

## Redefinicja nieunikniona

Adam Żeberkiewicz (Gabinet Prezesa, GUM)

O historii kilograma, o tym, dlaczego świat odchodzi od materialnego wzorca jednostki masy, o redefinicji tej jednostki i o możliwych tego konsekwencjach rozmawiamy z Wojciechem Wiśniewskim, kierownikiem Laboratorium Masy, opiekunem państwowego wzorca jednostki masy – prototypu kilograma nr 51.

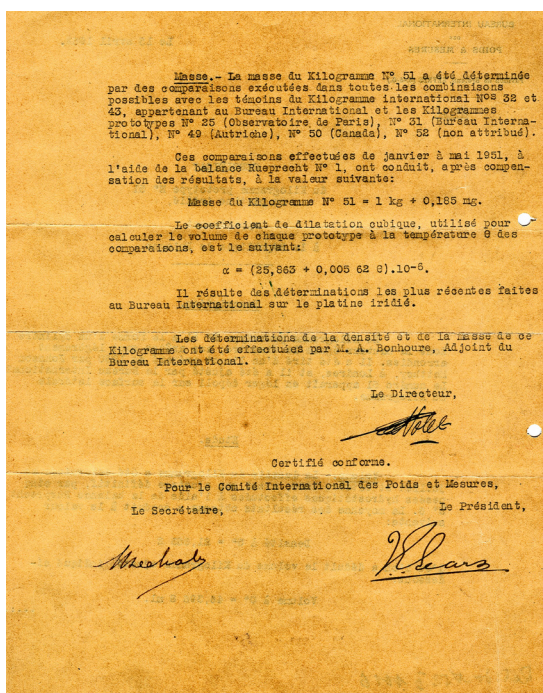
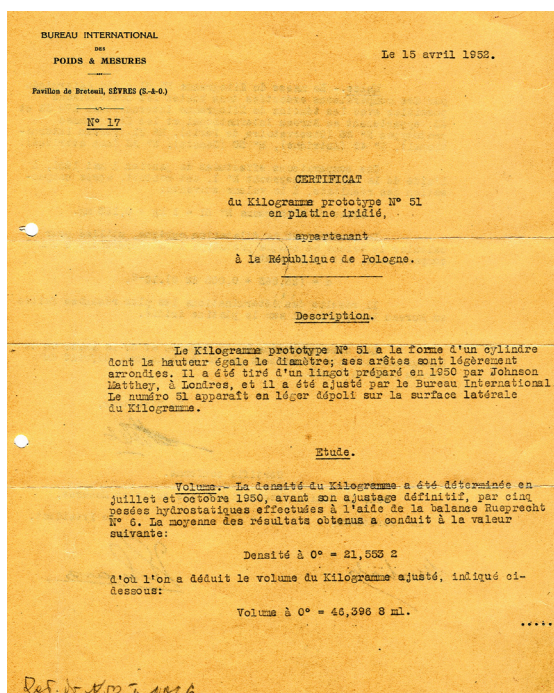
This article describes the history of the Polish measurement standard of mass – prototype of kilogram No 51. This article informs the readers how the international metrology is preparing to the redefinition of this measurement standard and what changes are expected in this field. The Bulletin “Metrology and Hallmarking” interview with Wojciech Wiśniewski – Head of Mass Laboratory, measurement standard of mass supervisor.

**Adam Żeberkiewicz:** – *Na czym polegają obowiązki opiekuna wzorca? To formalna nomenklatura czy potoczne określenie?*

Wojciech Wiśniewski: – Jak najbardziej formalna nazwa. Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 30 stycznia 2003 r. w sprawie uznawania wzorców jednostek miar za państwowe wzorce jednostek miar wymaga, aby było takie stanowisko. W GUM jest 15 opiekunów wzorców

państwowych. Dokumentacja państwowego wzorca masy również zawiera taką rubrykę z nazwiskiem opiekuna. Mówiąc konkretniej – jest to wskazanie odpowiedzialności od strony technicznej. Osobą odpowiedzialną za całe mienie zakładu jest oczywiście dyrektor, a opiekun czuwa nad tym, aby ten wzorzec... był.

