

ROZDZIAŁ IV

Nurkowanie w świecie materialnym

FIZYKA I CHEMIA NURKOWANIA



SPIS TREŚCI

Nurkowanie w świecie materialnym	1
Wstęp	3
Podstawy chemii i fizyki dla pływających	4
Materia	4
Energia	10
CUDOWNA CZĄSTECZKA - WODA	10
Budowa polarna wody	11
Napięcie powierzchniowe	11
Rozpuszczalność	12
Woda a ciepło	13
Woda a światło	17
Woda i dźwięk	23
Pływalność i „nieważki” świat	25
Prawo Archimedesesa	25
<i>Względna gęstość</i>	26
Zastosowania praktyczne	28
Pod ciśnieniem	29
Ciśnienie jako siła	29
Ciśnienie a ciała stałe i ciecze	32
Ciśnienie a zachowanie gazów	32
Gazy, które powinieneś znać	49
Azot	49
Tlen	50
Dwutlenek węgla	51
Tlenek węgla	51
Hel	52
Wodór	53
NEON	53
Argon	54

Wstęp

Niewiele wrażeń można porównać z tymi związanymi z eksploracją podwodnego świata. Dlaczego? Przynajmniej częściowo dlatego, że jesteś zaadaptowany do życia na lądzie, i jesteś przyzwyczajony do otaczających cię zjawisk typowych dla środowiska lądowego. Jako duży organizm lądowy nie jesteś w stanie latać bez pomocy maszyn - a generalnie upadki są bolesne. Przy temperaturze 24°C jest ci wystarczająco ciepło, byś chodził przez cały dzień w krótkich spodniach i T-shirtcie. Jesteś w stanie określić kierunek, z którego dochodzi dźwięk, a dojrzałe, czerwone jabłko jest tak samo czerwone bez względu na to, czy znajduje się trzy, czy trzydzieści metrów od ciebie.

Jednak podczas nurkowania wkraczasz w środowisko, w którym obowiązują zupełnie inne zasady. Pomimo twoich rozmiarów, możesz „latać” w trzech wymiarach bez obawy upadku. W temperaturze 24°C bez chroniącego przed utratą ciepła skafandra szybko zamarzniesz. Masz wrażenie, że większość dźwięków dochodzi dokładnie znad twojej głowy, bez względu na to, gdzie naprawdę znajduje się ich źródło. Kolory otaczających cię przedmiotów zależą od głębokości i ich odległości od ciebie. Poza tym, istnieją inne czynniki fizyczne, niewykrywalne dla twoich zmysłów, które znacząco wpływają na twoje bezpieczeństwo.

Chociaż wiele zjawisk zachodzących w podwodnym świecie może wydawać się zaskakujących, pod wodą obowiązują te same prawa co w całym wszechświecie (przynajmniej o tyle, o ile nam wiadomo!). W związku z tym, zrozumienie właściwości wody i jej wpływu na nas wymaga jedynie znajomości niektórych podstawowych zagadnień chemii i fizyki.

Niestety, hasła „chemia” i „fizyka” często wywołują uczucie graniczące z paniką u osób nie będących w szkole orłami z matematyki i nauk ścisłych. Jeśli więc przychodzi ci na myśl naukowcy w białych fartkach, mamrocący w niezrozumiałym żargonie o kosmicznie skomplikowanych wzorach matematycznych, zapomnij o tym stereotypie! Naprawdę nie potrzebujesz doktoratu z nauk ścisłych, aby zrozumieć fizyczne własności podwodnego świata.

Chemia to nauka o składzie, strukturze i właściwościach materii. Chemia nurkowania zajmuje się zatem składem, strukturą i właściwościami substancji, które oddziałują na nas pod wodą - przede wszystkim wody i gazów oddechowych. Fizyka jest nauką o zachowaniu materii i energii. Jeżeli pomyślisz, że dziedziny fizyki i chemii w dużym stopniu pokrywają się, będziesz mieć rację. Chemia i fizyka nurkowania łącznie opisują, jak wpływa na nas materia i energia pod wodą. Każda osoba obdarzona zdrowym rozsądkiem, będąca w stanie wcisnąć przyciski kalkulatora, jest w stanie pojąć prawa fizyczne i procesy chemiczne rządzące światem, w tym światem podwodnym.

Aby zbudować podstawy dla zrozumienia fizyki nurkowania, ten rozdział zaczyna się od spojrzenia na materię i energię. Rozpoczynając od opisu podstawowej jednostki materii - atomu, przechodzimy do omówienia stanów materii i połączeń między atomami. Dowiesz się, w jaki sposób energia napędza wszystkie procesy fizyczne, i dlaczego kiedyś, w bardzo odległej przyszłości, energia we wszechświecie ulegnie wyczerpaniu.

Stąd przejdziemy do zagadnień bliższych tobie - nurkowi. Dowiesz się, że woda jest niezwykle substancją ze względu na jej wyjątkową budowę molekularną, i że różni się ona od innych cieczy na wiele istotnych sposobów. Bez wody życie na Ziemi byłoby niemożliwe. Zobaczysz też, w jaki sposób ciepło, światło i dźwięk rozchodzą się w wodzie, i jak ich zachowanie wpływa na ciebie podczas nurkowania. Dowiesz się, dlaczego pod wodą możesz słyszeć dźwięki dochodzące z dużej odległości, znacznie większej niż w powietrzu, ale wzrok twój sięga tylko na ograniczoną odległość nawet w najczystszej wodzie.

Następnie zajmiemy się zagadnieniem pływalności - opiszemy, co to właściwie jest i dlaczego jesteś bardziej płwający w wodzie słonej niż w wodzie słodkiej. Zobaczysz, że siła wyporu działa przeciwstawnie do siły grawitacji, a mimo tego pod wodą nie jesteś prawdziwie nieważki.

W następnej kolejności zajmiemy się ciśnieniem. Dowiesz się, dlaczego i w jaki sposób w czasie nurkowania woda wywiera na ciebie ciśnienie, dlaczego cię nie zgniata, i jakie są inne skutki tego zjawiska. Poznasz wpływ ciśnienia na gazy, takie jak stały związek pomiędzy ciśnieniem, objętością i temperaturą.

Wreszcie opiszemy własności fizyczne różnych gazów mogących oddziaływać na ciebie jako płetwonurka. Od nich zależy reakcja twojego organizmu na te gazy, a ich zrozumienie przekłada się bezpośrednio na zrozumienie procesów fizjologicznych mających miejsce w trakcie nurkowania.

Liczymy, że dzięki temu rozdziałowi Encyklopedii Nurkowania Rekreacyjnego chemia i fizyka wydadzą się bardziej jasne, zrozumiałe oraz przydatne dla zrozumienia procesów rządzących nurkowaniem - i po

prostu interesujące. Mamy nadzieję, że uznasz, że opisane prawidła i reguły są rzeczywiście proste i logiczne oraz zobaczysz, że odkrywają one zupełnie nową płaszczyznę rozumienia podwodnego świata.

Podstawy chemii i fizyki dla pletwonurków

Dwa spośród najważniejszych pojęć w fizyce i chemii to **materia** i **energia**. Twierdzenie to jest prawdziwe zarówno dla kosmologa badającego pierwsze momenty istnienia wszechświata, jak i dla pletwonurka obliczającego zmianę objętości gazów przy trzykrotnym wzroście ciśnienia.

Materia

Materia to substancja budująca wszechświat. Za wyjątkiem reakcji jądrowych w trakcie których materia jest zamieniana na energię, materia nie może być tworzona ani niszczone. Jest jednak możliwa zmiana rodzaju materii. Różne typy materii mogą się łączyć albo rozpadać, tworząc nowe typy o odmiennych właściwościach. Jednak, całkowita ilość materii w trakcie tych przemian się nie zmienia - nie może być ona tworzona bądź niszczone.

Rodzaje materii.

Cała materia wszechświata może zbudowana jest z elementów - pierwiastków. Zgodnie z definicją¹, pierwiastek to substancja, która nie może być rozłożona na prostsze substancje w reakcji chemicznej. Pierwiastek jest najbardziej podstawową, lecz wciąż zachowującą swoje właściwości formą materii.

Zastosowanie w nurkowaniu: Zrozumienie różnic pomiędzy typami materii jest konieczne dla zrozumienia jej zachowania w trakcie nurkowania - np. dlaczego hel nie reaguje z innymi substancjami, co czyni go odpowiednim gazem dla głębokich nurkowań technicznych.

Dla przykładu, przyjrzyjmy się wodzie. Nie jest ona pierwiastkiem, gdyż można ją rozbić na prostsze składniki - wodór i tlen. Wodór i tlen nie mogą być jednak rozbite na jeszcze prostsze substancje w trakcie reakcji chemicznych - są one pierwiastkami. Wszystkie substancje, tworzące otaczające nas obiekty, a także nasze ciała, składają się z pierwiastków w różnych zestawieniach i proporcjach.

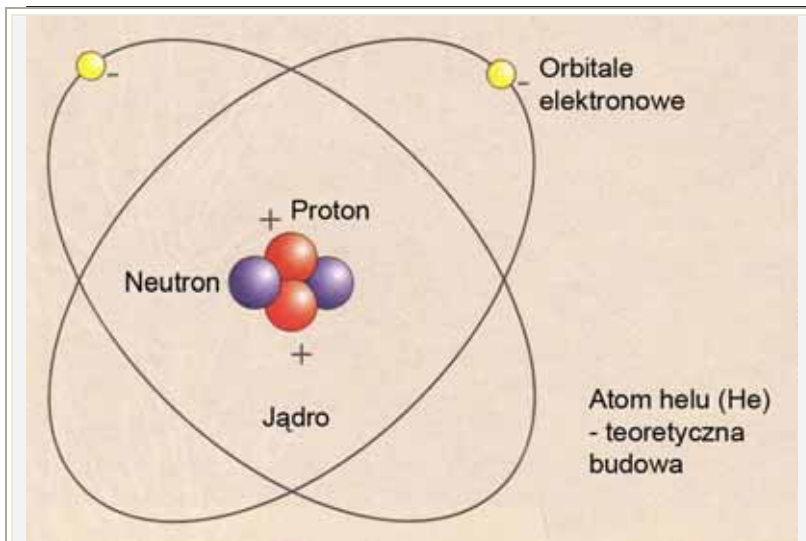
Do dnia dzisiejszego, naukowcy opisali i nazwali sto kilkanaście pierwiastków; z tej liczby około 90 występuje naturalnie w przyrodzie, zaś pozostałe zostały sztucznie wytworzone w laboratoriach jądrowych. Synteza nowych pierwiastków przeprowadzana jest w akceleratorach, w których naukowcy wywołują łączenie jąder naturalnie występujących pierwiastków lub ich rozpad. Gdy to się stanie, utworzone substancje nie mogą zostać rozbite na prostsze substancje w wyniku reakcji chemicznych (choć niekiedy są tak nietrwałe, że w krótkim czasie samoczynnie rozpadają się na prostsze elementy - przyp. tłum.) - i mają nowe, odmienne właściwości. Zgodnie z definicją, są nowymi pierwiastkami. Reakcje jądrowe mogą prowadzić do zamiany materii w energię. Z pewnością spotkałeś się ze słynnym równaniem Alberta Einsteina:

$$E = mc^2$$

W równaniu tym, E oznacza energię, m - masę (materii) a c^2 - prędkość światła podniesioną do kwadratu. Jako że kwadrat prędkości światła jest naprawdę dużą wielkością, równanie Einsteina demonstuje, jak niewielka ilość materii może zostać przetworzona na ogromną ilość energii. To właśnie jest podstawą energetyki jądrowej - czy w elektrowniach dostarczających prąd elektryczny do domów, czy w łodziach podwodnych, czy w Słońcu, które umożliwia istnienie życia na Ziemi.

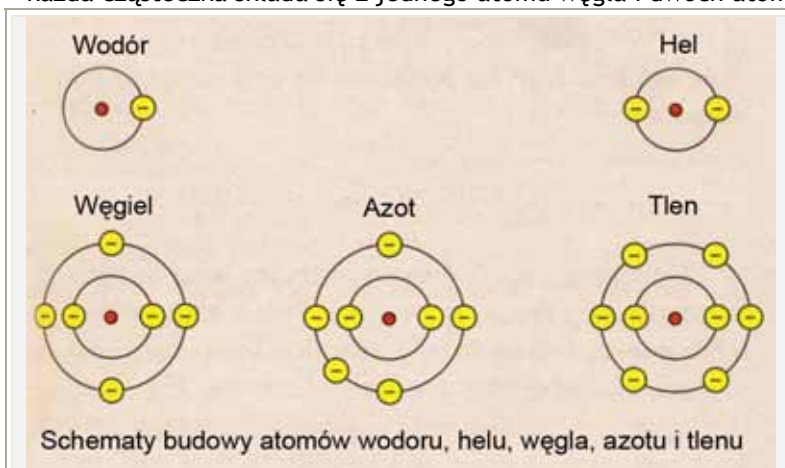
Podstawową porcją pierwiastka jest atom. Atom (nazwa pochodzi od greckiego słowa atomos - niepodzielny) jest najmniejszą porcją pierwiastka, która wciąż wykazuje jego specyficzne właściwości. Atomy są tak małe, że potrzeba by wielu milionów atomów ułożonych jeden obok drugiego, aby łączna długość takiego szeregu osiągnęła grubość tej strony.

