wydaje się w pełni uzasadnione utożsamianie tony [ton] z tak zwaną toną długą [long_ton], nazywaną także toną angielską, toną brytyjską, toną imperialną, toną wypornościową, toną standardową lub toną waszyngtońską i w celu wyróżnienia zapisywaną często na przykład w postaci [UK_ton]. W przypadku określania masy 1 long_ton = 1016,046909 kg = 1,016047 t , natomiast w przypadku określania siły 1 long_ton = 9,964016 kN.

Zatem, aby uniknąć dwuznaczności, przedmiotową jednostkę ciśnienia należałoby zapisywać w postaci [(long_ton-force)/ft^2]; jest to jednak zapis bardzo rzadko spotykany w literaturze anglojęzycznej i najczęściej jest zastępowany skrótowym zapisem [ton/ft^2], jak to pokazano w legendzie wzoru (3), co niestety może być mylące. Dlatego też na potrzeby materiału prezentowanego w dalszej części niniejszego artykułu w celu zachowania precyzji i jednoznaczności oznaczenia jednostki ciśnienia posłużono się „pełnym" zapisem w wersji anglojęzycznej, czyli [(long_ton-force)/ft^2].

Często zdarza się, że autorzy publikacji zapisując jednostkę siły, używają do tego oznaczenia zarezerwowanego dla jednostki masy, na przykład [lb/ft^2] [20], zamiast poprawnego i jednoznacznego zapisu [lbf/ft^2] lub [lb$_f$/ft^2]. Należy także pamiętać o tym, że w zapisie symbolicznym jednostek miar nie należy stosować liczby mnogiej [35], a zatem [lb] i [ton], a nie [lbs] i [tons], jak to niestety czynią czasami niektórzy autorzy w swoich publikacjach. Jeżeli jednostka zapisana jest nie poprzez skrót (symbol), ale pełnymi słowami (tak jak to zrobił Minikin, pisząc *tons per square foot*), to użycie liczby mnogiej jest jak najbardziej dopuszczalne.

Należy zadać sobie pytanie, w jakim układzie jednostek miar Minikin otrzymał współczynnik liczbowy równy 2,9 we wzorze (2)? Angielski absolutny układ jednostek miar (AE) można od razu odrzucić, gdyż tam siła wyrażona jest w poundalach [pdl]. Jako kolejny, wzięto pod uwagę angielski inżynierski układ jednostek miar (EE). Na str. 61 oryginalnej pracy Minikina [11] zapisano:

$$\rho D = 1{,}17 \text{ ton/ft}^2 \tag{4}$$

dla D = 41,0 ft. Jednostkę [ton/ft^2] należy oczywiście w tym przypadku rozumieć jako [long_ton/ft^2]. Z powyższego równania można obliczyć wykorzystywaną przez Minikina (ale niestety nigdzie nie podaną *explicite*) w pracy [11] wartość gęstości wody:

$$\rho = \frac{1{,}17}{D} = \frac{1{,}17}{41{,}0} = 0{,}028537 \text{ long\_ton/ft}^3 \tag{5}$$

która odpowiada gęstości wody ρ = 1,024 t/m^2 w układzie metrycznym (SI). Nawiasem mówiąc, wartość ta charakteryzuje wodę morską o zasoleniu bliskim średniemu zasoleniu Oceanu Światowego S = 35‰ =3,5% [17]. I tak, przyjmując dalej gęstość wody morskiej równą ρ = 0,028537 long_ton/ft^3 oraz przyspieszenie ziemskie równe przyspieszeniu ziemskiemu normalnemu $g = g_n$ = 32,174049 ft/s^2, a następnie wykonując działanie zawarte we wzorze (1), obliczono:

$$\pi\rho g = 3{,}141593 \cdot 0{,}028537 \cdot 32{,}174049 = \\ = 2{,}884456 \approx 2{,}9 \text{ long\_ton/(ft}^2 \cdot \text{s)} \tag{6}$$

co niezbicie potwierdza fakt stosowania przez Minikina w pracy [11] angielskiego inżynierskiego układu jednostek miar (EE). Gdyby w powyższej analizie przyjąć obowiązywanie brytyjskiego grawitacyjnego układu jednostek miar (BG), który zalicza się do spójnych układów jednostek, to wartość współczynnika liczbowego we wzorze (3) byłaby inna niż 2,9, a mianowicie wynosiłaby 0,09, czyli ważny byłby zapis [1]:

$$p_m = 0{,}0897Z \approx 0{,}09Z \tag{7}$$

gdzie:
p_m – maksymalne ciśnienie impulsowe [long_ton-force/ft²],
Z – długość zastępcza [ft].