– *Był? Ale, żeby wzorzec był i nie zmieniał za bardzo swojej wagi, trzeba też o niego dbać. W jaki sposób?*



Certyfikat prototypu wzorca masy 1 kg Nr 51

fol. arch. własne



Wzorce kopie 1 kg

fot. arch. własne

– Najlepiej, jeśli go się nie używa. Idealnie byłoby, gdyby wyjmować wzorzec tylko raz – do porównania ze wzorcem pierwotnym, znajdującym się w Sèvres. Na co dzień posługujemy się kopiami kilograma. Mamy dwie kopie podstawowe i dziesięć roboczych. Powinno się je porównywać raz na 15 lat. Kilogram „państwowy” porównujemy do „francuskiego” raz na 30 lat. Niestety nasze kopie nie mają tak stabilnej masy, dlatego prototyp musimy wyjmować częściej i w ten sposób odnosić do niego kopie. Są porównania na poziomie międzynarodowym i wtedy też trzeba kilogram wyjąć z sejfu. Mniej więcej raz na cztery lata wyjmujemy go i zanosimy do stanowiska pomiarowego. Żeby umieścić wzorzec w komparatorze, trzeba mieć pewną rękę. Jest do tego jeden upoważniony pracownik.

– **Państwowy wzorzec kilograma stoi schowany w sejfie. Co jeszcze możemy powiedzieć o warunkach, w jakich jest przechowywany?**

– Kilogram stoi pod dwoma kloszami, w szafie pancernej, ogniotrwałej, ale warunki w niej są bardzo zbliżone do tych, jakie mamy w laboratorium. Powinny być one przede wszystkim stabilne. Dlatego kilogram jest ulokowany w pomieszczeniu o ograniczonym dostępie i z monitoringiem warunków środowiskowych. Szczególnie ważna jest odpowiednia gęstość powietrza.

– **Jak obecny wzorzec kilograma trafił do Polski i do Głównego Urzędu Miar?**

– Zaczniemy od tego, że aby stworzyć wzorzec pierwotny i pozostałe wzorce wtórne, wyprodukowa-

no pręt platyno-irydowy, pocięto go na kawałki w przybliżeniu 39-milimetrowe, każdemu nadano numer i rozesłano po świecie. Tych kawałków wyprodukowano więcej i część zostawiono w magazynie. Jako ciekawostkę podam, że kiedy dwadzieścia dwa lata temu nastąpił podział Czechosłowacji, Czesi otrzymali nowy kilogram, a Słowacy wzięli czechosłowacki. Nasz kilogram ma, jak wiadomo, numer 51.

– **Dlaczego akurat 51? Czy ma to związek z kolejnością przekazywania tych egzemplarzy do poszczególnych państw albo z rokiem jego zakupu przez Polskę?**

– Nie. Ten numer to absolutny przypadek. Oryginał z Sèvres ma 6 kopii i każda ma nadany jakiś numer. Ale on nic nie znaczy. Rzeczywiście, egzemplarz kilograma został zakupiony w 1951 r., a w następnym roku, po porównaniu z wzorcem pierwotnym, przyjechał do Polski. Mamy tutaj nawet świadectwo wzorca.

– **Z tego świadectwa możemy wyczytać, że wzorzec kosztował wówczas 80 tys. zł. To było zapewne sporo pieniędzy...**

– Zapewne tak, chociaż nie potrafię powiedzieć, jaka była wtedy średnia pensja albo ile kosztował np. samochód.

– **A jaką wartość wzorzec ma dzisiaj?**

– Kilkaset tysięcy zł. To jest oczywiście szacunkowe wyliczenie, bo gdybyśmy chcieli kupić wzorzec, to nie wiemy, ile by kosztował. Jest to koszt kilograma platyny plus koszt wytworzenia wzorca. W skrócie: to wartość materiału, z którego wzorzec został wykonany, pomnożona przez koszt wykonania.

Oceniając wartość użytkową, wzorzec jest bezcenny. Opiera się na nim cała metrologia masy w Polsce i na Litwie. Wszystkie wzorce i wagi, jakie są w tych krajach, odnoszą się do tego kilograma. Gdyby trzeba było go odtworzyć – np. wziąć nowy kilogram, to będziemy mieli do czynienia z nowym wzorcem i nową spójnością pomiarową. Byłoby to zadanie na kilka lat, a kosztów nie da się tak naprawdę oszacować.

– **Wspomniał Pan o Litwie. Nasi sąsiedzi nie mają swojego kilograma?**



– Nie wszystkie kraje europejskie mają wzorzec kilograma, np. Litwini korzystają z naszego. „Pożyczanie” wzorca to zresztą spotykana praktyka. Kilka innych państw, zwłaszcza tych, które powstały w wyniku rozpadów ZSRR i Jugosławii, również tak robi.