¹ Według współczesnej definicji, pierwiastek jest to taka substancja, która składa się wyłącznie z atomów posiadających jednakową liczbę protonów w jądrze. O protonach napiszemy za chwilę (przypp. tłum.)



Chociaż jądro jest tak małe w stosunku do całego atomu, stanowi 99,9% całej jego masy. Wynika to z faktu, że protony i neutrony są mniej-więcej 2000 razy cięższe od elektronów. Całkowita masa wszystkich wchodzących w skład atomu cząstek elementarnych to masa atomowa. Oprócz masy, pierwiastki różnią się przede wszystkim liczbą protonów w jądrze, czyli liczbą atomową. Różne atomy tego pierwiastka, przy tej samej liczbie protonów, mogą mieć różną liczbę neutronów (czyli różną masę atomową). Takie odmiany tego samego pierwiastka określane są jako izotopy.

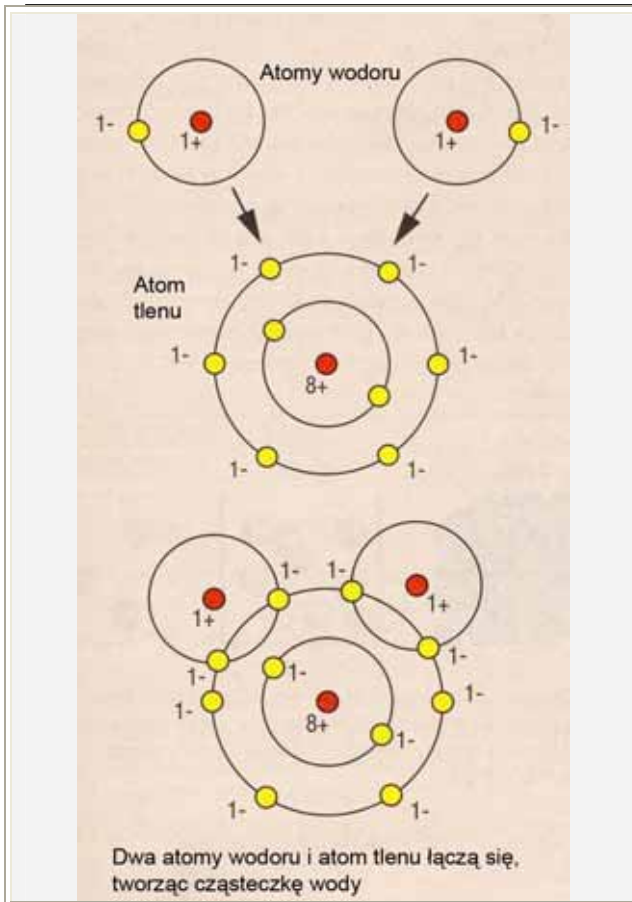
Na różne sposoby atomy łączą się między sobą, tworząc cząsteczki. Cząsteczki złożone z więcej niż jednego pierwiastka to związki chemiczne. Cząsteczka stanowi najmniejszą porcję związku chemicznego, która posiada wszystkie właściwości tego związku. Przykładem może być dwutlenek węgla, CO_2 , którego każda cząsteczka składa się z jednego atomu węgla i dwóch atomów tlenu.



Także atomy jednego pierwiastka mogą się łączyć i tworzyć cząsteczki - czyli występować jako pierwiastki w formie cząsteczkowej. Przykładem może być azot, który w powietrzu występuje w formie azotu cząsteczkowego (N_2), którego każdą cząsteczkę tworzą dwa atomy azotu. Związki chemiczne zazwyczaj mają właściwości całkowicie różne od właściwości tworzących je pierwiastków. Znakomitym tego przykładem jest woda, H_2O . W formie cząsteczkowej, oba pierwiastki wchodzące w skład wody, wodór i

tlenu, w temperaturze pokojowej są stosunkowo reaktywnymi gazami (czyli łatwo reagują z innymi substancjami). Woda, produkt reakcji między wodorem i tlenem, w temperaturze pokojowej jest względnie niereaktywną cieczą - substancją o zupełnie odmiennych cechach niż wyjściowe składniki. Podobnie, właściwości pierwiastków w formie cząsteczkowej, np. cząsteczkowego azotu (N_2), mogą istotnie się różnić od właściwości pierwiastków w formie atomowej (N) - o ile w formie atomowej w ogóle występują.

W cząsteczkach, atomy są połączone ze sobą poprzez wiązania chemiczne. Proces tworzenia wiązania chemicznego to reakcja chemiczna. Tylko pierwiastki o odpowiedniej strukturze atomowej, a dokładniej - o odpowiedniej konfiguracji elektronów na powłokach elektronowych - mogą tworzyć wiązania chemiczne. Atom o konfiguracji elektronicznej, która pozwala mu utworzyć wiązanie chemiczne, jest określany jako reaktywny.

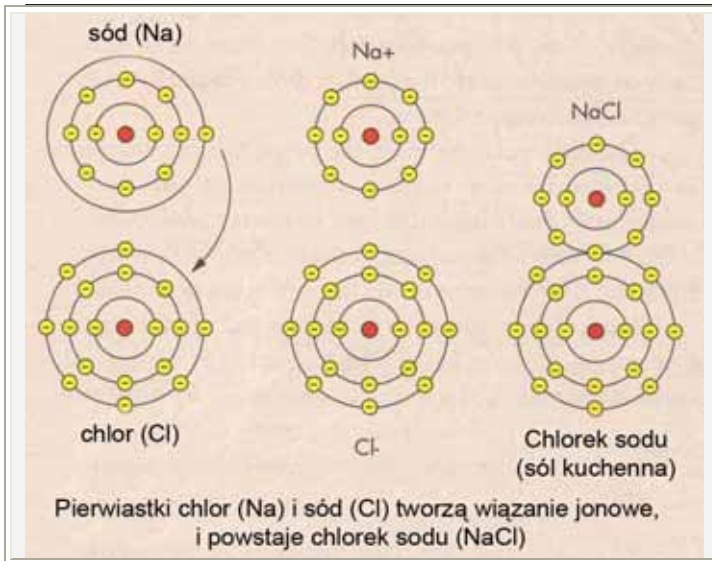


Reaktywność atomu zależy od ilości elektronów na jego najbardziej zewnętrznej powłoce - powłoce walencyjnej. Jeśli zewnętrzna powłoka jest pełna, czyli zawiera tyle elektronów ile może się na niej pomieścić, atom nie będzie łatwo tworzył wiązań z innymi - będzie niereaktywny. Przykładami takich bardzo stabilnych gazów są hel i neon. Jak dowiesz się wkrótce, nurkowie techniczni i komercyjni często używają helu jako gazu oddechowego, między innymi ze względu na jego niereaktywność. Atomy z mniejszą ilością elektronów na powłoce walencyjnej mogą stosunkowo łatwo tworzyć wiązania, lecz tylko z niektórymi pierwiastkami. Generalnie, tworzą wiązania z innymi atomami w taki sposób, aby wypełnić swoją powłokę walencyjną. Mogą to być wiązania jonowe lub wiązania kowalencyjne.

Wiązanie jonowe powstaje, gdy jeden atom przejmuje elektron (lub elektrony) od innego atomu (lub atomów), w taki sposób, by skompletować swoją powłokę walencyjną. W ten sposób, atom który utracił ujemnie naładowany elektron uzyskuje całkowity ładunek dodatni, zaś atom który przyjął dodatkowy elektron przybiera całkowity ładunek ujemny. Przeciwnie naładowane atomy przyciągają się wzajemnie.

Przykładem wiązania jonowego jest sól kuchenna, czyli chlorek sodu - NaCl. Atom sodu posiada tylko jeden ze swoich 11 elektronów na zewnętrznej powłoce, zaś atom chloru na powłoce walencyjnej posiada siedem elektronów, choć dla

skompletowania powłoki potrzebuje ośmiu. Dlatego atom chloru przejmuje samotny elektron z zewnętrznej powłoki atomu sodu, kompletując własną powłokę walencyjną; posiada teraz o jeden elektron więcej niż wynosi liczba protonów, i jego całkowity ładunek jest ujemny. Atom sodu, oddawszy jeden elektron z zewnętrznej powłoki i odstoniwszy wypełnioną drugą powłokę, która teraz staje się zewnętrzną - posiada o jeden proton więcej niż wynosi liczba elektronów, i jego całkowity ładunek jest dodatni. Dwa przeciwnie naładowane jony przyciągają się wzajemnie, tworząc wiązanie jonowe. Niektóre atomy tworząc związek ani nie oddają elektronów, ani ich nie przyjmują celem wypełnienia powłoki. Zamiast tego, dwa lub więcej atomów uwspólnia część elektronów, w ten sposób wypełniając swoje powłoki. Są to tak zwane wiązania kowalencyjne; najbardziej znanym przykładem związku w którym występują jest cząsteczka wody.



W wypadku wody, tlen i wodór, dwa wysoce reaktywne pierwiastki, łączą się tworząc stabilny związek chemiczny. Aby uzyskać komplet elektronów na powłoce walencyjnej, atom tlenu potrzebuje dodatkowo dwóch elektronów (posiada sześć, potrzebuje ośmiu). Każdy z atomów wodoru posiada natomiast tylko jeden elektron, a potrzebuje dwóch do skompletowania pierwszej powłoki. Poprzez uwspólnienie dwóch elektronów z atomu tlenu i po jednym elektronie z dwóch atomów wodoru, atom tlenu uzyskuje dwa elektrony potrzebne mu do skompletowania powłoki, a każdy z atomów wodoru uzyskuje brakujący jeden elektron. W związku z tym, w skład cząsteczki wody wchodzi tlen (O) i wodór (H) w niezmienniej proporcji - jeden atom tlenu na dwa atomy wodoru.

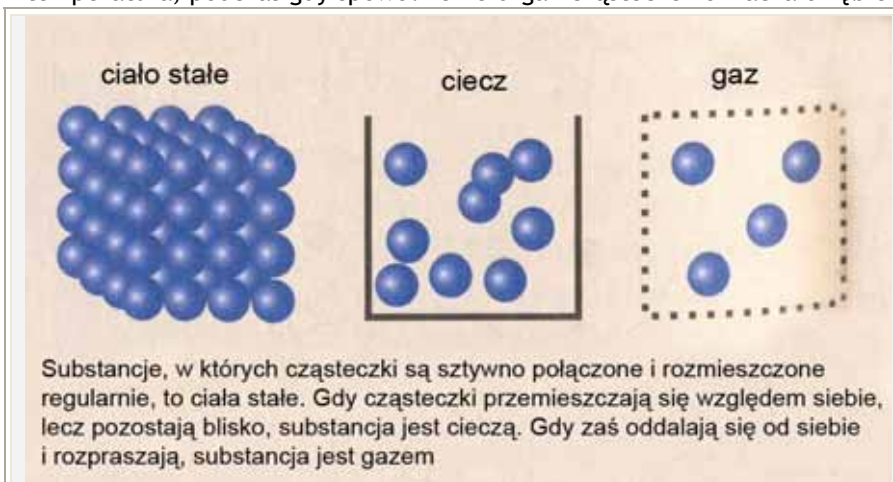
Zapisuje się to jako H₂O - jest to zapewne najbardziej rozpoznawalny wzór chemiczny na świecie. Taka budowa cząsteczkowa daje wodzie szereg wyjątkowych własności, o których dowiesz się niebawem.

Stany skupienia materii.

Pierwiastki i związki chemiczne mogą występować w jednym z trzech stanów skupienia: jako ciała stałe, ciecze i gazy. Na przykład, woda może występować jako ciecz, lecz również jako ciało stałe (lód) oraz gaz (para wodna). Stan skupienia zależy od tego, jak blisko siebie znajdują się cząsteczki danej substancji, i jak sztywne są połączenia między nimi.

Zastosowanie w nurkowaniu: Różne stany materii różnią się swoim zachowaniem pod ciśnieniem. Na przykład, gazy ulegają sprężeniu w stopniu proporcjonalnym do ciśnienia, zaś ciecze i ciała stałe są nieściśliwe (w warunkach spotykanych podczas nurkowania).

Generalnie, najważniejszym czynnikiem wpływającym na stan skupienia substancji jest temperatura, ponieważ właśnie ona wpływa na szybkość poruszania się, lub drgania, cząsteczek. Temperatura jest właśnie miarą tempa poruszania się cząsteczek danej substancji: im szybszy ruch cząsteczek, tym wyższa temperatura, podczas gdy spowolnienie drgań cząsteczek oznacza oziębienie substancji.