Sprawdzenie poprawności wzoru (7) pozostawiono dociekliwości Czytelnika.

Niestety posłużenie się przez Minikina angielskim inżynierskim układem jednostek miar (EE) miało swoje katastrofalne konsekwencje. Prawdopodobnie, gdyby Minikin skorzystał w tym przypadku z jednego z dwóch pozostałych wariantów układu FPS jednostek miar, to problemu w ogóle by nie było. Niestety angielski inżynierski układ jednostek miar (EE) zaliczany jest do układów niespójnych[2]. Posługując się nim, należy pamiętać – o czym Minikin w swoich pracach [9, 11] ewidentnie zapomniał – że zapis drugiego prawa Newtona wymaga użycia dodatkowego współczynnika (różnego od jedności), którego wartość wynosi:

$$g_c = 32{,}174049\ (\mathrm{lb \cdot ft})/(\mathrm{lb_f \cdot s^2}) \tag{8}$$

gdzie:
lb – funt (1 lb = 0,453592 kg),
$\mathrm{lb_f}$ – funt-siła (1 $\mathrm{lb_f}$ = 4,448222 N),
ft – stopa (1 ft = 0,3048 m),
s – sekunda.

Przejście z funtów na tony we wzorze (8) nie wpłynie oczywiście na zmianę wartości liczbowej współczynnika, czyli można również zapisać:

$$g_c = 32{,}174049\ (\mathrm{long\_ton \cdot ft})/(\mathrm{long\_ton\text{-}force \cdot s^2}) \tag{9}$$

Drugie prawo Newtona, zapisane z użyciem angielskiego inżynierskiego układu jednostek miar (EE), powinno być zapisane w postaci:

$$F = \frac{ma}{g_c} \tag{10}$$

gdzie:
F – siła [long_ton-force],
m – masa [long_ton],
a – przyspieszenie [ft/s²],
g_c – współczynnik przeliczeniowy zapewniający spójność wzoru (10) pod względem użytych jednostek miar (g_c = 32,174049 (long_ton·ft)/(long_ton-force·s²)).

Zatem, stosując angielski inżynierski układ jednostek miar (EE), wzór (1) powinien być podany w następującej poprawnej postaci:

$$p_m = \pi \frac{\rho g}{g_c} \frac{Hd}{LD}(D + d) \tag{11}$$

gdzie:
p_m – maksymalne ciśnienie impulsowe [long_ton-force/ft²],
ρ – gęstość wody morskiej [long_ton/ft³],
g – przyspieszenie ziemskie [ft/s²],
g_c – współczynnik przeliczeniowy zapewniający spójność wzoru (11) pod względem użytych jednostek miar (g_c = 32,174049 (long_ton·ft)/(long_ton-force·s²)),
H – wysokość fali załamującej się przed falochronem mieszanym [ft],
d – głębokość wody u podnóża pionowościennej skrzyni falochronu mieszanego [ft],
D – głębokość wody u podnóża fundamentu narzutowego falochronu mieszanego [ft],
L – długość fali propagującej na akwenie o głębokości wody D.

Stosując natomiast jednostki miar układu metrycznego (SI), który jest układem spójnym i nie wymaga zastosowania dodatkowego współczynnika przeliczeniowego, wzór (1) nie zmieni swojej postaci, natomiast zmianie ulegnie legenda wzoru, czyli:

$$p_m = \pi \rho g \frac{Hd}{LD}(D + d) = \pi \gamma \frac{Hd}{LD}(D + d) \tag{12}$$

gdzie:
p_m – maksymalne ciśnienie impulsowe [kN/m²],
ρ – gęstość wody morskiej [t/m³],
g – przyspieszenie ziemskie [m/s²],
γ – ciężar właściwy wody morskiej [kN/m³],
H – wysokość fali załamującej się przed falochronem mieszanym [m],
d – głębokość wody u podnóża pionowościennej skrzyni falochronu mieszanego [m],
D – głębokość wody u podnóża fundamentu narzutowego falochronu mieszanego [m],
L – długość fali propagującej na akwenie o głębokości wody D [m].