– *Jak wiadomo, samego wzorca nie wyjmujemy za każdym razem, istnieją bowiem kopie kilograma i wzorce odniesienia, do których porównujemy wzorce niższej dokładności. Proszę opowiedzieć, jak wygląda taka piramida spójności pomiarowej.*

– Jest to zorganizowane w sposób hierarchiczny, a używając porównania historycznego – nawet w sposób feudalny. Na górze jest kilogram – „faraon”, stojący w Sèvres. Następnie w poszczególnych krajach są wzorce państwowe, a dalej wzorce odniesienia i wzorce niższego rzędu. Najistotniejsze, żeby od wzorca materialnego przekazać jednostkę masy w dół. Do tego potrzebne jest stanowisko pomiarowe, które zapewni odpowiednią dokładność. Chodzi też o powiązanie wzorca krajowego z jednostką SI na poziomie międzynarodowym i zapewnienie dostępu do tej jednostki wszystkim zainteresowanym w kraju.

Ostatnie porównanie z wzorcem francuskim było w latach 90. W sumie były więc tylko dwa (drugie w 1951 r.). Porównania odbywają się wtedy, kiedy BIPM je zarządzi, nie można tak po prostu wystąpić z prośbą o przeprowadzenie wzorcowania. Wiemy już, że do porównania w takiej formie, z tym wzorcem, który nadal obowiązuje, na pewno nie dojdzie. Ale porównania wzorców państwowych będą się odbywać.

– *Czy to prawda, że wzorzec francuski „chudnie”?*

– Można na to patrzeć dwojako – albo wzorzec francuski „chudnie”, albo inne wzorce państwowe „tyją”. Tak naprawdę tego nie wiemy. Musimy przyjąć jakieś odniesienie, a tym odniesieniem jest zało-



Wojciech Wiśniewski, opiekun państwowego wzorca jednostki masy – prototypu kg nr 51  
fot. arch. własne

żenie, że wzorzec francuski ma zawsze i dokładnie kilogram. Ta sytuacja leży u podstaw zmiany definicji kilograma, bo wiadomo, że jego masa się zmienia i nie wynosi dokładnie kilogram, chociaż musimy zakładać, że jest niezmienna. A stałe fizyczne, choć mogą być niewymierne, to jednak są stałe. Dzięki planowanej redefinicji zyskujemy stałe odniesienie, podczas gdy wzorzec materialny nie jest constans, nawet jeśli zakładamy, że jest.

– *Czy kilogram się czyści?*

– Tak, ale to się robi w Sèvres, a nie w Głównym Urzędzie Miar. Istnieje określona procedura, jak należy czyścić wzorce. Czyści się sprzężonym powietrzem, pod odpowiednim kątem i w odpowiedniej odległości. Mimo przechowywania kilograma w warunkach laboratoryjnych, w powietrzu jest wilgoć, kurz i to wszystko reaguje z powierzchnią wzorca. Wskutek tej reakcji masa wzorca się zmienia. Dopiero, kiedy wzorzec przejdzie procedurę czyszczenia, to znowu waży kilogram. Tę samą procedurę, w tym samym czasie, pokonują wszystkie państwowe wzorce.

W trakcie, kiedy nasz państwowy kilogram znajduje się w Sèvres, posługujemy się jego kopiami. Wracając jeszcze do porównań międzynarodowych, to trwają one długo, więc kilogram przebywa tam 2–3 lata. W trakcie tych operacji wyciągany jest wzorzec oraz kopie kilograma i wszystkie porównuje się między

sobą. Dzięki tym porównaniom wiemy, jak przez lata zmienia się masa kilograma. Jest nawet specjalny algorytm na przyrost masy. Każdego miesiąca ten przyrost jest inny. Tegoroczny listopad był 256. miesiącem od ostatniego porównania w latach 90. W styczniu każdego roku wyznaczana jest następna poprawka wyliczenia kilograma.

**– Jakie jest odchylenie od kilograma w skali miesiąca?**

– Co miesiąc przybywa między 1 a 3 dziesięciotysięcznych kilograma, czyli 0,1 mikrograma. Przedstawię to bardziej obrazowo: siarka na zapalce ma ok. 10 miligramów, gdyby pokroić ją na 10 tys. kawałeczków, to jeden taki kawałek waży tyle, o ile zmienia się masa kilograma w ciągu miesiąca.