Gdy cząsteczki danej substancji znajdują się blisko siebie i są sztywno połączone w regularny sposób, taka substancja jest w stanie stałym. Gdy rośnie temperatura, cząsteczki zaczynają poruszać się coraz szybciej, wypadają ze swoich ustalonych pozycji i zaczynają się przemieszczać względem siebie, ale ciągle pozostają blisko. Ten stan skupienia określamy jako ciekły. Gdy temperatura dalej rośnie, cząsteczki

zaczynają się oddalać od siebie i rozpraszają, tworząc gaz. Dobrym przykładem są lód, woda i para, gdzie ciało stałe (lód) reprezentuje stan „najzimniejszy”, a gaz (para wodna) - „najcieplejszy” tej samej substancji.

Ciśnienie również jest jednym z czynników wpływających na stan skupienia, ale w większości sytuacji, z którymi mamy do czynienia na co dzień, nie jest ono bardzo istotne. Im wyższe ciśnienie, tym trudniej substancja przechodzi ze stanu ciekłego w gazowy, i tym wyższa temperatura jest potrzebna do przejścia

cieczy w gaz. Dobrym przykładem są butle z gazem propan-butan, który pod wysokim ciśnieniem wewnątrz butli jest cieczą, lecz wypywa z butli na zewnątrz jako gaz. Podobnie, temperatura wrzenia gotowanej wody zmienia się wraz z wysokością - im wyżej się znajdujemy, tym woda wrze w niższej temperaturze. Na wysokości 7600 metrów woda wrze w temperaturze 76°C , podczas gdy na poziomie morza temperatura wrzenia wynosi 100°C .

Przyciąganie grawitacyjne, masa i ciężar.

Materia oddziałuje na inną materię poprzez przyciąganie grawitacyjne. Siła przyciągania jest wprost proporcjonalna do masy ciała, i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości od niego. W większości sytuacji w życiu codziennym, pod uwagę bierzemy tylko przyciąganie ziemskie. Ty przyciągasz Ziemię w ten sam sposób, w jaki Ziemia przyciąga ciebie, siła przyciągania ziemskiego działająca na ciebie jest bez porównania większa od siły, z jaką twoje ciało przyciąga Ziemię. Gdy jednak weźmiemy pod uwagę Księżyc, dwukierunkowe działanie siły grawitacji staje się bardziej wyraźne. Siła przyciągania ziemskiego utrzymuje Księżyc na orbicie wokółziemskiej, ale siła przyciągania Księżyca wystarcza do podnoszenia wody w oceanach, co wywołuje pływy.

Masa jest jedną z cech materii; według fizycznej definicji, jest ona miarą bezwładności ciała, a potocznie jest to ilość materii i energii zgromadzonej w ciele. W praktyce, zazwyczaj określamy masę ciała poprzez jego ciężar, czyli przez określenie działającej na ciało siły grawitacji. Różnica jest istotna - przedmiot, którego ciężar na Ziemi wynosi 60 kg, na Księżycu będzie ważył 10 kg. Masa przedmiotu nie uległa zmianie, ale przez niższą wartość siły grawitacji na Księżycu, obniżył się jego ciężar.

Dopóki jednak nie rozpoczniemy nurkowania na innych planetach, jako płetwonurkowie będziemy mieli do czynienia jedynie z siłą przyciągania ziemskiego. Dlatego możemy używać określeń ciężar i masa zamiennie, przynajmniej do celów nurkowych, mimo iż z technicznego punktu widzenia są to różne pojęcia.

System metryczny a system imperialny

W Polsce i większości krajów świata stosuje się system metryczny (SI) używający metrów, kilogramów i stopni Celsjusza. Jednak w krajach anglosaskich, przede wszystkim w Stanach Zjednoczonych i Wielkiej Brytanii, w użyciu jest system imperialny, stosujący stopy, funty i stopnie Fahrenheita. Płetwonurkowie zazwyczaj używają systemu miar powszechnie stosowanego w ich krajach, dlatego umiejętność przeliczania jednostek pomiędzy systemami może być bardzo użyteczna w wypadku nurkowania za granicą! Poniżej zestawiono niektóre z przeliczników między systemami:

Długość

1 cal (inch) = 2,54 centymetra
 1 stopa (foot, l. mn. feet) = 12 cali = 30,48 centymetra
 1 jard (yard) = 3 stopy = 91,44 centymetra
 1 mila (mile) = 1609 metrów
 1 centymetr = 0,3937 cala
 1 metr = 3,28 stopy
 1 kilometr = 0,62 mili

Masa

1 uncja (ounce) = 28,35 grama
 1 funt (pound) = 16 uncji = 453,6 grama
 1 tona amerykańska (ton) = 2000 funtów = 907,2 kilograma
 1 tona brytyjska (long ton) = 2240 funtów = 1016 kilogramów
 1 gram = 0,035 uncji
 1 kilogram = 2,2 funta
 1 tona metryczna = 2204,6 funta

Objętość

1 uncja płynna - UK (fluid ounce, fl oz) = 28,41 mililitra
 1 pint - UK = 20 fl oz = 568,2 mililitra
 1 quart - UK = 2 pints = 1,136 litra
 1 gallon - UK = 4 quarts = 160 fl oz = 4,546 litra
 1 uncja płynna - USA (fluid ounce, fl oz) = 29,57 mililitra
 1 gallon - USA = 128 fl oz = 3,784 litra
 1 stopa sześcienna (cubic foot) = 28,32 litra
 1 litr = 0,035 stopy sześcienniej = 0,264 gallon USA

= 0,219 gallon UK

Temperatura

Aby przeliczyć ze skali Fahrenheita na Celsjusza: $(^{\circ}\text{F} - 32) \times 0,555$

Aby przeliczyć ze skali Celsjusza na Fahrenheita: $(^{\circ}\text{C} \times 1,8) + 32$

Ciepło

1 kaloria = ilość ciepła potrzebna do ogrzania 1 grama wody o 1°C

1 BTU (British Thermal Unit - Brytyjska Jednostka Ciepłna) = ilość ciepła potrzebna do ogrzania 1 funta wody o 1°F

1 BTU = 252 kalorie

Energia

Energia to zdolność do wykonania pracy, definiowanej jako iloczyn siły działającej na obiekt i odległości, na jaką nastąpiło przesunięcie obiektu. Pojęcia energii i pracy są zatem bardzo zbliżone. W systemie metrycznym, energia i praca mierzone są w dżulach (J) lub w ergach. Jeden erg to wartość pracy wykonanej przy podniesieniu obiektu ważącego 1 gram o 1 centymetr. Dżul to mniej-więcej 107 ergów. W systemie imperialnym używa się jednostki stopo-funt (foot-pound).

Rodzaje energii.

Za wyjątkiem reakcji jądrowych, energia nie może być ani wytwarzana ani niszczona. Może ona jednak przyjmować różne formy: ciepła, światła, elektryczności, energii chemicznej bądź energii mechanicznej. Ciepło jest miarą tempa ruchu cząsteczek tworzących substancję. Im szybciej poruszają się cząsteczki, tym wyższa ich energia cieplna. Każda inna forma energii może zostać zamieniona w ciepło. Przy zamianie jednego rodzaju energii na inny, na przykład energii elektrycznej w energię świetlną, zawsze część energii jest rozpraszana w postaci ciepła.

1. Światło to energia w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Jej najlepszym przykładem jest energia słoneczna. Przykładem przekształcenia tej formy energii jest jej zamiana na energię chemiczną w procesie fotosyntezy prowadzonym przez rośliny.
2. Energia elektryczna jest wynikiem oddziaływania pomiędzy ujemnie naładowanymi elektronami i obdarzonymi ładunkiem dodatnim protonami. Przykładem jej zastosowania jest bateria, gromadząca energię chemiczną, która po przekształceniu w energię elektryczną może być wykorzystywana w przedmiotach powszechnego użytku, na przykład w latarce.
3. Energia chemiczna to energia wiązań chemicznych i układów cząsteczek. Przykładowo, gaz ziemny po osiągnięciu temperatury krytycznej reaguje z tlenem w reakcji spalania, w trakcie rozrywania są wiązania w cząsteczkach metanu, formują się nowe o niższej energii chemicznej, a nadmiar energii wydzielany jest ciepło.
4. Energia mechaniczna przejawia się jako ruch lub zdolność do wykonania ruchu - jest wynikiem położenia lub stanu przedmiotu. Jeśli ciało, na przykład naciągnięta sprężyna, jest przytrzymywane w takiej pozycji, że po jego zwolnieniu może zostać wykonana praca, mówimy o energii potencjalnej. Gdy energia jest wynikiem samego ruchu, mówimy o energii kinetycznej. Przykładem obu rodzajów energii mechanicznej jest ciężarek zawieszony na sprężynie: gdy sprężyna jest nieruchomo naciągnięta, posiada energię potencjalną, zaś podczas ruchu, przy rozciąganiu i skracaniu - energię kinetyczną. Energia kinetyczna jest cyklicznie zamieniana na energię potencjalną.

CUDOWNA CZĄSTECZKA - WODA

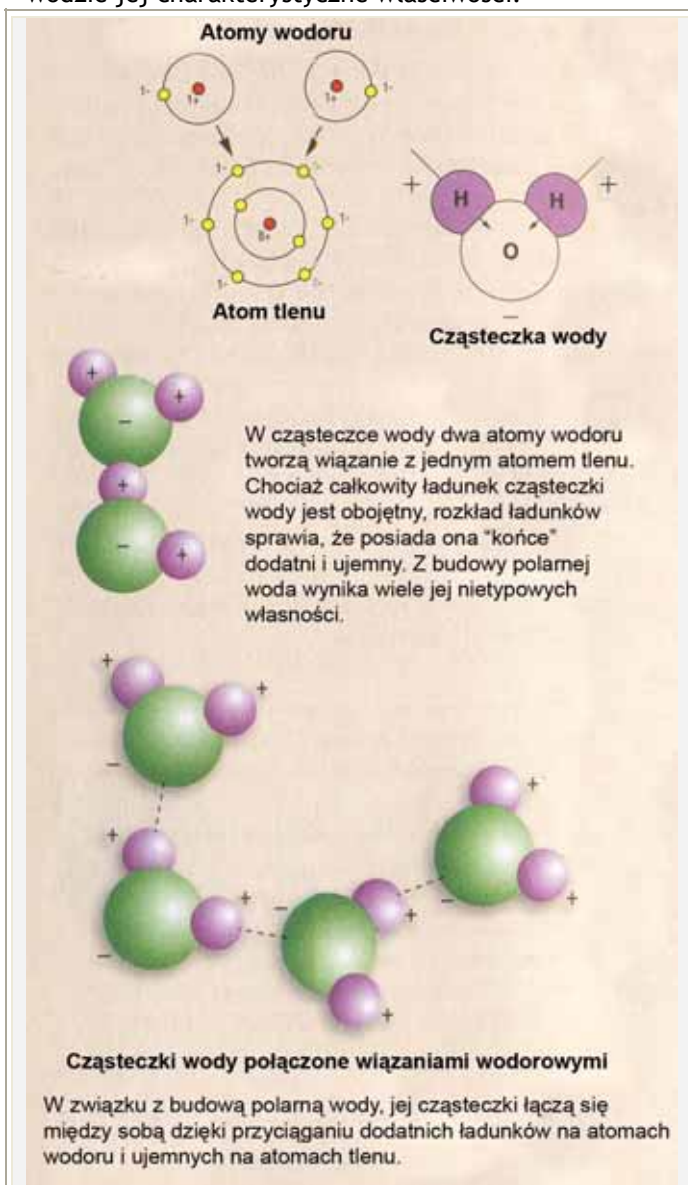
Jak możesz przypuszczać, jednym z ważniejszych obiektów badań chemii i fizyki nurkowania jest woda. Woda jest wyjątkową substancją, której nietypowe własności odróżniają ją od większości cieczy. Gdyby nie te własności wody, powierzchnia Ziemi byłaby lodowatym ciałem stałym, a życie nie mogłoby istnieć w znanej nam postaci.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Nietypowe właściwości wody mają duży wpływ na Ciebie w czasie nurkowania, zwłaszcza w odniesieniu do pochłaniania ciepła i konieczności ochrony przed jego utratą.

Budowa polarna wody

Jak dowiedziałeś się wcześniej, w cząsteczce wody dwa atomy wodoru tworzą wiązania z jednym atomem tlenu. Zgodnie z koncepcją odpychania par elektronowych powłoki walencyjnej (VSEPR), cząsteczka przybiera taki kształt, przy którym siły wzajemnego odpychania elektronów mają najmniejsze wartości (takie same ładunki odpychają się), a w wypadku cząsteczki wody jest to układ, w którym dwa atomy wodoru znajdują się po jednej stronie, a atom tlenu po drugiej - jak to pokazano na ilustracji. Chociaż cząsteczka wody posiada całkowity ładunek obojętny, jej kształt implikuje słaby ładunek ujemny na atomie tlenu, i słabe ładunki dodatnie na atomach wodoru. Posiadanie cząstkowych ładunków ujemnych i dodatnich w różnych częściach cząsteczki sprawia, że cząsteczka wody posiada budowę polarną.