Jeżeli pominięty będzie współczynnik g_c we wzorze (11), to wartość obliczona z użyciem tego wzoru będzie błędna i około 32 razy większa od wartości poprawnej. Tym samym, uwzględniając dodatkowo fakt, że πg_c = 101,078 ≈ 101 ft/s², można wykazać błędność tej wersji wzoru na p_m w metodzie Minikina, w której pojawia się współczynnik liczbowy właśnie o wartości 101, czyli [20]:

$$p_m = 101 \rho g \frac{Hd}{LD}(D + d) = 101 \gamma \frac{Hd}{LD}(D + d) \tag{13}$$

z jednostkami miar tak jak we wzorze (12).

Wzór Minikina pod taką błędną postacią był wielokrotnie przytaczany w literaturze światowej, na przykład [3, 14, 19, 20]. Niestety nigdy nie skorygowano tego poważnego błędu i był on powielany także w polskojęzycznej literaturze fachowej, na przykład w pracach [17, 18].

Na domiar złego w pracy [18] niefortunnie zaznaczono, że zastosowanie wzoru Minikina prowadzi do obliczenia maksymalnego ciśnienia hydrodynamicznego p_m, wyrażonego zawsze w jednostce miary [N/m²]. Tu także zbagatelizowano kwestię jednostek miar, zapominając o podstawowej zasadzie, według której jednostka miary obliczanego parametru jest zawsze określona użytymi jednostkami miar pozostałych parametrów występujących w danym wzorze. Jeżeli w pracy [18] narzucono jednostkę miary parametru wynikowego p_m [N/m²], to wypadałoby również podać odpowiednie jednostki miar pozostałych parametrów występujących w przedmiotowym wzorze. Niestety nie uczyniono tego, co może powodować u Czytelnika szereg wątpliwości i być przyczyną błędnych obliczeń. Rozwiązaniu tych wątpliwości na pewno nie służy przykład obliczeniowy (przedstawiony w pracy [18] zaraz po wzorze na p_m), w którym wynik p_m otrzymano tym razem w jednostce miary [kN/m²] ([kPa]), a nie – jak wcześniej próbowano to niesłusznie narzucić – w jednostce miary [N/m²] ([Pa]).

Ciekawe, że pomimo ewidentnej ułomności wzoru (13), wyprowadzonego na podstawie oryginalnego wzoru Minikina (1), w amerykańskim podręczniku *Shore Protection Manual* z roku 1984 [20] metodę Minikina wraz z wzorem (13) jako jedyną zaproponowano projektantom z zakresu inżynierii brzegowej do obliczania obciążenia hydrodynamicznego wywołanego

[2] Układ jednostek miar uważany jest za spójny (jednorodny), jeżeli zależności między jednostkami układu wyrażają się wzorami, w których współczynniki liczbowe są zawsze równe jedności (o ile geometria zagadnienia nie narzuca współczynnika różnego od jedności w postaci stałej matematycznej).

załamującą się falą. Jednocześnie wyraźnie zwrócono uwagę w pracy [20], że wartości sił otrzymywane z metody Minikina są bardzo duże, mogące nawet 18-krotnie przekraczać wartości uzyskiwane w przypadku obciążenia hydrodynamicznego wywołanego falą niezałamaną czyli falą stojącą. Jak podano w pracach [1, 2, 4], poprawność metody Minikina poddano w wątpliwość między innymi ze względu na brak spójności jednostek miar parametrów występujących we wzorze (1). Jednak autorzy wspomnianych prac nie byli w stanie wyjaśnić, na czym dokładnie polegał problem. Ciekawy pozostaje również fakt, że w normie nie innej jak brytyjska *BS 6349-1:1984* [16], opublikowanej w dokładnie tym samym czasie co zalecenia amerykańskie *Shore Protection Manual* [20], zarekomendowano użycie wzoru Minikina w jego oryginalnej postaci wraz z jednostkami układu metrycznego (SI) (patrz wzór (12)), a nie w błędnej postaci ze współczynnikiem liczbowym 101 (patrz wzór (13)). Związane to było prawdopodobnie z końcową fazą trwającej ponad dwieście lat stopniowej metryzacji anglosaskiego układu jednostek miar w Wielkiej Brytanii. Istotne ustawowe zmiany w tym względzie rząd Wielkiej Brytanii przyjął w 1985 roku w postaci ustawy Wagi i Miary (ang. *Weights and Measures Act*). Począwszy od 1 stycznia 2000 roku w Wielkiej Brytanii oficjalnie można używać legalnie tylko takich jednostek układu anglosaskiego, jak [13]:

- mile, yardy, stopy i cale w ruchu drogowym na drogowskazach i znakach drogowych dotyczących prędkości lub odległości,
- pinty do piwa beczkowego lub jabłecznika oraz mleka w opakowaniach zwrotnych,
- akry w aktach rejestracyjnych własności ziemi,
- uncje (ang. *troy ounce*) do transakcji w obrocie metalami szlachetnymi.

Kwestie związane z poprawnością zapisu i stosowania jednostek miar były i niestety są nadal bagatelizowane (trzy przykłady kuriozalnych sytuacji przedstawiono powyżej), co zawsze nieuchronnie prowadzi do powstawania karygodnych błędów, często uniemożliwiających dalszą analizę i stosowanie proponowanych w literaturze wzorów do praktycznych obliczeń projektowych. Jednym z najbardziej typowych przykładów nonszalancji, albo po prostu braku odpowiedniej wiedzy ze strony autorów przeróżnych ,,dziwnych'' wzorów, jest właśnie wzór (13), zaproponowany po raz pierwszy w pracy [20] na podstawie błędnego oryginalnego wzoru Minikina (3). Niestety wielu innych autorów zaadoptowało „na ślepo” wzór (13), nie kusząc się nawet o próbę sprawdzenia jego poprawności, a co za tym idzie – jego przydatności do rozwiązywania istotnych zagadnień z zakresu inżynierii morskiej i brzegowej.

Mały przykład obrazujący powagę problemu konwersji jednostek miar

Transport ropy naftowej i gazu ziemnego ze złóż podmorskich do baz lądowych odbywa się z wykorzystaniem ogromnej flotylli zbiornikowców oraz bardzo rozbudowanej sieci rurociągów podmorskich, w szczególności długich rurociągów przesyłowych (rys. 6). Oczywiście, z racji bogatego doświadczenia i długiej tradycji, większość literatury dotyczącej zagadnień

Rys. 6. Rury wielkośrednicowe, każda o długości 24 m – tak zwane dublety, średnicy wewnętrznej D_z = 1,2192 m (48 cali) i grubości ścianki stalowej t = 38,1 mm (1,5 cala), wykorzystane do budowy gazociągu „Nord Stream”, ułożonego na dnie Morza Bałtyckiego [37]

związanych z morskim przemysłem wydobywczym pochodzi ze Stanów Zjednoczonych. Przykładem są znane i poczytne w kręgu „nafciarzy” miesięczniki *Oil and Gas Journal* oraz *Offshore*. Literatura książkowa jest także bardzo bogata. Przy korzystaniu z tego rodzaju literatury często zachodzi potrzeba posłużenia się pewnymi wzorami, które – w celu ułatwienia częstego z nich korzystania – trzeba „przetłumaczyć” na układ metryczny (SI), czyli inaczej mówiąc, trzeba je zapisać w takiej postaci, w której wszystkie parametry występujące w danym wzorze są wyrażone w jednostkach układu metrycznego (SI).

Jedna z faz projektowania rurociągu podmorskiego dotyczy określenia wymaganej średnicy wewnętrznej rurociągu, tak zwanej średnicy wewnętrznej ekonomicznie uzasadnionej (ang. *economic internal pipe diameter* [12]. Stosując amerykański układ jednostek miar, ekonomicznie uzasadnioną średnicę wewnętrzną ropociągu można obliczyć z następującego praktycznego wzoru [5, 6]:

$$D_e = 0,298 Q^{0,448} S_n^{0,132} \mu_d^{0,025} \tag{14}$$

gdzie:
D_e – ekonomicznie uzasadniona średnica wewnętrzna ropociągu [cale] ([in]),
Q – natężenie przepływu ropy naftowej [(amerykańskie galony na minutę] ([US_gal/min]),
S_n – gęstość względna ropy naftowej w warunkach normalnych [–],
μ_d – współczynnik lepkości dynamicznej ropy naftowej [centypuaz] ([cp]).

