



XII OLIMPIADA FIZYCZNA

(1962/1963)

ZAWODY III STOPNIA

CZĘŚĆ TEORETYCZNA

Zadanie teoretyczne – T3, problemowe

Nazwa – Opis zjawisk zachodzących w zamkniętej U-rurce z wodą i rtęcią w stanie nieważkości.

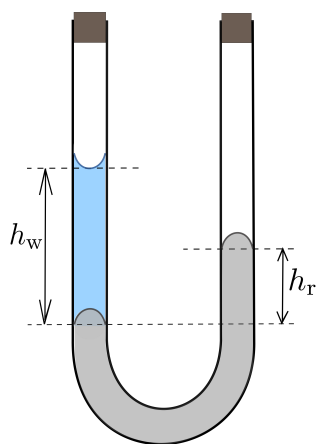
Źródła – Komitet Główny Olimpiady Fizycznej

– Czesław Ścisłowski¹, *Fizyka w Szkole* nr 5, 1963, s. 32

– Piotr Halfter², *Olimpiady fizyczne XI i XII*, PZWS, Warszawa 1966, s. 159–165

– T.M. Molenda, IF US, www.OF.szc.pl.

Do rurki w kształcie litery U nalano do jednego ramienia wody, a do drugiego rtęci³. Po ustaleniu równowagi otwory szczelnie zamknięto (rys. 1). Jakie zmiany zajdą w rurce w przypadku, gdy znajdzie się ona w stanie nieważkości? Odpowiedź uzasadnij. Rozpatrz też przypadek, gdy zamykanie otworów rurki odbywało się w takich warunkach, że ciśnienie powietrza w ramionach rurki można pominąć.



Rys. 1 (⁴)

¹ Dr Czesław Ścisłowski pełnił funkcję Kierownika Olimpiady Fizycznej od VIII OF do XVII OF, w tym okresie był autorem artykułów w *Fizyce w Szkole* z OF, książki *Olimpiady Fizyczne XVII i XVIII* (przyp. red.).

² Piotr Halfter był członkiem KGOF od I OF do XXIV OF (przyp. red.).

³ Rtęć uznawana jest za jeden z najbardziej toksycznych pierwiastków stanowiących zagrożenie nie tylko dla środowiska naturalnego, ale również zdrowia ludzkiego. W temperaturze pokojowej jest lotna i działa toksycznie na układ oddechowy i nerwowy. Rtęci nie wolno stosować w większości nowych produktów konsumenckich. Termometry i inne urządzenia pomiarowe zawierające rtęć zostały wycofane z produkcji i sprzedaży w 2009 roku. (przyp. red.)

⁴ Rys. ten i następny zostały na nowo wykonane i uzupełnione przy opracowaniu zad. do bazy zadań w KGOF (przyp. red.).

Rozwiązanie zadania T3 – XII OF, III stopień, część teoretyczna

Zakładamy, że szczelne zamykanie otworów rurek szklanych zostało dokonane w sposób, który nie spowodował zmiany ciśnienia powietrza znajdującego się w jednym i drugim ramieniu rurki. Można to uzyskać na przykład przez zasklepienie zwężonych wylotów rurek.

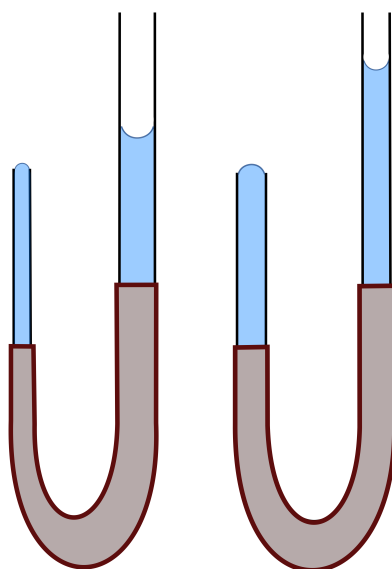
Przyjmujemy więc, że ciśnienie powietrza nad wodą i nad rtęcią jest jednakowe, równe ciśnieniu atmosferycznemu, które panowało w otoczeniu w chwili zamykania rurek. Oznaczmy je literą b .

Ciśnienia wywierane przez słupy wody i rtęci na poziomej powierzchni zetknięcia obu cieczy zależą od ciężarów właściwych tych cieczy d_w i d_r oraz od wysokości słupów cieczy h_w i h_r . Zakładamy przy tym, że temperatura otoczenia jest stała.

Na powierzchnię swobodną wody wywiera również ciśnienie para nasycona wody p_w , zaś na powierzchnię rtęci — para nasycona rtęci p_r . Para nasycona jest w równowadze dynamicznej ze swą cieczą. Ciśnienie pary nasyconej nad cieczą zależy (w stałej temperaturze) od promienia krzywizny menisku cieczy. W przypadku menisku wklęsłego (jak wody) ciśnienie pary maleje ze zmniejszaniem promienia krzywizny, zaś w przypadku menisku wypukłego (jak w rtęci) ciśnienie pary nasyconej rośnie wraz ze zmniejszaniem promienia krzywizny menisku.