Dzięki budowie polarnej, w wodzie tworzą się wiązania pomiędzy dodatnio naładowanymi atomami wodoru a ujemnie naładowanymi atomami tlenu należącymi do różnych cząsteczek wody. Nazywane są one wiązaniami wodorowymi lub wiązaniami polarnymi. Są one znacznie słabsze niż wiązania kowalencyjne albo jonowe, występujące w większości cząsteczek - a mimo to właśnie wiązania wodorowe nadają wodzie jej charakterystyczne właściwości.



Napięcie powierzchniowe

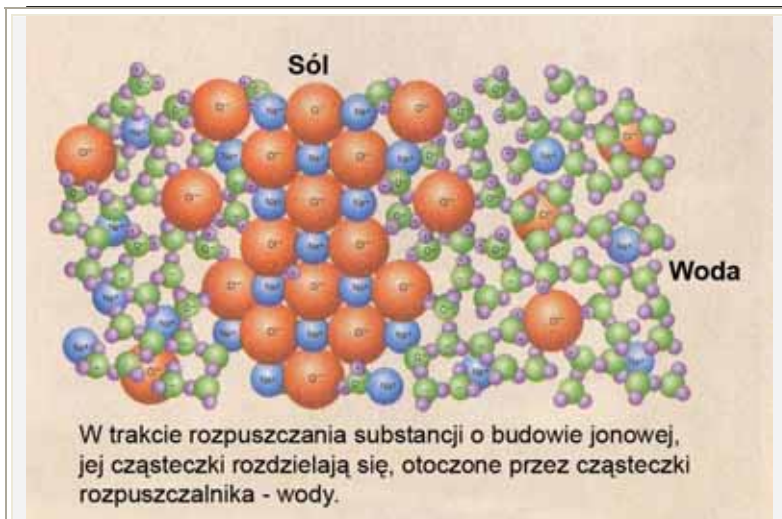
Jedną z ważniejszych cech wyróżniających wodę od innych cieczy jest występujące w niej **napięcie powierzchniowe**. Wiązania wodorowe pomiędzy cząsteczkami wody sprawiają, że powierzchnia wody jest stosunkowo spójna, i opiera się przebiciu czy rozdzielaniu. Napięcie powierzchniowe utrzymuje razem cząsteczki wody w kroplach, i jest wystarczająco mocne by pozwolić na utrzymywanie się na powierzchni wody igły czy żyłki - przedmiotów wykonanych z materiału znacznie gęstszego niż woda. Położona na powierzchni wody igła właściwie nie pływa (pojęciem pływalności zajmiemy się wkrótce), ale jest tak mała i lekka, że siła ciężkości ma mniejszą wartość od sił napięcia powierzchniowego.

Napięcie powierzchniowe pełni ważną rolę w środowisku wodnym, ponieważ zależy od niego wiele drobnych organizmów. Jednym z przykładów jest nartnik, owad, który dzięki napięciu powierzchniowemu może poruszać się po powierzchni wody w trakcie poszukiwania pożywienia lub ucieczki przed wrogami. Większe znaczenie ekologiczne ma **neuston** - drobne organizmy, które żyją na powierzchni oceanów lub wód słodkich. Wiele z nich nie pływa, lecz jest tak małych (często mikroskopijnych), że dzięki napięciu powierzchniowemu mogą pozostawać na powierzchni, w swojej niszy środowiskowej. Jednym z ważnych zagrożeń wynikających ze skażenia środowiska pewnymi substancjami jest osłabianie przez nie napięcia powierzchniowego, w efekcie czego na skażonych obszarach całe zespoły organizmów w ekosystemie mogą ulec zniszczeniu.

	<p>Napięcie powierzchniowe jest wystarczająco mocne, by utrzymać igłę na powierzchni wody - mimo że igła wykonana jest z materiału wielokrotnie gęstszego niż woda. Igła właściwie nie „pływa”, ale unosi się na powierzchni dzięki temu, że siły napięcia powierzchniowego mają większą wartość niż siła grawitacji</p>
	<p>Dzięki napięciu powierzchniowemu, nartniki mogą chodzić po powierzchni wody. W oceanach ważną rolę ekologiczną pełni neuston - drobne organizmy planktonowe, które także dzięki napięciu powierzchniowemu mogą utrzymywać się na powierzchni</p>

Rozpuszczalność

Wyjątkowość wody objawia się również tym, że rozpuszcza się w niej więcej związków niż w jakiegokolwiek innej powszechnie występującej cieczy. Wynika to także z polarności cząsteczek wody. Po umieszczeniu w wodzie substancji stałej o budowie jonowej, takiej jak sól kuchenna, cząsteczki wody zaczynają z nią oddziaływać, układając się zgodnie ze swoją polarnością. Jony obdarzone pozytywnym ładunkiem są otaczane przez cząsteczki wody zorientowane ku niej częścią o ujemnym ładunku (atom tlenu), a jony ujemne atakowane są przez cząsteczki wody obrócone ku nim częściami o ładunku dodatnim (atomy wodoru). W ten sposób związki o budowie jonowej podczas rozpuszczania są dosłownie rozrywane przez cząsteczki wody, a jony pozostają zawieszony w roztworze. Zdolność wody do rozpuszczania szerokiej gamy związków czyni ją niezbędną dla życia. Woda dostarcza rozpuszczone składniki odżywcze i niezbędne gazy do każdej żywej komórki, jednocześnie odprowadzając produkty przemiany materii. U prostych organizmów, procesy te zachodzą w wodzie stanowiącej ich środowisko życia. U organizmów złożonych (takich jak my) procesy te mają miejsce wewnątrz organizmu - woda pełniąc funkcje transportowe jest głównym składnikiem krwi. Także wewnątrz każdej żywej komórki woda jest niezbędna dla milionów procesów - od produkcji i użycia energii, aż po reprodukcję. Woda rozpuszcza bardzo wiele substancji - ale na szczęście nie wszystkie. Gdyby w wodzie rozpuszczało się wszystko, życie nie mogłoby istnieć, gdyż nie byłoby możliwości utworzenia struktur komórkowych: one także uległyby rozpuszczeniu!

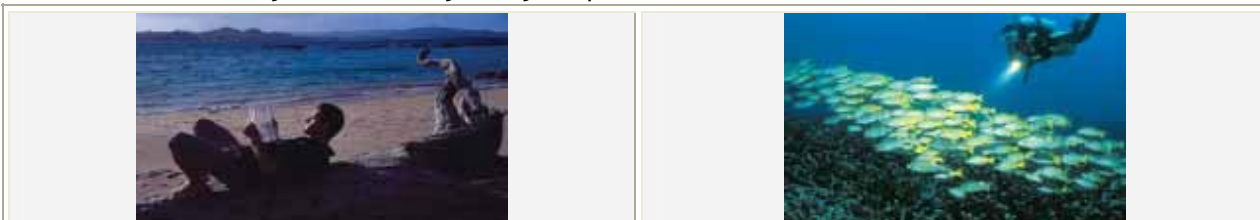


Związki o budowie niepolarniej nie rozpuszczają się łatwo w wodzie. Oleje i tłuszcze są niepolarne, i właśnie dlatego olej nie miesza się z wodą. Zmieszanie związków o budowie niepolarniej z wodą umożliwia mydła, których cząsteczki posiadają fragmenty o budowie zarówno polarnej, jak i niepolarniej. Gdy myjesz ręce bądź zmywasz naczynia, cząsteczki mydła wiążą się jednym końcem (niepolarnym) z tłustymi zabrudzeniami, a drugim końcem (polarnym) z wodą, tworząc ogniwo umożliwiające rozpuszczenie w wodzie tłuszczu.

Woda a ciepło

Pojemność cieplna.

Z budowy polarnej wody wynika jej specyfika pod względem przewodnictwa cieplnego. Przede wszystkim, woda ma jedną z najwyższych pojemności cieplnych spośród wszystkich znanych substancji (amoniak jest jednym z nielicznych wyjątków). **Pojemność cieplna** jest miarą ilości ciepła, jaka musi zostać doprowadzona lub odprowadzona do/od określonej ilości substancji, aby zmieniła ona temperaturę o pewną wartość. W porównaniu z wodą, na przykład, powietrze ma bardzo niską pojemność cieplną. Dlatego przy temperaturze 24°C czujesz się ciepło i komfortowo na łądzie, natomiast w wodzie o tej samej temperaturze szybko zaczynasz odczuwać chłód. Powietrze odprowadza ciepła od twojego ciała znacznie wolniej niż woda o tej samej temperaturze.



Na powierzchni przy temperaturze 24°C jest ci ciepło, lecz pod wodą szybko poczujesz chłód. Wynika to z większej pojemności cieplnej wody niż powietrza

Duża pojemność cieplna wody wynika z istnienia wiązań wodorowych pomiędzy jej cząsteczkami. Gdy ogrzewasz wodę, znaczna część dostarczanej energii jest zużywana na rozbijanie wiązań wodorowych, i tylko jej część jest wykorzystywana do zwiększenia energii kinetycznej (temperatury) cząsteczek wody. Podobnie, dzięki istnieniu wiązań wodorowych woda paruje wolniej niż inne często spotykane ciecze. Wynika to z wysokiej wartości **ciepła parowania**, związanej z tym, że dostarczana energia cieplna jest w znacznym stopniu wykorzystywana na rozbijanie wiązań wodorowych, konieczne zanim cząsteczki wody przejdą do stanu gazowego. Z tego samego powodu woda ma wysokie **ciepło topnienia**: zamarzająca woda wydziela duże ilości ciepła, natomiast topniejący lód musi pochłoniąć duże ilości energii cieplnej. Właściwości te także wynikają z polarnej budowy cząsteczek wody.

Dzięki dużej pojemności cieplnej wody odgrywa ona istotną rolę w regulacji klimatu na kuli ziemskiej. Główne prądy oceaniczne transportują duże ilości ciepła z ciepłych rejonów blisko równika do chłodniejszych stref położonych bliżej biegunów. To zjawisko przyczynia się do obniżenia temperatur w strefie tropikalnej i podwyższenia temperatur na wyższych szerokościach geograficznych. Znakomitym przykładem są Bermudy, leżące daleko na północ od Zwrotnika Raka, dzięki omywającemu je ciepłemu Prądowi Zatokowemu charakteryzujące się klimatem bliskim tropikalnemu. Innym przykładem są wyspy

Galapagos na Oceanie Spokojnym niedaleko Ekwadoru. Zimna woda transportowana przez prądy głębinowe jest wynoszona do powierzchni w rejonie wysp, i absorbuje duże ilości ciepła z otoczenia. Dlatego wyspy odznaczają się chłodnym klimatem, mimo iż leżą na równiku.

Duże ciepło właściwe wody jest też przyczyną, dla której wahania temperatury w zbiornikach wodnych są zawsze mniejsze niż w podobnej objętości powietrza, i dlatego zmiany temperatury są znacznie wolniejsze w wodzie niż w powietrzu. Możesz to zauważyć nurkując w jednym miejscu w ciągu tygodnia - temperatura powietrza zapewne będzie regularnie rosła bądź opadała, podczas gdy temperatura wody zmieni się w tym czasie minimalnie.



Woda i lód.

Interakcje między wodą a ciepłem w jeszcze jeden sposób różnią się od tych występujących w „typowych” substancjach. Podczas stygnięcia większości cieczy, ich gęstość rośnie, aż do chwili osiągnięcia stanu stałego. Podczas przechodzenia ze stanu ciekłego w stały, cząsteczki zbliżają się do siebie, a ich ruchy ulegają spowolnieniu. Wraz ze spadkiem temperatury ciecz staje się coraz gęstsza, a po przejściu w stan stały gęstość jeszcze wzrasta. Dlatego tworzące się ciała stałe tonie, i osadza się na dnie zbiornika z cieczą - ciecz krzepnie od dna do góry.

Woda zachowuje się inaczej, co jest dobrą wiadomością dla nas wszystkich. Podczas schładzania, gęstość wody rośnie tak jak u innych cieczy - ale tylko do temperatury 4°C. Przy tej temperaturze woda powoli zaczyna krzepnąć - ale budowa polarna wody wymusza ułożenie cząsteczek w strukturę krystaliczną, przy której zajmują one więcej miejsca niż w stanie ciekłym. Oznacza to, że w przeciwieństwie do większości substancji, które są gęstsze w stanie stałym niż w stanie ciekłym, zestalona woda (lód) jest mniej gęsta od wody ciekłej, i pływa po niej.

Poza umożliwianiem nurkowania podlodowego, ta własność wody ma ogromny wpływ na klimat na świecie. Pływający po powierzchni lód izoluje i zatrzymuje ciepło w warstwach wody znajdujących się pod nim, co jeszcze spowalnia proces zamarzania w porównaniu z innymi cieczami. Gdyby lód tonął, duża część oceanów byłaby zamrożona, i prawdopodobnie większość wody na ziemi występowałaby w formie lodu.

Stratyfikacja.