**– Z punktu widzenia naszych wyobrażeń o masie to raczej niedużo...**

– Z punktu widzenia użytkownika wagi w przemyśle to również jest niedużo. W 1993 r. nasz wzorzec miał kilogram i 227 mikrogramów, teraz ma kilogram i 287,1 mikrograma. Za miesiąc będzie o 0,02 mikrograma cięższy.

**– Dlaczego w ogóle redefiniujemy jednostkę masy? Co zyskujemy?**

– O pierwszym argumencie i przewadze stałych fizycznych nad wzorcem materialnym już mówiłem. Wzorzec masy jest jednym z ostatnich artefaktów materialnych (jest jeszcze wzorzec gęstości). Pozostałe wzorce są niematerialne i realizuje się je na stanowiskach pomiarowych od stałych fizycznych. Ważne jest, że uniezależniamy cały system od artefaktu, który stoi w Sèvres. A świat idzie do przodu. Od 1889 r., kiedy wzorzec powstał, minęło 125 lat, były dwie wojny światowe, wynaleziona została bomba atomowa, człowiek poleciał w kosmos, a wzorzec masy przez ten czas się nie zmienił. Ogromny postęp cywilizacyjny i techniczny, jaki dokonał się przez te lata stanowi drugi argument za tym, żeby jednostkę masy jednak zmienić.

**– Przejdźmy teraz do samych koncepcji redefinicji kilograma. Jest ich kilka...**

– Tak, dokładnie liczą się dwie. Każda oparta na innej stałej fizycznej. Jest koncepcja redefinicji na podstawie stałej Plancka. I ona jest liderem rankingu. Druga koncepcja jest oparta na stałej Avogadra.

Redefinicją zajmuje się Komitet Doradczy ds. Masy i Wielkości Pochodnych przy Międzynarodowym Biurze Miar (CCM). Jestem przedstawicielem GUM w tym Komitecie. Omawia się tam wyniki, a na ich podstawie jest opracowywany dokument w postaci rekomendacji, którą decydenci biorą pod uwagę lub nie. Sama decyzja zostanie podjęta na Generalnej Konferencji Miar, jednak trudno powiedzieć, kiedy to nastąpi. Może na którejś konferencji w 2017 r. albo w 2018 r.

Definicja oparta na stałej Plancka jest związana z wagą wata. Przy czym, waga wata sama w sobie nie stanowi realizacji jednostki. Waga równoramienna jest znana od starożytności, gdybyśmy mieli ją opisać w największym uproszczeniu, to na jednym jej ramieniu stoi wzorzec materialny, a drugie ramię jest równoważone przez siły elektromagnetyczne. Dzięki odpowiedniemu równaniu matematycznemu, od stałych fizycznych związanych z energią elektryczną można przejść do wielkości fizycznych masy. Nie wystarczy jednak mieć wagę wata, żeby mieć wzorzec kilograma. Na wadze trzeba porównywać zespół wzorców, których ma być 12 lub 16. Jednym z tych wzorców będzie obecny francuski wzorzec kilograma. Tak więc nie zniknie on z systemu metrologii masy. Nie będzie jedynym wzorcem, ale będzie wzorcem podstawowym.

**– Z tego, co pan mówi, można wnioskować, że redefinicja pociągnie za sobą duże koszty.**

– Zgadza się, z 12 wzorców 4 mają być platynowy-irydowe, 4 stalowe i 4 krzemowe. I być może kolejne 4 będą z jeszcze innego stopu. Prace nad nim trwają, jeśli zostanie przyjęty, to będzie 16 wzorców. Każdy z nich będzie podzielony na zestawy. Jedne wzorce będą przechowywane i porównywane w powietrzu. 3 następne w próżni, 3 kolejne w argonie, a 4 inne w azocie. Wszystkie one będą porównywane na wadze wata w cyklu stałym, który ma się zamykać w ciągu 12 miesięcy. Dopiero do tego zestawu można odnieść nasz państwowy wzorzec kilograma. A ten zestaw wzorców wraz z wagą wata stanowić będą praktyczną realizację nowej definicji – dodajmy – bardzo

drogiej definicji, na którą stać będzie tylko nielicznych, najbogatszych.

