

Nurkujący USS Barometer

Nurek Shayne Pemberton z Richardson, Teksas, wygłupiał się w swoim stawie dla żółwi. Napełnił słoik wodą, podniósł zamkniętym końcem powyżej powierzchni stawu i do słoika wpłynęła ryba. Pobudziło to go do myślenia. Co by było, gdyby słoik miał 10 stóp (3 metry) średnicy, 60 stóp (18 m) długości i napełniony był wodą morską? Załóżmy, że otwarty koniec byłby pod wodą, a zamknięty powyżej poziomu morza. Jakie ciśnienie panowałoby w słoju na poziomie morza? Co mogłoby zdarzyć się, gdyby do takiego słoja wpłynął nurek?

Słoik z wodą wysoki na 18 metrów zachowuje się tak, jak barometr rtęciowy używany do pomiaru ciśnienia atmosferycznego. Rzeczywisty barometr jest szklaną rurką o średnicy około ćwierć cala (6,35 mm), wypełnioną rtęcią z otwartym końcem odwróconym do niewielkiego zbiornika z rtęcią (patrz Rysunek1).

Rtęć w górnym końcu rurki opada od jej uszczelnionego wierzchołka o około cal (25,4 mm) i zawieszają się na wysokości około 30 cali (760 mm) powyżej powierzchni zbiornika z rtęcią. Długość kolumny stanowi ekwiwalent ciśnienia - atmosferycznego lub barometrycznego jak kto woli - 14, 7 funta na cal kwadratowy (psi) (1,034 kg/cm²). * Jeżeli w pobliżu przechodzi burza lub barometr zostanie przewieziony w góry (to jest to, co „filozofowie przyrodnicy” czynili w XVII wieku), wysokość kolumny rtęci opada w miarę spadku ciśnienia barometrycznego.

Kolumna rtęci utrzymuje się powyżej zbiornika z rtęcią, ponieważ ciśnienie atmosferyczne na powierzchnię zbiornika wypycha ją do rurki. „Pusta” przestrzeń nad rtęcią w rzeczywistości jest wypełniona jej parami.

Aby zilustrować ten punkt, mógłbyś wykonać barometr z wodą morską zamiast rtęci (unikaj fizycznego kontaktu z rtęcią, gdyż jest ona toksyczna).

Jeżeli zamknięty koniec wypełnionej morską wodą rurki byłby stopniowo podnoszony powyżej poziomu morza, pozostałby całkowicie wypełniony wodą, aż do osiągnięcia wysokości 33 stóp (10 m). Powyżej tej wysokości, woda morska byłaby ściągana w dół od końca rurki, zawisłaby na wysokości 33 stóp (10 m) i nie podnosiłaby się dalej, bez względu na to, jak wysoko podnoszony byłby koniec rurki. Jeżeli rurka byłaby wystarczająco wielka do nurkowania, nurek zauważyłby, że ciśnienie zmniejszałoby się, w miarę, jak się on lub ona wynurza.

Działa to dokładnie tak samo, jak w barometrze rtęciowym, z tym wyjątkiem, że cieczą jest woda. Faktycznie, barometry ze słodką wodą były wykonywane, lecz zamiast wysokości 30 cali miały one wysokość 34 stóp (11 m) - 34 stopy słodkiej wody = ciśnieniu 1 atmosfery = 30 calom (760 mm) rtęci = 33 stopom wody morskiej. Pusta przestrzeń nad wierzchem kolumny jest w rzeczywistości parą wodną pod ciśnieniem 0,05 atmosfery absolutnej (ata).

Pompa ssąca

Barometr wodny i pompa ssąca mają wiele wspólnego. Jeżeli w barometrze otworzysz przestrzeń na cieczą do atmosfery, woda opadnie do poziomu morza. Teraz zamknij tę przestrzeń i przy pomocy pompy ssącej wywołaj podciśnienie, aby wciągnąć wodę z powrotem do rurki. Woda podniesie się do wysokości 33 stóp i zatrzyma. W studni ze słodką wodą niemożliwe jest wypompowanie wody z głębokości większej niż 34 stopy, z tej samej przyczyny, dla której woda w barometrze na słodką wodę nie podniesie się powyżej 34 stóp - więcej na ten temat powiemy później.

Nurkowanie na wysokości

Co stało się z rybą, która wpłynęła do słoika w stawie dla żółwi Shayne Pembertona i co mogłoby stać się z nurkiem w barometrze wodnym? Po pierwsze, musimy pamiętać, że ciśnienie na poziomie morza, przy dnie

kolumny wody wynosi 1 ata, a ciśnienie w wolnej przestrzeni nad wodą, na wysokości 33 stóp – 0,05 ata (ciśnienie pary wodnej). Gdyby nurek wpłynął do kolumny wody na wysokość 16,5 stopy (5 m), absolutne ciśnienie opadłoby do połowy atmosfery absolutnej (0,5 ata), ekwiwalentu ciśnienia barometrycznego na wysokości 18 000 stóp (5486 m).

Gdyby nurek wpłynął na wysokość 24 stóp (7 m), ciśnienie opadłoby do 0,3 ata, ekwiwalentu wysokości 30 000 stóp (9144 m). Szczyt Mt. Everest ma wysokość około 29 000 stóp (8839 m), a w skafanderze kosmicznym astronauty panuje ciśnienie będące ekwiwalentem wysokości 30 300 stóp (9235 m).

Nurek ten znajduje się w sztucznym świecie z dwoma bardzo nieprawdopodobnymi problemami związanymi z nurkowaniem. Po pierwsze, nurek oddychający powietrzem na 24 stopach kolumny wody utraci przytomność z powodu niewystarczającej ilości tlenu (hypoxia), ponieważ ciśnienie cząstkowe tlenu na wysokości 30 000 stóp wynosi tylko 0,06 atm lub ekwiwalent 6 procent wartości na poziomie morza. W celu uniknięcia niedotlenienia, skafander kosmiczny astronauty jest wypełniony czystym tlenem.