Woda zachowuje się jak typowa ciecz aż do osiągnięcia punktu zamarzania - czyli do temperatury 4°C im jest chłodniejsza, tym ma większą gęstość. Woda tworzy warstwy o różnej gęstości, przy czym warstwy o większej gęstości znajdują się pod warstwami o mniejszej gęstości. Ten układ warstw różniących się gęstością określany jest jako **stratyfikacja**, albo uwarstwienie. W miarę zanurzania się, gdy przechodzisz przez warstwy wody o różnej gęstości, często doświadczasz gwałtownego spadku temperatury. Jak zapewne wiesz, strefa przejściowa pomiędzy warstwami wody o różnej temperaturze jest nazywana **termokliną**. W stabilnej, słabo mieszanej wodzie śródlądowych jezior lub kamieniołomów podczas zanurzania na głębokość 18 metrów możesz przejść przez dwie lub trzy warstwy o różnej temperaturze i gęstości.



Rozpuszczone sole powodują wzrost gęstości wody i stratyfikację - wydzielenie warstw wody o różnych gęstościach. Strefa przejściowa pomiędzy warstwami to haloklina - na tym zdjęciu rozmyty fragment powstał, gdy przepływający pętlonurek zaburzył haloklinę, mieszając wodę o różnych gęstościach

Substancje rozpuszczone, takie jak sól w wodzie morskiej, także wpływają na zwiększenie gęstości wody i mogą powodować stratyfikację. Jeśli w wodzie znajduje się wystarczająca ilość rozpuszczonych substancji, woda w warstwie cieplejszej może być gęstsza od wody chłodniejszej, i znajdować się pod nią. Dobrym przykładem jest układ warstw wody wypełniającej jaskinie na meksykańskim półwyspie Jukatan. W trakcie nurkowania na tych stanowiskach, często przechodzisz przez wyraźnie wyczuwalną granicę pomiędzy warstwami ciepłej wody słonej i zimnej wody słodkiej. Strefa przejściowa między warstwami wody słonej i słodkiej określana jest jako **haloklina**.

Przepływ ciepła.

Aby zrozumieć związek pomiędzy wodą i ciepłem, powinieneś zdać sobie sprawę z różnicy pomiędzy ciepłem i temperaturą. Chociaż często używamy tych terminów zamiennie, oznaczają one dwie różne rzeczy. Ciepło to całkowita energia kinetyczna cząsteczek w danym obiekcie. Natomiast temperatura jest miarą natężenia ruchów cząsteczek w obiekcie. Wyobraźmy sobie dwie porcje wody o tej samej temperaturze, jedną o dużej, a drugą o małej objętości. Chociaż temperatura obu porcji jest taka sama, w skład dużej porcji wchodzi znacznie więcej poruszających się cząsteczek, i w związku będzie ona miała wyższe ciepło.

Analogicznie, przy takiej samej temperaturze dwie różne substancje mogą posiadać różną ilość ciepła. Porównajmy wodę i powietrze: po postawieniu na rozgrzanej do 95°C płycie kuchenki elektrycznej „pustego”, czyli wypełnionego powietrzem czajnika, powietrze w nim szybko osiągnęłoby temperaturę płyty grzewczej. Znacznie dłużej trwałoby ogrzanie do 95°C zawartości czajnika wypełnionego wodą. Potrzeba więcej energii cieplnej dla ogrzewania wody niż takiej samej ilości powietrza. Przy takich samych objętościach wody i powietrza, aby podnieść temperaturę wody o określoną wartość należy dostarczyć 3200 razy więcej ciepła niż dla powietrza. Natomiast przy takich samych masach wody i powietrza, dla ogrzania wody o określoną wartość potrzeba czterokrotnie więcej ciepła.

Temperaturę i ciepło opisuje się przy użyciu różnych jednostek. Temperaturę mierzy się i podaje w stopniach Celsjusza lub w kelwinach (system metryczny) albo w stopniach Fahrenheita lub Rankine'a (system imperialny). W systemie metrycznym, ciepło określa się w dżulach lub w kaloriach (cal): jedna kaloria to ilość ciepła potrzebna do ogrzania jednego grama wody o jeden stopień Celsjusza. W systemie imperialnym, jednostką ciepła jest BTU (*British Thermal Unit* - Brytyjska Jednostka Ciepła).

Woda może pochłoniąć więcej ciepła niż powietrze nie tylko dzięki budowie polarnej, ale także dzięki różnicy gęstości. **Gęstość** jest miarą masy danej substancji w przeliczeniu na jednostkę objętości. Gdy porównamy masy jednakowych objętości różnych substancji, substancja gęstsza będzie cięższa. Na przykład, masa jednego litra wody słodkiej wynosi 1 kg, zaś masa tej samej objętości powietrza - 1,3 g, czyli 0,0013 kg. Łatwo wyliczyć, że woda jest ok. 770 razy gęstsza od powietrza ($0,0013 \text{ kg} \cdot 770 = 1,001 \text{ kg}$).

Ciepło przepływa z jednej substancji do innej trzema sposobami, dwa z których mają dla ciebie znaczenie w czasie pobytu pod wodą: 1) przewodzenie, 2) konwekcja, 3) promieniowanie.

Zero i zero bezwzględne

Na poziomie morza, według skali Celsjusza woda zamarza w temperaturze 0°C , i wre w 100°C . Według starszej skali Fahrenheita, powszechnie stosowanej w krajach anglosaskich, wartości te (odpowiednio, 32°F i 212°F) te mogą wydawać się arbitralne - ale w rzeczywistości nie są. Choć historia ustalania skali Fahrenheita nie jest dokładnie znana, wydaje się, że Gabriel Fahrenheit wybrał 0 jako punkt zamarzania równoobjętościowej mieszaniny soli i śniegu, zaś na 96° ustalił temperaturę ludzkiego ciała. Przy tych założeniach, temperatura wrzenia wyniosłaby 212° .

Naukowcy używają dwóch innych systemów pomiaru temperatury - Kelvina i Rankine'a. Obie te skale mają ten sam punkt zerowy - zero bezwzględne, czyli temperaturę, przy której zatrzymują się ruchy cząsteczek. Nic nie może być zimniejsze niż 0 K (zwróć uwagę, że nie używa się znaku stopnia ($^{\circ}$) przy zapisie temperatury w kelwinach) bądź 0°R . Zero bezwzględne jest wartością o dużym znaczeniu w fizyce - względne właściwości substancji w różnych temperaturach muszą być porównywane do zera bezwzględnego. Zobaczysz to, gdy będziemy omawiać związki między objętością, ciśnieniem i temperaturą gazów.

Skala Kelvina jest podobna do skali Celsjusza, za wyjątkiem przesunięcia punktu zerowego do zera absolutnego. 0 K równe jest -273°C , czyli żeby przeliczyć wartości ze skali Celsjusza na skalę Kelvina, należy dodać 273, a aby przeliczyć temperaturę w K na $^{\circ}\text{C}$, trzeba odjąć 273.

Analogicznie, skala Rankine'a jest odpowiednikiem skali Fahrenheita, ale z wartością 0 w temperaturze zera bezwzględnego. 0°R jest równe -460°F

Przewodzenie

dotyczy przekazywania ciepła przez bezpośredni kontakt. Przykładem może być łyżeczka zanurzona w gorącej herbacie, której rączka jest chłodna przed jej umieszczeniem w filiżance, ale po chwili staje się zbyt gorąca by ją dotykać. Szybko poruszające się cząsteczki wody w herbacie przekazują część swojej energii cząsteczkom metalu w zanurzonej części łyżeczki. Następnie, rozgrzane - wzbudzone - cząsteczki z zanurzonej części łyżeczki przekazują część energii w górę, aż do chwili, gdy cała łyżeczka osiągnie mniej-więcej jednakową temperaturę. Substancje dobrze przewodzące ciepło w ten sposób określane są jako dobre przewodniki ciepła.

Chociaż powietrze przewodzi ciepło, i nieraz może nam się wydawać bardzo ciepłe lub zimne, w porównaniu z większością innych substancji jest dobrym **izolatorem** - substancją, która ogranicza przekazywanie ciepła przez przewodzenie. Z tego powodu suche skafandry zapewniają lepszą izolację termiczną niż mokre skafandry - ciało nurka otoczone jest izolującą warstwą powietrza zatrzymaną w ocieplaczu.

Z drugiej strony, woda jest znakomitym przewodnikiem ciepła, odprowadzającym je ponad dwudziestokrotnie szybciej od powietrza. Nie tylko ma większą pojemność cieplną od powietrza, ale także szybciej przewodzi ciepło. Dlatego podczas nurkowania potrzebujesz skafandra we wszystkich wodach, oprócz tych najcieplejszych.

Konwekcja

dotyczy przekazywania ciepła przez płyny. Określenie „**płyn**” dotyczy materii, która może przepływać - czyli cieczy i gazów, ale nie ciał stałych. Podczas ogrzewania płynu będącego w kontakcie z ciepłym obiektem obniża się jego gęstość, i ma on tendencję do unoszenia się ku górze. Odptywający, ogrzany płyn jest zastępowany przez napływający, chłodniejszy płyn. Powoduje to stały, ciągły przepływ płynu wokół zanurzonych obiektów cieplejszych od otoczenia, który skutkuje szybszym odprowadzaniem ciepła niż wynikałoby to z zachodzenia samego tylko zjawiska przewodzenia. Tak więc, podczas nurkowania w chłodnej wodzie bez izolującego skafandra, skóra nurka ogrzewa otaczającą warstewkę wody. Ogrzana woda unosi się do góry, i jest zastępowana przez napływającą, chłodną wodę, która szybko się ogrzewa - i tak cykl się zamyka. Dlatego w trakcie nurkowania stale krąży wokół ciebie zimna woda, nawet gdy pozostajesz w bezruchu, a woda jest spokojna.



Konwekcja to sposób przekazywania ciepła przez płyny. W trakcie nurkowania, woda ogrzana od skóry nurka staje się mniej gęsta, i unosi się - a na jej miejsce wpływa woda chłodniejsza. Dlatego nawet gdy płetwonurek pozostaje w całkowitym bezruchu w zupełnie spokojnym zbiorniku, woda krąży wokół jego ciała, odprowadzając ciepło

Promieniowanie

dotyczy przekazywania ciepła w postaci fal elektromagnetycznych. Ten właśnie rodzaj ciepła odbierasz jako ciepło „promieniujące” od słońca albo od ogniska. Przekazywanie ciepła przez promieniowanie ma niewielkie znaczenie podczas nurkowania - ale jednak występuje. Trzymając rękę o kilka centymetrów od niektórych podwodnych źródeł światła dużej mocy, możesz poczuć wypromieniowywane przez nie ciepło.

Woda a światło

Widzisz dzięki temu, że twoje oko zbiera fale świetlne odbite od przedmiotów, i przekształca ich energię na impulsy nerwowe przekazywane do mózgu, gdzie są interpretowane. Ponieważ zachowanie światła zmienia się podczas przechodzenia przez wodę, woda wpływa na to, jak daleko jesteś w stanie widzieć, ale też na ostrość widzenia, odbiór kolorów, i na postrzeganie odległości.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Zmieniając zachowanie światła, woda ma wpływ na twoje postrzeganie rzeczywistości. Pod wodą, przedmioty mogą się wydawać położone bliżej lub dalej niż w rzeczywistości, zmianie może też ulegać ich kolor. Jeżeli interesujesz się fotografią podwodną, zrozumienie interakcji między wodą a światłem pozwoli ci uzyskać kolorowe, ostre zdjęcia.

Mętność i dyfuzja.

Chociaż zaledwie około 20% światła z powierzchni dociera na głębokość 10 metrów, jest go wystarczająco dużo, aby na otwartym morzu umożliwić fotosyntezę nawet do głębokości 100 metrów. Z drugiej strony, duże ilości cząstek zawiesiny mogą całkowicie odciąć dopływ światła już na głębokości rzędu 3 m.

Względne stężenie zawieszonych cząstek określane jest jako **mętność wody**. Zawieszone cząstki mogą być organiczne, jak np. organizmy planktoniczne, albo nieorganiczne - jak wzburzone osady denne (muł). Mętność może wynikać z naturalnych procesów, takich jak opad deszczu, albo być efektem niekorzystnych zaburzeń, jak na przykład skażenie środowiska. Bez względu na przyczynę, im wyższa mętność, tym mniej światła przenika przez wodę i tym gorsza jest widoczność. Gdy pytasz divemastera przed nurkowaniem „Jaka dziś widoczność?”, pośrednio pytasz właśnie o mętność wody.

Woda rozprasza i odbija światło, które to zjawisko określane jest jako **rozpraszanie**. Rozpraszanie zachodzi nawet w bardzo czystej wodzie, przyczyniając się do ograniczenia ilości przenikającego światła. Światło odbija się od zawieszonych w wodzie cząstek i przez nie jest rozpraszane, co powoduje jego bardziej równomierny rozkład. Dlatego cienie są pod wodą mniej wyraźne, a czasami brak ich całkowicie. Również właśnie na skutek rozpraszania przedmioty położone dalej od ciebie mogą się wydawać nieco rozmyte i niewyraźne; odbite od nich światło, podróżujące przez wodę, zbacza lekko z linii prostej. Im większa mętność, tym silniejsze rozpraszanie.