W celu wyprowadzenia metrycznej wersji powyższego wzoru „amerykańskiego” należy skorzystać z odpowiednich współczynników przelicznikowych pomiędzy jednostkami układu metrycznego (SI) a jednostkami układu amerykańskiego (US). W przypadku parametrów występujących we wzorze (14) pewną propozycję metrycznych jednostek miar wraz z korelującymi z nimi współczynnikami konwersji przedstawiono w tabl. 1.

Z wartości współczynników konwersji należy korzystać według wzoru:

$$J_{US} = J_{SI} \times w_k \tag{15}$$

gdzie::
J_{US} – jednostka amerykańskiego układu jednostek miar (US),
J_{SI} – jednostka metrycznego układu jednostek miar (SI),
w_k – współczynnik konwersji (bezwymiarowy),

czyli na przykład 1 cal = 0,0254 m (1 in = 0,0254 m).

Tabl. 1. Współczynniki konwersji z układu amerykańskiego (US) na układ metryczny (SI) jednostek miar parametrów występujących we wzorze (13) [3]

Parametr	Układ jednostek miar		Współczynnik konwersji w_k [–]
	Amerykański (US)	Metryczny (SI)	
Średnica wewnętrzna ropociągu D_z	[in]	[m]	0,0254
Natężenie przepływu ropy naftowej Q	[US_gal/min]	[m³/h]	0,2271
Gęstość względna ropy naftowej S_n	[–]	[–]	0,9990
Współczynnik lepkości dynamicznej ropy naftowej m_d	[cp]	[mPa·s]	1

Posiłkując się wzorem „amerykańskim" (14), wzór „metryczny" na ekonomicznie uzasadnioną średnicę wewnętrzną ropociągu można przedstawić w postaci [5, 6]:

$$D_e = XQ^{0,448} S_n^{0,132} \mu_d^{0,025} \tag{16}$$

gdzie:
D_e – ekonomicznie uzasadniona średnica wewnętrzna ropociągu [m],
Q – natężenie przepływu ropy naftowej [m³/h],
S_n – gęstość względna ropy naftowej w warunkach normalnych [–],
μ_d – współczynnik lepkości dynamicznej ropy naftowej [mPa·s].

Zmiana układu jednostek miar nie wpływa oczywiście na wartości potęg przy parametrach Q, S_n i μ_d, gdyż potęgi są związane z przebiegami pewnych funkcji (pewnych zjawisk fizycznych), które zawsze są identyczne bez względu na rozpatrywany układ jednostek miar. Nie ma znaczenia, czy dane zjawisko jest badane w Polsce, czy też w Stanach Zjednoczonych – jego przebieg, jego charakter, jego intensywność będą tu i tam zawsze takie same, jednak pod jednym bardzo istotnym warunkiem, że dane zjawisko będzie przebiegać w identycznych warunkach zewnętrznych – chodzi tu przede wszystkim o zachowanie tych samych wartości temperatury i ciśnienia. Dlatego przebieg wielu zjawisk jest badany w tak zwanych warunkach normalnych, nazywanych także standardowymi. Zwykle warunki normalne są określone przez wartości temperatury normalnej oraz ciśnienia normalnego. W krajach, gdzie obowiązuje metryczny układ jednostek miar, a zatem także i w Polsce, warunki normalne pomiaru określone są przez: ciśnienie normalne p_n = 101,325 kPa oraz temperaturę normalną, która zwykle przybiera wartości z zakresu od t_n = 0°C do t_n = 20°C w zależności od charakteru badanego zjawiska. Parametry cieczy (na przykład ropy naftowej) są zwykle określane dla temperatury normalnej t_n = 4°C. W Stanach Zjednoczonych, gdzie obowiązuje układ anglosaski jednostek miar, ciśnienie normalne ma taką samą wartość, jak w układzie metrycznym, czyli p_n = 14,6959 psi = 101,325 kPa (1 psi = 6,894757 Pa), gdzie psi oznacza jednostkę funt-siła na cal do kwadratu (ang. *pound-force per square inch*). W przypadku temperatury normalnej występuje jednak pewna różnica, gdyż parametry takiej cieczy jak ropa naftowa są określane dla temperatury normalnej t_n = 60°F ≈ 15,56°C ≠ 4°C.