Po drugie, u nurka rozwinię się obezwładnienie lub fatalna wysokościowa choroba dekompresyjna (DCS), gdyż azot rozpuszczony w jego lub jej tkankach przekształci się w pęcherzyki. W celu uniknięcia DCS, zanim poddani będą dekompresji do ciśnienia skafandra kosmicznego, astronauta oddychają czystym tlenem do czterech godzin na poziomie morza, w celu wyeliminowania rozpuszczonego azotu.

Pomyślcie o tym sztucznym świecie: Kolumna ściśliwego powietrza większa niż 100 000 stóp (33 048 m) została zastąpiona 33-stopową (10 m) kolumną nieściśliwej wody morskiej. Każda kolumna wywiera ten sam nacisk na powierzchnię oceanu. Nurkowanie w barometrze wodnym byłoby sprytnym sposobem nauczenia się o ciśnieniu manometrycznym i absolutnym, gdyby nie występowało niedotlenienie i DCS.

Wrzenie na zimno

Dlaczego wysokość kolumny w barometrze ze słoną wodą jest ograniczona do 33 stóp (10 m) i dlaczego nie można wypompować wody ze studni głębszej niż 34 stopy (10,5 m) słodkiej wody. Dzieje się tak na skutek wrzenia. W temperaturze pokojowej – 72°F (22°C) – ciśnienie pary wodnej wynosi 0,05 atm, lub 0,7 psi. Gdy woda jest ogrzewana, wzrasta ciśnienie jej pary i gdy temperatura osiąga 212°F (100°C), ciśnienie pary wynosi 14,7 psi, lub 1 atm. Stąd, woda wrze, gdy ciśnienie jej pary zrównuje się z ciśnieniem absolutnym.

Pomyślcie o tym inaczej. Gdy wspinacie się w góry, woda wrze przy niższym ciśnieniu (pary), ponieważ ciśnienie barometryczne jest niższe. Odwrotne zjawisko jest prawdziwe w ciśnieniowym szybkowarze, gdzie zwiększacie ciśnienie, w celu opóźnienia wrzenia do wyższej temperatury.

Pęcherzyki dekompresyjne

Oto wykład dotyczący pęcherzyków, które tworzą się podczas dekompresji. Pęcherzyki tworzą się, gdy suma ciśnień cząsteczkowych wszystkich rozpuszczonych gazów (azot, tlen, dwutlenek węgla, hel, itp.) – oraz ciśnienie pary wodnej – przekracza ciśnienie absolutne. Jest to znane jako „przesycenie”.

Jednakże, podczas nurkowania, w przeciwieństwie do gotowania, ciśnienie pary wodnej jest dużo niższe niż ciśnienie cząstkowe rozpuszczonego azotu, więc następuje tworzenie się pęcherzyków azotu, a nie pary wodnej.

Niektórzy teoretycy dekompresji dowodzą, że możliwe jest wytrzymanie większego przesycenia zanim we krwi i tkankach będą formować się pęcherzyki, lecz taki nadmiar przesycenia wydaje się niewielki, jeżeli w ogóle on istnieje. „Ciche” pęcherzyki, które nie powodują oznak lub objawów DCS mogą być obecne po wszystkich, całkiem zwyczajnych nurkowaniach. Ultrasonograficzne wykrywanie pęcherzyków rutynowo odnajduje pęcherzyki u ludzi z przesyceniem wynoszącym zaledwie 0,4 atm (6 psi; 12 fsw/4 msw). Być może wysokie przesycenia w teorii dekompresji reprezentują ciche pęcherzyki, które są zbyt małe lub

znajdują się w złym miejscu, aby wywoływać objawy.

Istnieje również bardziej egzotyczny wykład dotyczący formowania się pęcherzyków: Para wodna opuści powierzchnię wody tylko, gdy istnieje przylegająca powierzchnia gazowa.

Gdyby nie było powierzchni gazowej w barometrze wodnym, byłoby możliwe podniesienie kolumny wody na setki stóp lub metrów w powietrzu i utrzymać ją pionowo do góry. Mimo, iż może to wydawać się dziwne, ciśnienie na wierzchu kolumny byłoby o tysięczne atmosfery mniejsze od ciśnienia atmosferycznego. Zademonstrowano to eksperymentalnie z bardzo czystą wodą i z wodą przegrzaną, która się nie gotuje, mimo iż ciśnienie pary jest setki razy większe niż ciśnienie atmosferyczne.

Gdy w końcu uformuje się pęcherzyk czystej pary wodnej, woda osiągnęła swoją siłę „rozciągliwości” i pęka lub rozrywa się. Jest to znane jako tworzenie się pęcherzyka „de novo” lub tworzenie ich „z niczego”. Prawdą jest, że pęcherzyki praktycznie zawsze tworzą się z „czegoś” i to coś jest niewielką gazową wnęką, bez względu na to, czy jest ona w wodzie morskiej, czy w nas.

Kto wam powiedział, że fizyka jest nudna?

Informacje o autorze

Richard Vann dołączył do Centrum Duke dla Medycyny Nurkowej i Fizjologii Środowiskowej z doktoratem z inżynierii biomedycznej. Badał on formowanie się pęcherzyków i wymianę gazów obojętnych. Opracował procedury dekompresji stosowane w nurkowaniu naukowym i przez astronautów w EVA ze stacji kosmicznej. Vann jest wiceprzewodniczącym Działu Badań DAN.