Pochłanianie barw.

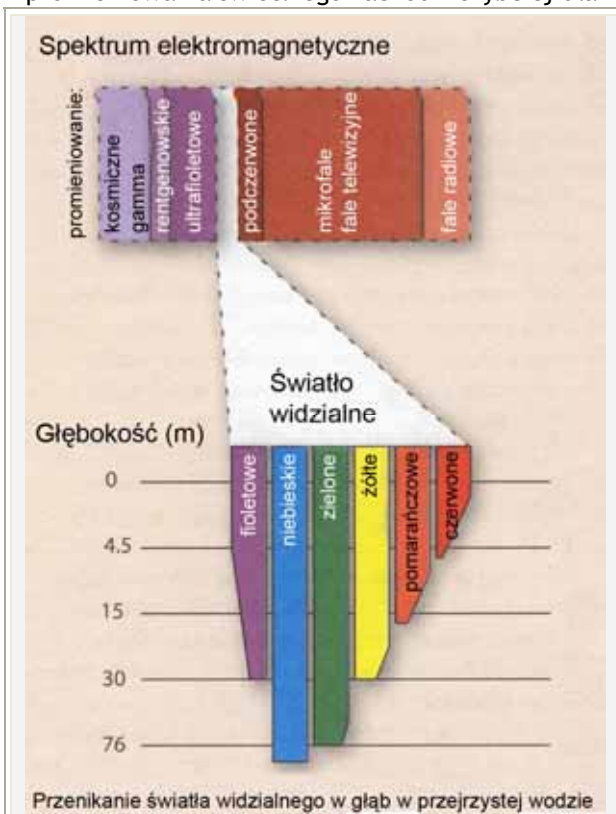
Aby zrozumieć zjawisko pochłaniania barw przez wodę, należy najpierw wyjaśnić naturę światła i to, jak twoje oko odbiera światło. Światło jest formą energii elektromagnetycznej, i dlatego podróżuje w postaci fal; długość fali światła jest zależna od jej energii. W zależności od długości fal elektromagnetycznych, mają one różne nazwy (np. promieniowanie X, fale radiowe, światło

widzialne...). Większość z nich jest niewidzialna, jak promieniowanie ultrafioletowe, podczerwone, promieniowanie X, mikrofałe, promieniowanie kosmiczne itp. Nasze oczy mogą odbierać jedynie wąski fragment całego spektrum - długości fal od ok. 400 nm (nanometrów) do ok. 760 nm. Różnice w obrębie tego zakresu postrzegamy jako kolory. Gdy światło białe, złożone z pełnego zakresu długości fal, trafia na dany przedmiot, fale o pewnych długościach są pochłaniane, a inne - odbijane. Kolor danego przedmiotu w naszych oczach zależy od stopnia pochłaniania przez niego fal świetlnych o różnych długościach. Jeżeli odbija fale o wszystkich długościach, jego kolor odbieramy jako biały. Jeżeli pochłania wszystkie długości fal, postrzegamy obiekt jako czarny.

Jak wspomniano, długości fal mają ścisły związek z ilością niesionej przez nie energii. Fale o długościach odpowiadających kolorom bliskim „czerwonego” krańca spektrum (długości bliskie 760 nm) mają niższą energię niż fale odpowiadające kolorom z „fioletowego” krańca spektrum (długości bliskie 400 nm).

Patrząc na pełne spektrum, włącznie z promieniowaniem niewidzialnym, promieniowanie podczerwone (IR) ma bardzo niską energię, a promieniowanie ultrafioletowe (UV) - wysoką energię.

Woda, nawet bardzo przejrzysta, absorbuje przechodzące przez nią fale świetlne, przekształcając niesioną przez nie energię w ciepło. Jednak fale o różnych długościach są pochłaniane w różnym stopniu, a dokładniej promieniowanie o niższej energii jest pochłaniane szybciej. W związku z tym, kolory bliższe „czerwonego” końca spektrum pochłaniane są szybciej niż kolory z „fioletowego” krańca spektrum - i dlatego czerwień jest pierwszym kolorem, który podczas zanurzenia przestaje być widoczny. Na głębokościach większych niż 4 metry zazwyczaj nie widać już czerwonej barwy. Nie oznacza to oczywiście, że na głębokości 4 m kolor czerwony jest nagle „wygaszany”; po prostu, bardzo mało fal świetlnych odpowiadających tej barwie dociera na tę głębokość. Absorbpcja promieniowania świetlnego jest ciągłym procesem - na głębokość 4 m dociera mniej fal świetlnych odpowiadających wszystkim barwom niż na 2 m, gdzie z kolei jest ich mniej niż na 1 m, i tak dalej. Ten ciągły proces absorpcji promieniowania świetlnego zachodzi szybciej dla fal o niższej energii.



W miarę zanurzenia, najszybciej przestajemy widzieć kolor czerwony, następnie pomarańczowy, żółty i zielony. Ten zanik kolorów jest powodem, dla którego fotografowie podwodni używają aparatów z lampą błyskową nawet w bardzo dobrych warunkach świetlnych. Światło z lampy błyskowej zazwyczaj przebywa w wodzie krótki dystans, w dużym stopniu zachowując wyjściowy rozkład długości fal - i dzięki temu może przywrócić barwy utracone z powodu pochłaniania światła słonecznego przez wodę. Jest to niezbędne przy robieniu dobrej jakości zdjęć - mimo tego, że współczesne aparaty cyfrowe mogą w pewnym stopniu korygować utratę kolorów z głębokością (więcej informacji w dalszej części rozdziału).

Płetwonurkowie zazwyczaj wiążą pochłanianie barw przez wodę wraz z głębokością. Tymczasem w rzeczywistości jest ono funkcją całkowitej odległości przebytej przez światło w wodzie. Na przykład, gdy jesteś w bardzo przejrzystej wodzie na głębokości 2 metrów, czerwony przedmiot położony tuż obok ciebie będzie wydawał się czerwony. Jeśli jednak odpuścisz 3 metry od niego, jego barwa będzie dla ciebie brązowa. Wynika to z faktu, że całkowity dystans przebyty przez światło w wodzie wynosi 5 metrów - 2 metry od powierzchni wody do obiektu, i 3 metry od obiektu do twojego oka - i po drodze większość fal świetlnych odpowiadających za

czerwoną barwę została zaabsorbowana przez wodę. Jest to jeden z powodów, dla których pod wodą większość fotografów i kamerzystów używa obiektywów szerokokątnych, które pozwalają im podpuścić blisko fotografowanego obiektu i tym samym zmniejszyć dystans, jaki światło lampy błyskowej przebywa w wodzie.

Z zakresu światła widzialnego, czysta woda w największym stopniu przepuszcza promieniowanie o długości fali ok. 480 nm - które twoje oczy postrzegają jako światło niebieskie. Natomiast w mętnej wodzie, najmniej pochłaniane są fale odpowiadające za barwę żółto-zieloną. Zjawisko to tłumaczy, dlaczego przejrzysta, czysta woda ma kolor niebieski, a woda mętna ma barwę żółto-zieloną. Zjawisko pochłanianie kolorów wpływa na łatwość postrzegania przedmiotów poprzez działanie nie tylko na postrzeganie barw, ale także na ich kontrastowość. Zawsze łatwiej jest zauważyć obiekty wyróżniające się od otoczenia. Tymczasem, jak wykazały eksperymenty, parametry wody takie jak jej mętność, głębokość, zasolenie, wielkość zawieszonych cząstek i stopień zanieczyszczenia, wpływają na absorpcję światła, i tym samym na kontrasty. Wynika to z faktu, że wszystko co wpływa na widoczność kolorów, wpływa też na postrzegane kontrasty między nimi. Na przykład, na powierzchni czerwona naklejka będzie się mocno wyróżniać na ciemnozielonym tle butli, lecz na głębokości 30 metrów ich kolory mogą się wydać takie same. Będzie trudniej zauważyć naklejkę, gdyż nie będzie ona już kontrastować z tłem.

Kolory fluorescencyjne postrzegamy nieco inaczej, gdyż, po pierwsze, ich długości fal nie są częste pod wodą, a po drugie, promieniowanie fluorescencyjne nie jest po prostu odbijane, ale emitowane przez niektóre obiekty pod wpływem pobudzenia przez fale o krótszej długości (zjawisko fluorescencji). Z tego powodu, obiekty fluorescencyjne zachowują pod wodą swoje kolory, i wyróżniają się od innych obiektów na tej samej głębokości. Dlatego właśnie producenci sprzętu nurkowego często używają materiałów o właściwościach fluorescencyjnych - i tak samo czyni natura. Na przykład, ukwiały z rodzaju *Coryanthus* postrzegamy jako czerwone także na większych głębokościach, ponieważ ich tkanki zawierają naturalne substancje o właściwościach fluorescencyjnych.

Zboczmy teraz z fizyki nieco w stronę fizjologii, gdyż postrzeganie kolorów pod wodą wiąże się ze sposobem funkcjonowania twoich oczu. Przy słabym świetle, źrenice rozszerzają się, zwiększając ilość światła docierającego do wnętrza oka. Gdy są już całkowicie rozwarte, twoje oko dalej się adaptuje, przełączając między typami fotoreceptorów - światłoczułych komórek występujących w twojej siatkówce. Twoje oczy zazwyczaj używają fotoreceptorów czopków przy pełnym świetle, i bardziej czułych pręcików przy słabym świetle (nazwy czopków i pręcików pochodzą od ich kształtu).

Pręciki pozwalają na widzenie przy bardzo słabym świetle, ale nie mają zdolności odbierania kolorów, i słabszą zdolność wychwytywania szczegółów niż czopki. Dlatego przy słabym świetle podwodny świat może się wydawać jeszcze mniej kolorowy. Zmiany proporcji czopków i pręcików zaczynają być zauważalne po mniej-więcej 10 minutach od wejścia do ciemnego pomieszczenia, chociaż przy przejściu z pełnego światła do niemal całkowitej ciemności, pełna adaptacja może wymagać ponad pół godziny. Aby wspomóc te procesy adaptacji, zwłaszcza podczas nocnego nurkowania, niektórzy płetwonurkowie (szczególnie wojskowi) przed wejściem do wody noszą czerwone okulary lub przebywają w czerwonym świetle przez 10-20 minut od wejścia do wody.



To samo zdjęcie wykonane bez i z podwodną lampą błyskową. Lampa jest źródłem promieniowania o długościach fal nie docierających na tę głębokość - pochłoniętych przez wodę, zapewniając żywe kolory zdjęcia

Zarówno przy silnym, jak i przy słabym świetle zachodzą jeszcze inne procesy adaptacyjne. Twój system wzrokowy (oczy i mózg) dostosowują się do w taki sposób, że kolor światła wokół ciebie postrzegasz jako biały (w pewnych granicach!). Na przykład, często stosowane w domach żarówki emitują światło żółto-czerwone, ale o ile nie koncentrujesz się specjalnie na tym, postrzegasz białą ścianę oświetloną tym światłem jako biało, nie jako żółto-czerwoną.



W tkankach ukwiała *Corynactis* występuje naturalny barwnik fluorescencyjny, który nadaje mu intensywnie czerwony kolor, nawet na głębokości

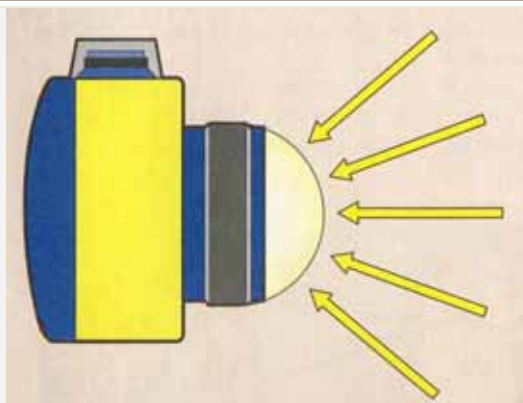
Pod wodą, te procesy w pewnym stopniu redukują efekt pochłaniania barw przez wodę. Dlatego podwodne zdjęcia zrobione bez lampy błyskowej wydają się znacznie bardziej niebieskie niż pamiętałeś - twój system wzrokowy skompensował utracone, pochłonięte przez wodę kolory, ale aparat nie. Jest to szczególnie wyraźne w aparatach analogowych, na film; współczesne aparaty cyfrowe używają często automatycznego balansu bieli, który częściowo kompensuje utratę kolorów - podobnie jak twój system wzrokowy.

Refrakcja.