Krótkiego komentarza wymaga wartość współczynnika konwersji gęstości względnej ropy naftowej w warunkach normalnych, S_n, która jest definiowana w następujący sposób [6]:

$$S_n = \frac{\rho_{rn}}{\rho_{wn}} \tag{17}$$

gdzie:
S_n – gęstość względna ropy naftowej w warunkach normalnych (S_n = 1 dla wody) [–],
ρ_{rn} – gęstość ropy naftowej w warunkach normalnych [kg/m³],
ρ_{wn} – gęstość wody w warunkach normalnych [kg/m³].

W przypadku określania gęstości względnej cieczy cieczą porównawczą jest zawsze woda destylowana, czyli „czysta" woda bez żadnych substancji w niej rozpuszczonych lub zawieszonych.

Otóż wydawałoby się, że jeżeli parametr nie jest mianowany, to współczynnik konwersji pomiędzy dwoma dowolnymi układami jednostek miar powinien być zawsze równy jedności. Niestety nie zawsze tak musi być. Jak podano w tabl. 1, współczynnik konwersji dla S_n wynosi 0,9990. Do praktycznych obliczeń można przyjąć zaokrąglenie tej wartości do jedności. Jednak, w przypadku obliczeń o wysokim poziomie dokładności, trzeba zdawać sobie sprawę z tego, że wartość współczynnika konwersji może nieznacznie odbiegać od jedności. Z czego to wynika?

Jest rzeczą oczywistą, że gęstość praktycznie nieściśliwej cieczy, w tym także ropy naftowej, nie zależy od ciśnienia, natomiast jest zależna bezpośrednio od temperatury i składu chemicznego. Istnieją specjalne tablice, nomogramy i wzory umożliwiające określenie gęstości ropy naftowej w dowolnej temperaturze na podstawie znajomości gęstości ropy naftowej w temperaturze normalnej [6]. Niestety warunki normalne pomiaru parametrów ropy naftowej, jak już wspomniano, nie są identyczne dla obu układów jednostek miar, o czym świadczą różne wartości temperatury normalnej. W takiej sytuacji, aby prawidłowo wyznaczyć wartość współczynnika konwersji niemianowanego parametru S_n, wystarczy skorzystać z wzoru [6]:

$$w_k^{(S_n)} = \frac{\rho_{w,\,60}}{\rho_{w,\,4}} \tag{18}$$

gdzie:
$w_k^{(S_n)}$ – współczynnik przeliczeniowy dla gęstości względnej ropy naftowej w temperaturze normalnej [–],
$\rho_{w,\,60}$ – gęstość wody destylowanej w temperaturze normalnej t_n = 60°F ≈ 15,56°C [kg/m³],
$\rho_{w,\,4}$ – gęstość wody destylowanej w temperaturze normalnej t_n = 4°C [kg/m³].

Jeżeli przyjąć, że gęstość wody w temperaturze t = 15,6°C (≈ 15,56°C) wynosi ρ_w = 999,0060 kg/m³ [38], a w temperaturze t = 4°C wynosi ρ_w = 999,9719 kg/m³ [38], to po skorzystaniu z wzoru (18) otrzymuje się wartość współczynnika konwersji $w_k^{(S_n)}$ = 0,9990.

Tak więc z praktycznego punktu widzenia konwersja wzoru „amerykańskiego" (14) do wzoru „metrycznego" polega na znalezieniu nowej wartości współczynnika liczbowego, który we wzorze „metrycznym" (16) enigmatycznie oznaczono literą X. Większość z Czytelników powie – nic trudnego i nawet nie spróbuje samodzielnie poszukać rozwiązania tak postawionego problemu. Zadanie oczywiście jest proste, ale niestety dla wielu osób tylko z pozoru. Aby Czytelnik mógł osobiście przekonać się o trudności manipulacji pomiędzy dwoma różnymi układami jednostek miar, zadanie obliczenia wartości współczynnika liczbowego pozostawiono ciekawości Czytelnika. Autor niniejszego artykułu nie podaje w tym miejscu poprawnej wartości współczynnika liczbowego X, gdyż mogłoby to zniechęcić Czytelnika do podjęcia wyzwania. A chyba warto to zrobić i sprawdzić swoje możliwości, gdyż według statystyki wynikającej z dydaktycznego doświadczenia Autora artykułu tylko jedna osoba na dziesięć jest w stanie rozwiązać to zadanie w pierwszym podejściu. Aby ostatecznie nie pozostawić Czytelnika samemu sobie, rozwiązanie zadania podano po spisie literatury.