Od kształtu menisku, czyli od promienia krzywizny, a więc i od średnicy rurki zależy ciśnienie panujące wewnątrz słupa cieczy, zwane ciśnieniem wewnętrznym. W przypadku menisku wklęsłego ciśnienie wewnętrzne jest mniejsze, w przypadku menisku wypukłego ciśnienie wewnętrzne jest większe niż wówczas, gdy powierzchnia swobodna jest płaska (promień krzywizny jest bardzo duży).

O zależności ciśnienia wewnętrznego cieczy od kształtu menisku i jego promienia krzywizny można łatwo się przekonać w sposób następujący. Łączymy dwie rurki o różnych – oraz dwie rurki o jednakowych średnicach kanału za pomocą wężyka gumowego – jak na rysunku 2.



Rys. 2

Jeżeli użyjemy dwóch jednakowych rurek na przykład o średnicy 2 mm ($r = 1$ mm) i jedną z nich będziemy podnosili, to stwierdzimy, że woda z drugiej rurki zaczyna się wylewać dopiero wtedy, gdy menisk wklęsły w rurce pierwszej okaże się na poziomie wyższym o prawie 14 mm. Zanim nastąpi wypływ wody powstaje nad wylotem menisk wypukły o kształcie zbliżonym do półkuli.

Spełnia się przy tym równanie

$$\frac{2\delta}{r} = \rho gh,$$

gdzie δ – napięcie powierzchniowe wody, r – promień kanału rurki, ρ – gęstość wody, g – przyspieszenie ziemskie, h – różnica poziomów cieczy w rurkach. Oznacza to, że pod meniskiem wypukłym ciśnienie cieczy jest większe niż pod wklęsłym.

Jeśli zwiększymy średnicę podnoszonej rurki, to promień krzywizny jej menisku wzrośnie. Powtarzając poprzednie doświadczenie stwierdzimy, że różnica poziomów cieczy w rurkach maleje (w chwili, gdy ciecz zaczyna wypływać z rurki wąskiej). Na przykład:

*przy średnicy rurki 4 mm różnica poziomów około 8 mm,
przy średnicy rurki 6 mm różnica poziomów około 6 mm.*

Wynika stąd, że wraz ze wzrostem promienia krzywizny menisku wklęsłego ciśnienie wewnętrzne cieczy pod tym meniskiem maleje.

Oznaczmy ciśnienie wewnętrzne wody literą k_w , rtęci – literą k_r . Symbol k_w zaopatrzymy znakiem minus, zaś k_r – znakiem plus. Różnica poziomów cieczy znajdujących się w naczyniach połączonych zależy od wymienionych wyżej czynników. Warunkiem równowagi jest więc spełnienie równości:

$$b + p_w - k_w + h_w d_w = b + p_r + k_r + h_r d_r. \quad (1)$$

Z chwilą, gdy naczynia połączone znajdują się w stanie nieważkości niektóre czynniki warunkujące równowagę ulegną zmianie. Przede wszystkim skutek nieważkości cieczy nie może być mowy o ciśnieniu hydrostatycznym. Natomiast ciśnienie wywierane przez powietrze pozostaje bez zmiany, bowiem ruch cząsteczek w dalszym ciągu trwa, a temperatura jest stała. Trwa też w dalszym ciągu stan równowagi dynamicznej pary i jej cieczy. Ponieważ żadne siły zewnętrzne nie działają na ciecze, należy oczekiwać zmiany ich powierzchni swobodnych. Zanim przejdziemy do dalszych rozważań musimy zaznaczyć, że zjawiska, które obserwujemy na Ziemi (w polu sił ciężkości) tylko w tak zwanych kapilarach, czyli rurkach o promieniu przekroju mniejszym od jednego milimetra, dochodzą do skutku w warunkach nieważkości również w naczyniach o średnicy wielokrotnie większej.

Rozważmy dla ilustracji jeden przykład. Siła grawitacyjna na Księżycu jest, jak wiadomo, około 6 razy mniejsza niż na Ziemi. Zatem przyspieszenie księżycowe jest około 6 razy mniejsze niż ziemskie. Jeżeli w równaniu:

$$\frac{2\delta}{r} = \rho gh$$

zastąpimy g wielkością 6 razy mniejszą, to równanie będzie spełnione gdy równocześnie zwiększymy promień rurki sześciokrotnie.

Wobec tego w warunkach nieważkości rtęć powinna uzyskać kształt jak najbardziej zbliżony do kuli o możliwie małym promieniu krzywizny. (Zależy to też od rozmiarów naczynia). Wówczas ciśnienie pary nasyconej rtęci p'_r będzie większe niż poprzednio

$$p'_r > p_r.$$

Również wzrośnie ciśnienie wewnętrzne rtęci tak, że

$$k'_r > k_r.$$

Wystąpią również zmiany w kształcie menisku wody, promień krzywizny menisku wklęsłego wody zmniejszy się. Powinno to spowodować zmniejszenie ciśnienia pary nasyconej wody oraz zwiększenie ciśnienia wewnętrznego wody. Tak więc

$$p'_w < p_w \text{ oraz } k'_w > k_w.$$

Powierzchnia zetknięcia wody z rtęcią nie ulegnie wyraźnej zmianie, bowiem, jak wykazał Quincke, czysta woda zawsze rozplywa się po powierzchni czystej rtęci.