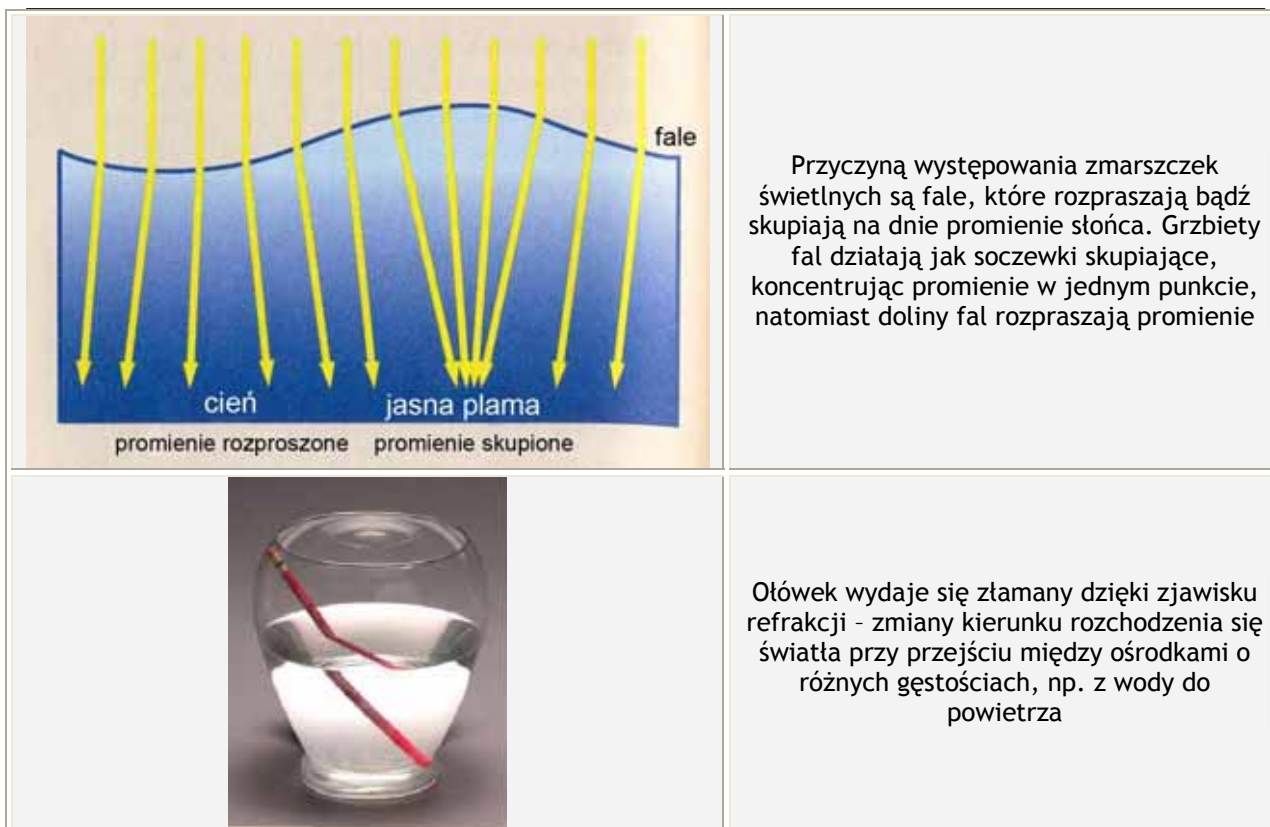
Inną właściwością światła, która dotyczy cię pod wodą, jest **refrakcja**, czyli zmiana kierunku fali świetlnej przy przejściu przez granicę pomiędzy ośrodkami o różnych gęstościach, takimi jak na przykład powietrze i woda. Refrakcja występuje dzięki różnicy prędkości przemieszczania się światła w ośrodkach o różnej gęstości - co powoduje zmianę trasy, którą podróżuje światło. Jedyną sytuacją, w której nie następuje zmiana kierunku przemieszczania się fal świetlnych na granicy ośrodków, jest ta, w której światło przechodzi przez granicę pomiędzy ośrodkami dokładnie pod kątem prostym. Chociaż refrakcja w różnych substancjach zachodzi w różny sposób, dla pletwonurków najbardziej istotne jest załamywanie fal świetlnych na granicy między powietrzem i wodą.



Refrakcja zachodzi, gdy światło zmienia kierunek biegnięcia podczas przejścia z wody do powietrza. W efekcie, pod wodą obiekty wydają się bliżej położone lub większe niż w rzeczywistości, w zależności od tego, jak twój mózg interpretuje obraz



Port kopolowy na obudowie aparatu anuluje wpływ zjawiska refrakcji, gdyż wszystkie promienie świetlne padają na port pod kątem 90° . Problemem jest to, że wszystkie przedmioty wydają się położone znacznie bliżej niż w rzeczywistości - zazwyczaj w odległości około metra, w zależności od rodzaju portu



Pod wodą, pletwonurków dotyczy przede wszystkim refrakcja podczas przechodzenia światła z wody do szkła twojej maski, a następnie do powietrza wewnątrz maski lub obudowy aparatu. Na skutek refrakcji, przedmioty znajdujące się pod wodą są powiększone, tak że wydają się znajdować bliżej niż w rzeczywistości w stosunku mniej-więcej 4:3 (odległość rzeczywista - odległość pozorna). Na przykład, ryba odległa o 4 m będzie sprawiać wrażenie, że znajduje się jedynie 3 metry od ciebie. Można zatem powiedzieć, że woda przybliża przedmioty o 25% w stosunku do odległości rzeczywistej, lub powiększa je o 33% w stosunku do rzeczywistego rozmiaru. Świeżo upieczeni pletwonurkowie, sięgający po jakiś przedmiot w wodzie, nieraz chybają - właśnie na skutek refrakcji. Z doświadczeniem, większość nurków nieświadomie przyzwyczajają się do tego zjawiska.

Powiększający efekt refrakcji może wpływać nie na postrzeganie pozornej odległości, ale pozornych rozmiarów. To, czy pod wodą postrzegasz obiekty jako znajdujące się bliżej, czy jako większe, zależy od tego, czy twój mózg interpretuje obraz jako będący rzeczywistych rozmiarów, lecz położony bliżej, albo jako większy, lecz znajdujący się w tej samej odległości. Wpływają na to parametry takie jak informacje na temat rzeczywistego dystansu, widoczność, twoja znajomość środowiska oraz rodzaj obiektu który obserwujesz.

Generalnie, aparat do zdjęć podwodnych odbiera obraz w ten sam sposób, jak ty w masce. Dlatego należy ustawiać ostrość na odległość pozorną, a nie na rzeczywistą odległość do fotografowanego obiektu (system autofokusa robi to automatycznie). Powiększenie wynikające z refrakcji zmniejsza kąt widzenia aparatu, powodując lekki efekt teleobiektywu. Dlatego większość podwodnych fotografów używa obiektywów o najkrótszej dostępnej ogniskowej - czyli najszerszym możliwym kącie - ale niekiedy stosuje się obudowy z portem kopułowym (*dome port*). Ma to związek bezpośrednio z refrakcją, a właściwie z przeciwdziałaniem jej.

Jak wspomnieliśmy, promień światła nie ulega refrakcji przy przejściu przez granicę pomiędzy substancjami o różnych gęstościach pod kątem prostym. Z portem kopułowym na obiektywie, do którego światło zawsze dochodzi pod kątem prostym, efekt refrakcji jest eliminowany i możliwe jest zachowanie szerokiego kąta widzenia - korzystne pod wodą. Niepożądanym efektem portów kopułowych jest ustawianie punktu ostrości sztucznie blisko, zazwyczaj w odległości około metra - jednak nie jest to duży problem, gdyż ostrość ustawiasz (lub ustawia ją aparat) w odległości postrzeganej.

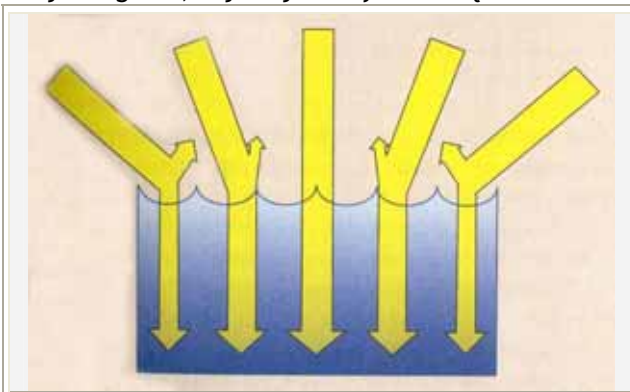
Innym efektem refrakcji są poruszające się szybko „zmarszczki” świetlne, dobrze widoczne na płaskim, piaszczystym dnie, których układ zmienia się wraz z układem fal na powierzchni. Różne części fali działają podobnie jak soczewki skupiające bądź rozpraszające; podczas gdy fale przechodzą nad dnem, grzbiety fal skupiają promienie świetlne, tworząc na dnie jasne, przemieszczające się obszary.

Efekt Tyndalla.

Chociaż dzięki zjawisku refrakcji przedmioty pod wodą generalnie wydają się położone bliżej niż w rzeczywistości, w mętnej wodzie mogą się wydawać położone dalej niż naprawdę. To zjawisko opisywane jest jako **efekt Tyndalla** (*visual reversal*). Wynika ono z procesów widzenia, a to, jak twój mózg interpretuje docierający do niego obraz, zależy od przezroczystości wody, kontrastów, i ilości światła. Ponieważ powietrze pochłania światło wolniej niż woda, w powietrzu światło musi przebyć bardzo duże odległości zanim pochłanianie kolorów i dyfuzja fal świetlnych znacząco wpłyną na odbierany przez nas obraz. Jedynie bardzo odległe obiekty wydają się rozmyte, o obniżonym kontraście. W związku z tym, podświadomie odbieramy, że jeśli obiekt jest rozmyty i mało kontrastowy, to musi znajdować się bardzo daleko.

Jednak w pewnych warunkach woda może powodować podobne efekty jak duża odległość na powierzchni - dyfuzję, pochłanianie barw i spadek kontrastu. Dlatego twój system wzrokowy zazwyczaj odbiera rozmyte, mało kontrastowe przedmioty o zubożonych kolorach jako położone bardzo daleko. Jednak ponieważ grubość warstwy wody potrzebna do wywołania tego efektu jest nieduża, obiekty postrzegane pod wodą jako bardzo odległe mogą w rzeczywistości znajdować się całkiem blisko. To jest właśnie wpływ efektu Tyndalla.

Dzięki zjawiskom refrakcji, dyfuzji i pochłaniania barw, oraz przez właściwości naszego układu wzrokowego, obiekt znajdujący się pod wodą może być odbierany albo jako znajdujący się bliżej, albo dalej niż w rzeczywistości. Generalnie, w im mniejszej odległości znajduje się przedmiot, tym większe prawdopodobieństwo że będzie sprawiał wrażenie położonego bliżej niż w rzeczywistości. Analogicznie, im dalej obiekt się znajduje, tym większa jest szansa, że wyda nam się położony w większej odległości niż w rzeczywistości. Jednak w miarę nurkowania, nasze umysły wprowadzają poprawki na oba te zjawiska - gdy nabierzesz doświadczenia pod wodą, zaczniesz postrzegać obiekty jako znajdujące się w tej odległości, w jakiej rzeczywiście są.



Światło w największym stopniu przenika do wody wtedy, gdy promienie świetlne padają na powierzchnię wody pod kątem prostym. Im ostrzejszy kąt padania, tym większa część promieni świetlnych ulega odbiciu

Odbicie.

Gdy światło pada na obiekt, może się od niego **odbić**. To, czy światło zostanie odbite, zależy przede wszystkim od koloru obiektu. Przedmioty czarne lub bardzo ciemne pochłaniają dużą część promieniowania świetlnego, odbijając niewiele. Przedmioty białe lub o jasnych barwach odbijają znaczną część padającego na nie światła. Natomiast obiekty o właściwościach refleksyjnych, takie jak lustro, pozornie będą miały tę samą barwę co padające na nie światło, gdyż odbijają niemal 100% padającego na nie promieniowania.

Niektóre substancje, jak na przykład woda, mogą odbijać lub przepuszczać światło, w zależności od kąta padania promieni świetlnych. Światło przenika do wody, ale wraz z malejącym kątem padania promieni na powierzchnię wody, proporcjonalnie coraz większa część światła ulega odbiciu, a mniejsza - pochłonięciu. Dlatego właśnie pod wodą najjaśniej jest między godziną 10 a 14, kiedy to słońce znajduje się w najwyższym punkcie nieba, jego światło pada na powierzchnię wody pod dużym kątem, i znaczna

jego część przenika do wody. Rano i po południu, gdy słońce znajduje się nisko, większa część promieni świetlnych ulega odbiciu, i proporcjonalnie mniej przenika do wody. Jeżeli robisz podwodne zdjęcia lub kręcisz filmy video, wiesz zapewne, że najlepsze warunki świetlne są właśnie pomiędzy godziną 10 a 14.

Woda i dźwięk

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Dźwięk rozchodzi się w wodzie szybciej niż w powietrzu, co utrudnia określenie kierunku z którego dochodzi. Dlatego zazwyczaj nie jesteś w stanie zlokalizować przepływającej w pobliżu łodzi na podstawie dźwięku jej silnika, mimo że samą łódź możesz usłyszeć z większej odległości niż na powierzchni.