– **A jak będzie to wyglądało w poszczególnych NMI's, w tym w GUM?**

– Właśnie o to chodzi, że u nas nic się nie zmieni. NMI's będą miały swoje państwowe kilogramy. Jeden pierwotny artefakt w Sèvres zostanie zastąpiony wielkim systemem metrologicznym, a więc wagą wata i zestawem wzorców oraz systemem porównań. To będzie praca ciągła.

Jest kilka NMI's, które chcą uczestniczyć w pierwotnej realizacji kilograma. W tej chwili trwają porównania, przy czym różnica między dwoma najlepszymi nie może odbiegać od  $2 \times 10^{-8}$  kilograma. Bardzo trudno spełnić taki warunek. Najlepszy wynik ma być potwierdzony przy pomocy projektu realizowanego w PTB w oparciu o stałą Avogadra. To sprawdzenie nie może się różnić od  $5 \times 10^{-8}$  kilograma. Jest to warunek trudny do spełnienia i dlatego wdrożenie kilograma opartego na nowej definicji się przeciąga.

– **Co możemy powiedzieć o redefinicji w oparciu o stałą Avogadra?**

– Byłaby to realizacja przy pomocy kuli krzemowej. Rozwiązanie jest sprawdzane w PTB. Podstawowe dane już mamy: wiemy, ile powinno być atomów w monokryształe krzemu, żeby ważył on kilogram.

– **To rozwiązanie byłoby chyba prostsze?**

– Niewątpliwie tak, gdyby nie fakt, że trudno jest wykonać taki monokryształ bez zanieczyszczeń. Tak, żeby był jednorodny.

– **A jaka będzie dokładność?**

– Tutaj ujawnia się pewien mankament, bo dokładność będzie dużo mniejsza. Jeśli sprawdzimy świadectwo wzorca państwowego, to niepewność standardowa wynosi tam 2,3 mikrograma. To jest niepewność, z jaką polski kilogram został odniesiony do wzorca pierwotnego. Po redefinicji niepewność wzrośnie 10 do 15 razy. Jeśli zmienimy definicję jednostki, nasz kilogram będzie miał niepewność 20 do 30 mikrogramów. To problem dla wszystkich laboratoriów, bo żeby zachować poziom dokładności CMC

(czyli pomiarów, które teraz wykonujemy) musimy tę jednostkę od kopii kilograma do wzorców najwyższego rzędu przekazywać 10 razy dokładniej. Potrzebny jest więc bardzo dobry sprzęt. Żeby przygotować się do redefinicji, która jest już nieodwołalna, potrzeba ok. 4 mln zł.

– **Czy mniejsza dokładność będzie miała wpływ na pomiary w przemyśle?**

– Jeśli będziemy dysponować dobrym sprzętem, to nie. Wyzwaniem dla wszystkich NMI's będzie zachowanie tej dokładności na dotychczasowym poziomie. To będzie też nowy rodzaj spójności pomiarowej. Proces wdrożenia nowej jednostki w kraju, czyli przekazania jej w dół do użytkowników, zajmie 2-3 lata. Pomimo, że czeka nas dużo pracy, to użytkownicy tego nie odczują.

Pomiar masy kojarzy się wszystkim z odważnikiem. Odważnik jest materialnym wzorcem masy i nim pozostanie, ale sam w sobie jest bezużyteczny. Potrzebne jest odpowiednie wyposażenie laboratorium, czyli właściwy komparator masy, przy pomocy którego można tę jednostkę masy przekazać do wzorca niższego rzędu. Jest wiele rodzajów komparatorów, każdy ma swój zakres pomiarowy i każdy – niestety – jest bardzo drogi.

– **Iloza komparatorami dysponuje teraz GUM?**

– Kilkunastoma, od miligramowych aż po 1000-kilogramowy. Komparatory mają dużo większą rozdzielczość niż najlepsze wagi, z których korzystają użytkownicy. Dlatego są takie cenne i ważne dla naszego laboratorium. Najtańszy komparator kosztuje 100 tys. zł, najdroższy 4 mln zł i takiego właśnie będziemy potrzebować.

– **Czy będzie można porównywać obecny – fizyczny wzorzec kilograma z nowym – niematerialnym wzorcem?**

– Oczywiście. Przy praktycznej realizacji wzorce materialne i tak będą miały znaczenie. Kilogram będzie porównywany z innymi wzorcami, a te z kolei będą porównywane między sobą. Taka jest istota międzynarodowych porównań i znaczenie każdego NMI.

– **Dziękuję za rozmowę.**