Wskutek oddziaływania wzajemnego cząsteczek wody i szkła wodą będzie rozplywała się po powierzchni szkła tworząc warstwę zamykającą powietrze, które znajdowało się nad wodą.

Tu konieczna jest pewna informacja.

Kosmonauta radziecki Paweł Popowicz przeprowadził podczas lotu kosmicznego obserwację zachowania się wody w kolbie szklanej. Kolba nie była całkowicie wypełniona wodą. Nad wodą znajdowało się powietrze. Przed startem kolba została zamknięta. W stanie nieważkości woda zaczęła się „rozplywać“ po wewnętrznej powierzchni kolby tworząc grubą warstwę równomiernie przylegającą do szkła. Ta warstwa wody zamykała w sobie powietrze w kształcie niewielkiej kuli. Powierzchnia swobodna cieczy zwiększyła się 2,5 raza. Wzrosła energia powierzchniowa cieczy.

Przypuszczamy więc, że w przypadku naszych naczyń połączonych siły wzajemnego oddziaływania cząsteczek wody i szkła spowodują „rozpełzanie się“ wody po ściankach rurki, zamykając bańkę powietrzną. Ciśnienie panujące w bańce powietrznej utworzonej w wodzie jest odwrotnie proporcjonalne do promienia bańki i wprost proporcjonalne do napięcia powierzchniowego wody. Z tego wynika, że ciśnienie powietrza otoczonego warstwą wody prawdopodobnie ulegnie zmianie, to znaczy będzie inne niż b ⁽⁵⁾. Jeśli idzie o ciśnienie powietrza i pary znajdującej się nad rtęcią w drugiej rurce, to zmiana może być spowodowana zwiększeniem ciśnienia pary nasyconej rtęci ze względu na zmniejszenie promienia krzywizny rtęci w stanie nieważkości.

Tak więc składniki sumy w lewej i w prawej części równania 1 ulegną zmianie. Równowaga nastąpi jeśli

$$b' + p'_w - k'_w = b'' + p'_r + k'_r.$$

Czy nastąpi przepływ cieczy z jednej rurki do drugiej? Zależy to przede wszystkim od rozmiarów naczyń oraz od ilości znajdujących się w nich cieczy i od temperatury w jakiej rzecz się dzieje. Jeżeli zamykanie otworów rurek odbywa się w takich warunkach, że ciśnienie powietrza w otoczeniu jest znikomo małe, to w warunkach równowagi nie figuruje składnik b . Nad wodą i rtęcią znajduje się tylko para nasycona wody i rtęci. Warunek równowagi przedstawia się wówczas w postaci

$$p_w - k_w + h_w d_w = p_r + k_r + h_r d_r.$$

Musimy oczywiście pamiętać o tym, że ciśnienie pary rtęci w normalnych warunkach jest bardzo małe nawet w porównaniu z ciśnieniem pary nasyconej wody, które również jest niewielkie. Wobec tego głównym czynnikiem decydującym o warunkach równowagi będzie ciśnienie hydrostatyczne wody i rtęci. W stanie nieważkości stan równowagi będzie uwarunkowany jedynie ciśnieniem pary nasyconej wody i rtęci oraz ciśnieniem wewnętrznym panującym w słupach jednej i drugiej cieczy.

Podobnie jak w poprzednio rozważonym przypadku siły przylegania wody i szkła spowodują rozplywanie się wody po wewnętrznej powierzchni rurki zawierającej wodę. Powstanie warstwa

⁵ Ponieważ nastąpi znaczne zwiększenie powierzchni wody, wzrośnie energia powierzchniowa cieczy. Przy braku dopływu ciepła z zewnątrz powinno nastąpić obniżenie temperatury warstwy wody, a więc i powietrza otoczonego wodą. Spowoduje to zmniejszenie ciśnienia powietrza i pary nasyconej znajdującej się w bańce.

wody otaczająca bańkę zawierającą parę nasyconą wody. Ciśnienie wewnętrzne wody zmniejszy się, rtęci wzrośnie, bowiem nieunikniona jest zmiana kształtu menisków jednej i drugiej cieczy. Równowaga nastąpi jeśli:

$$p'_w - k'_w = p'_r + k_r.$$

Wszelkie przesunięcie cieczy z jednej rurki do drugiej pociągnie za sobą natychmiast częściową kondensację pary nasyconej w jednej rurce i równoczesne odparowanie pewnej ilości cieczy w drugiej. W tym przypadku dużą rolę odegrać powinna temperatura, od niej bowiem zależy ciśnienie pary nasyconej. Jak i w poprzednim przypadku przebieg zmian będzie zależał od rozmiarów rurek oraz ilości cieczy.

Prowadzone obecnie badania właściwości substancji w warunkach nieważkości przyczynią się w niedalekiej przyszłości do wyjaśnienia wielu nasuwających się wątpliwości.