PODSUMOWANIE

W artykule poruszono temat poprawności zapisu liczb z częścią dziesiętną, zapisu jednostek miar oraz zapisu wartości mianowanych. Z oczywistych względów skoncentrowano się na układzie metrycznym jednostek miar (SI). Zwrócono uwagę na potrzebę poszanowania podstawowych zasad pisowni w języku polskim, których przestrzeganie pozwala na precyzję i jednoznaczność zapisu. Niestety stosunkowo często zasady te są łamane (głównie chodzi tu o stosowanie kropki zamiast przecinka do oddzielania części dziesiętnej liczby, a także o brak podawania odpowiednich jednostek miar lub o poprawny ich zapis), głównie przez osoby o niskim poziomie wykształcenia, które bardzo często nie mają pojęcia co i o czym piszą. Powszechne błędy w tym zakresie mogą mieć swoje poważne konsekwencje, szczególnie jeżeli popełniane są na etapie projektowania konstrukcji inżynierskich.

Osobną kwestią jest umiejętność posługiwania się wieloma układami jednostek miar, do czego inżynier projektant może być także zmuszony. W artykule opisano dwie bardzo spektakularne pomyłki związane z „balansowaniem" pomiędzy dwoma układami jednostek miar (metrycznym i anglosaskim) popełnione w inżynierii lotniczej i kosmicznej, które spowodowały bezpośrednie zagrożenie życia ludzi oraz doprowadziły do poważnych strat materialnych. Przedstawiono także legendarny już przykład pomyłki przy przeliczaniu jednostek miar, zaczerpnięty z inżynierii brzegowej, a dotyczący tak zwanego wzoru Minikina na maksymalne ciśnienie impulsowe w wyniku obciążenia falochronu pionowościennego załamującą się falą. Autor niniejszego artykułu, jako pierwszy, dokładnie wyjaśnił źródło pomyłki Minikina oraz wielu dalszych pomyłek popełnianych przez autorów wykorzystujących w swoich pracach błędny wzór Minikina.

Na koniec artykułu zaproponowano Czytelnikowi zadanie rachunkowe związane z wzorem na ekonomicznie uzasadnioną średnicę wewnętrzną ropociągu podmorskiego. Zamierzeniem Autora artykułu było przede wszystkim uzmysłowienie Czytelnikowi, że kwestia konwersji pomiędzy dwoma różnymi układami jednostek miar jest sprawą stosunkowo prostą, jednak pod warunkiem uruchomienia przez Czytelnika pewnej dociekliwości popartej zdolnościami logicznego myślenia.

Przedstawione w artykule informacje mają za zadanie uczulić polskiego Czytelnika na treści przekazywane w naukowej literaturze anglojęzycznej, szczególnie tej trochę starszej, w której wykorzystywane są różne warianty tak zwanego układu FPS (ang. *Foot-Pound-Second*) jednostek miar.

LITERATURA

1. Bullock G., Obhari C., Müller G., Wolters G., Peregrine H., Bredmose H.: Characteristics and design implications of breaking wave impacts. Proc. of the 29th International Coastal Engineering Conference, 19–24 September 2004, National Civil Engineering Laboratory, Lisbon, Portugal, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 4, 3966-3978.

2. Cuomo G., Allsop W., Bruce T., Pearson J.: Breaking wave loads at vertical seawalls and breakwaters. Coastal Engineering, Vol. 57, No. 4, April 2010, 424-439.

3. Kamphuis J. W.: Introduction to Coastal Engineering and Management, Advanced Series on Ocean Engineering – Vol. 16, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2000.

4. Kisacik D., Van Bogaert P., Troch P.: Comparative study on breaking wave forces on vertical walls with cantilever surfaces. Proc. of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Beijing, China, 20–25 June 2010, Vol. 3, 888-894.

5. Magda W.: Stateczność rurociągu zagłębionego w dnie morskim i poddanego oddziaływaniu falowania. Studia i Materiały, Zeszyt nr 2, Katedra Budownictwa Morskiego, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1987.

6. Magda W.: Rurociągi podmorskie. Zasady projektowania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.

7. Mani J. S.: Coastal Hydrodynamics, PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2012.

8. Massalski J. M., Studnicki J.: Legalne jednostki miar i stałe fizyczne, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1999.

9. Minikin R. R.: Winds, Waves and Maritime Structures: Studies in Harbor Making and in the Protection of Coasts, Griffin, London, 1950.

10. Minikin R. R.: Breaking waves: A comment on the Genoa breakwater. Dock and Harbour Authority, London, 1955, 164-165.

11. Minikin R. R.: Winds, Waves and Maritime Structures: Studies in Harbor Making and in the Protection of Coasts, 2nd edition, Griffin, London, 1963.

12. Nolte C. B.: Optimum Pipe Size Selection, Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.

13. Norwisz J., Sokolski W.: Anglosaski system jednostek miar we współczesnym świecie. Energetyka, Numer 5 (599), Rocznik 57, maj 2004, 255-263.

14. Tsinker G. P.: Port Engineering. Planning, Construction, Maintenance, and Security, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.

Opracowania zbiorowe:

15. Coastal Engineering Manual, EM 1110-2-1100 (Part II), Chapter 4: Surf Zone Hydrodynamics, 31 July 2003 (Change 1), Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC.

16. Maritime structures – Part 1: General criteria, British Standard, BS 6349-1:1984, British Standards Institution, 1984.

17. Morskie budowle hydrotechniczne. Zalecenia do projektowania i wykonywania Z 1 – Z 45, Zespół Roboczy Zasad Projektowania Budowli Morskich, wydanie IV, Fundacja Promocji Przemysłu Okrętowego i Gospodarki Morskiej, Gdańsk 2006.

18. Poradnik hydrotechnika. Obciążenia budowli hydrotechnicznych wywołane przez środowiski morskie, pod redakcją S. Massela, Wydawnictwo Morskie, Gdańsk, 1992.

19. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways (EAU 1996), 7th English Edition, English Translation of the 9th German Edition, Issued by the Committee for Waterfront Structures of the Society for Harbour Engineering and the German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Ernst & Sohn, Berlin 2000.

20. Shore Protection Manual, Part II, Chapter 7: Structural design – physical factors, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, 1984.

21. Lost in translation. System Failure Case Studies, NASA Safety Center (NSC), National Aeronautics and Space Administration (NASA), Vol. 3, Issue 5, August 2009, 1-4.

Strony internetowe:

22. Bellows A.: The Gimli Glider, Damn Interesting, November 2007, https://www.damninteresting.com/the-gimli-glider/ (data dostępu 12 września 2019 r.)

23. https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/appendix/appendix-g.html (data dostępu 12 września 2019 r.)

24. https://sjp.pwn.pl/poradnia/haslo/;10574.html (data dostępu 12 września 2019 r.)

25. http://lukaszrokicki.pl/2011/01/17/separatory-w-zapisie-liczb/ (data dostępu 12 września 2019 r.)

26. https://pl.wikipedia.org/wiki/Adam_Wolański_(filolog) (data dostępu 12 września 2019 r.)

27. https://pl.wikipedia.org/wiki/Separator_dziesiętny (data dostępu 12 września 2019 r.)

28. https://pl.wikipedia.org/wiki/Układ_SI (data dostępu 12 września 2019 r.)

29. https://usma.org/unit-mixups (data dostępu 12 września 2019 r.)

30. http://mentalfloss.com/article/25845/quick-6-six-unit-conversion-disasters (data dostępu 12 września 2019 r.)

31. https://www.simscale.com/blog/2017/12/nasa-mars-climate-orbiter-metric/ (data dostępu 12 września 2019 r.)

32. https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_Climate_Orbiter (data dostępu 12 września 2019 r.)

33. https://en.wikipedia.org/wiki/Gimli_Glider (data dostępu 12 września 2019 r.)

34. https://worldairphotography.wordpress.com/2017/02/14/the-story-about-air-canada-flight-174-the-gimli-glider/ (data dostępu 12 września 2019 r.)

35. https://english.stackexchange.com/questions/113142/correct-usage-of-lbs-as-in-pounds-of-weight (data dostępu 12 września 2019 r.)

36. https://en.wikipedia.org/wiki/Foot-pound-second_system (data dostępu 12 września 2019 r.)

37. https://www.offshore-technology.com/projects/nord-stream-2-pipeline/ (data dostępu 12 września 2019 r.)

38. https://pl.wikibooks.org/wiki/Aneks/Gęstość_wody_dla_temperatur_0...40°C (data dostępu 12 września 2019 r.)

Rozwiązanie przykładu obliczeniowego: X = 0,0147 [6].