Podobnie jak światło, dźwięk jest formą energii, przemieszczającą się w postaci fal. Jednak światło jest jedną z form energii elektromagnetycznej, podczas gdy dźwięk jest formą energii mechanicznej. Różnica ta jest istotna, gdyż energia elektromagnetyczna może istnieć w oderwaniu od materii i przemieszczać się zarówno w materii, jak i w próżni, dźwięk zaś i inne formy energii mechanicznej mogą istnieć i przemieszczać się tylko w materii.

Dźwięk powstaje, gdy jakieś zaburzenie spowoduje utworzenie fali lub zespołu fal w danym ośrodku. Fala bądź grupa fal może przemieszczać się pomiędzy ośrodkami - na przykład dźwięk mający źródło pod wodą może przemieścić się do dna łodzi, i następnie w powietrze. Gdy fale powodują wibrację wody lub powietrza w sąsiedztwie twojej błony bębenkowej, twoje ucho może zamienić część tej energii na impulsy nerwowe, które odbierasz jako dźwięk.



Sprężystość substancji określa, na ile skutecznie przewodzą one dźwięk. Porównaj wzbudzenie fali poprzez potrząśnięcie napiętej liny i gumowej taśmy: fala szybciej i dalej przemieści się w gumowej taśmie dzięki jej sprężystości

Dźwięk może przemieszczać się w każdym rodzaju materii. Generalnie, najszybciej przemieszcza się w gęstych ośrodkach, takich jak ciała stałe i ciecze - posiadających gęściej upakowane cząsteczki, między którymi fala może być efektywnie przekazywana. Jednak to nie gęstość, a **sprężystość** substancji jest cechą, która określa efektywność przewodzenia przez nie dźwięku. Porównaj wzbudzenie fali poprzez potrząśnięcie napiętej liny i gumowej taśmy: fala szybciej i dalej przemieści się w gumowej taśmie dzięki jej sprężystości. Ponieważ zazwyczaj gęste substancje mają większą sprężystość, często łączy się dobre przewodzenie dźwięku z dużą gęstością ośrodka. Chociaż do celów nurkowych to uproszczenie bywa przydatne, zasada ta nie jest uniwersalna ani technicznie poprawna. Na przykład, ołów i węgiel pomimo znacznej gęstości nie przewodzą dobrze dźwięku, właśnie ze względu na małą sprężystość. Podobnie, koc ma większą gęstość niż powietrze, lecz zawieszony w poprzek pokoju tłumi dźwięki zamiast je wzmacniać - większość tkanin ma małą sprężystość.

Prędkość dźwięku zależy od substancji, w której fale dźwiękowe się rozchodzą, na prędkość może też wpływać temperatura i ciśnienie. Dźwięk w ogóle nie może rozchodzić się w próżni (czyli wówczas, gdy brak materii). W suchym powietrzu, na poziomie morza i przy temperaturze 20 °C, dźwięk przemieszcza się z prędkością około 343 metrów na sekundę. W słodkiej wodzie o temperaturze 25 °C, prędkość dźwięku wynosi w przybliżeniu 1497 metry na sekundę, a w wodzie morskiej o zasoleniu 35‰ i tej samej temperaturze mniej więcej 1550 m/s.²

² Wartości pochodzą ze strony http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound (przyp. tłum.)

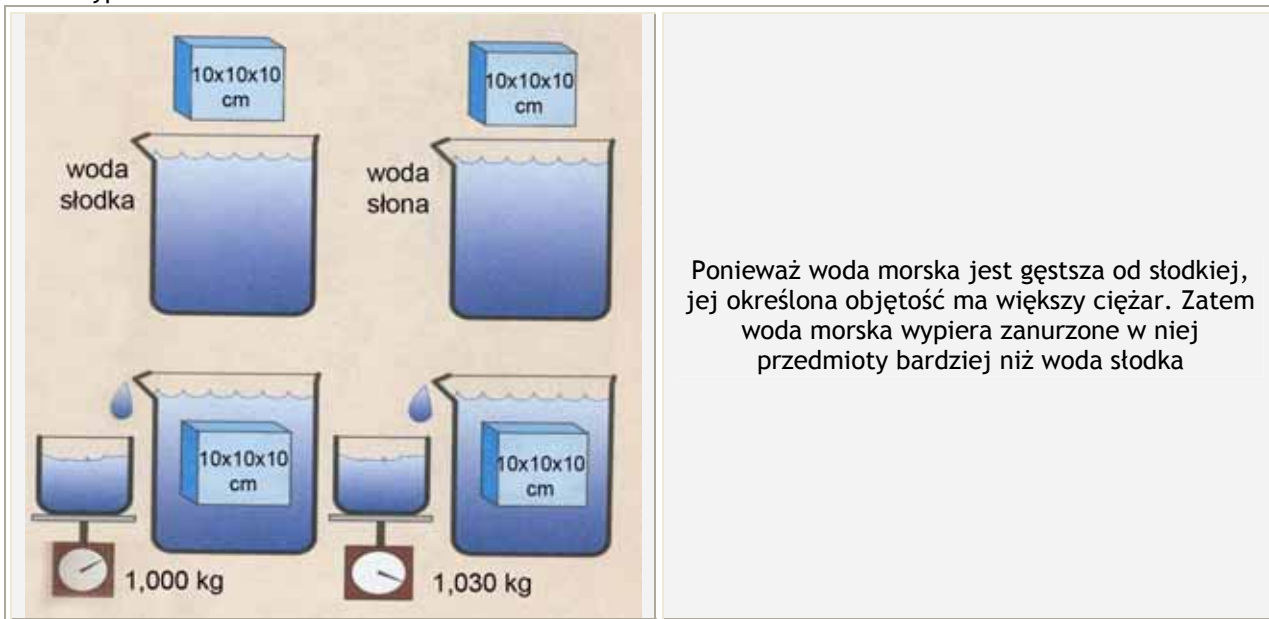


Chociaż dźwięk słabo przenika z powietrza do wody, nurkowie rebreatherowi mogą niekiedy „pogadać” - gdy mówią głośno, i znajdują się blisko siebie. Jest to możliwe dzięki bardzo cichej pracy rebreatherów, która umożliwia usłyszenie dźwięków o niewielkiej sile, które przenikają z wydychanego przez nurków powietrza do wody

Ta mniej-więcej czterokrotna różnica w prędkościach rozchodzenia się dźwięku w wodzie i w powietrzu powoduje, że zazwyczaj pod wodą masz problemy w rozpoznaniu kierunku, z którego dźwięk dochodzi. Twój mózg określa położenie źródła dźwięku w oparciu o drobne różnice w sile i czasie odebrania dźwięku przez każde z twoich uszu. Pod wodą, twój mózg nie jest w stanie wykryć różnic w sile dźwięku i czasie jego odbioru przez lewe i prawe ucho, i uznaje, że dochodzi on dokładnie z ponad głową. Jednak w zależności od częstotliwości dźwięku, jego siły, odległości od jego źródła i niektórych innych zmiennych, można niekiedy stosunkowo dokładnie wskazać kierunek, z którego dźwięk dochodzi. Chociaż dźwięk może przechodzić z jednego ośrodka do innego, na przykład z powietrza do wody, znaczna część jego energii jest rozpraszana przy przechodzeniu przez granicę między ośrodkami o różnych gęstościach. Z tego właśnie powodu możesz nie usłyszeć głosu kolegi wołającego cię znad powierzchni, chociaż sam znajdujesz się na głębokości zaledwie kilkudziesięciu centymetrów. Przeszkody dla rozchodzenia się dźwięku mogą się pojawić w obrębie jednego ośrodka. Wspominaliśmy wcześniej o uwarstwieniu wody spowodowanym przez różnice temperatury lub zasolenia poszczególnych warstw; ta różnica gęstości może stanowić znaczną przeszkodę dla rozchodzącego się dźwięku. Obecność termokliny bądź halokliny może znacząco wpłynąć na słyszalność dźwięku pod wodą: możesz dobrze słyszeć odgłosy pochodzące ze stosunkowo odległego źródła znajdującego się w tej samej warstwie wody, lecz znacznie słabiej odbierać ten sam dźwięk, gdy źródło jest tuż pod lub nad tobą, ale w innej warstwie. To, w jakim stopniu uwarstwienie wody wpływa na rozchodzenie się dźwięku, zależy od różnic gęstości i od cech dźwięku. Efekt jest jednak na tyle silny, że wojskowe łodzie podwodne przebywają często w głębszych, gęstszych warstwach wody, gdyż utrudnia to ich wykrycie przez sonary. Właśnie ze względu na opory przy przechodzeniu dźwięku z powietrza do wody, nie możesz zazwyczaj rozmawiać z innymi osobami w trakcie nurkowania. Twoje struny głosowe wytwarzają dźwięk w powietrzu, i ciężko jest sprawić, by na tyle dużo energii dźwiękowej przeniknęło do wody, aby zagłuszyć hałas automatu i wydychanych bąbli - a zwiększenie siły głosu powoduje zwiększenie ilości bąbli! Elektroniczny sprzęt do komunikacji podwodnej pozwala przezwyciężyć ten problem, przetwarzając głos na sygnał elektroniczny, odbierany i ponownie przetwarzany na głos ludzki przez sprzęt partnera. Te urządzenia są jednak właściwie dwustronnymi radiami, a nie sposobem przenoszenia głosu ludzkiego przez wodę. Jeżeli jednak nurkujesz na rebreatherze o obiegu zamkniętym, sytuacja wygląda inaczej. Twój głos wciąż w niewielkim tylko stopniu przechodzi z powietrza do wody, ale sam rebreather jest bardzo cichy. Nawet bez specjalnego sprzętu ty i twój partner możecie zazwyczaj rozmawiać, pod warunkiem, że mówicie wystarczająco głośno i pozostajecie blisko siebie.

Pływalność i „nieważki” świat

Chociaż wielu pływających lubi rozwdzić się o pływaniu w stanie „nieważkości”, z fizycznego punktu widzenia zanurzony pływacz nie jest bynajmniej nieważki. Pod wodą grawitacja przyciąga ciało nurka z taką samą siłą jak na lądzie. Dlatego właśnie, pod wodą jesteś w stanie wskazać górę i dół - inaczej niż astronauta w stanie rzeczywistej nieważkości. Także jeśli nieruchomo zawieszysz w toni, twoje ciało przyjmie pozycję, w której środek ciężkości będzie znajdował się najniżej. Jednak chociaż z technicznego punktu widzenia nie jesteś nieważki, wrażenie podczas nurkowania jest podobne do odczuwanego w stanie rzeczywistej nieważkości, gdyż siłę ciężkości przeciwstawia się równoważąca ją siła wyporu.



Ponieważ woda morska jest gęstsza od słodkiej, jej określona objętość ma większy ciężar. Zatem woda morska wypiera zanurzone w niej przedmioty bardziej niż woda słodka

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Kontrola pływalności jest tym, co wyróżnia dobrego pływacza. Zrozumienie zasad rządzących pływalnością pozwala ci na przewidzenie, jak zmiany twojej wagi i objętości lub gęstości wody wpłyną na twoją pływalność.

Prawo Archimedesesa

Zapewne masz ogólne wyobrażenie o tym, czym jest pływalność, ale zajmiemy się tym terminem bardziej dokładnie. Pływalność jest to zdolność utrzymywania się ciała w toni wodnej (albo w innej cieczy lub gazie), wynikająca z przeciwstawnego działania dwóch sił, siły ciężkości i siły wyporu³. Siła wyporu jest siłą skierowaną ku górze, działającą na każdy obiekt zanurzony w płynie - cieczy albo gazie. Chociaż czytając ten tekst znajdujesz się przypuszczalnie na lądzie, siła wyporu wciąż działa na ciebie, ponieważ jesteś zanurzony w płynie - powietrzu. W tym wypadku, siła wyporu ma bardzo niedużą wartość, zaniedbywalną w porównaniu z wartością działającą na ciebie siły ciężkości. Jednak wielki balon na ogrzane powietrze unosi się właśnie dzięki sile wyporu, tej samej która powoduje, że podnosisz się w toni po dodaniu powietrza do jacketu.

Siłę wyporu po raz pierwszy opisał Archimedes - grecki matematyk, i stąd pochodzi nazwa odpowiedniego prawa - prawo Archimedesesa. Zgodnie z współczesnym jego brzmieniem, *na ciało całkowicie lub częściowo zanurzone w płynie (cieczy lub gazie) działa pionowa, skierowana ku górze siła wyporu, której wartość jest równa ciężarowi wypartego płynu.*

Oznacza to, że wartość skierowanej ku górze siły wyporu zależy od ilości wypartego płynu i od masy tego płynu. Im gęstszy płyn, tym większa wartość siły wyporu przypadająca na określoną objętość tego płynu.

³ W języku angielskim, jeden termin (*buoyancy, buoyant*) określa pływalność i wypór. W języku polskim, pojęcia te są wyraźnie różne, i konieczne było ich rozdzielenie (przyj. tłum.)

W trakcie nurkowania, z oczywistych względów jesteśmy najbardziej zainteresowani wpływem gęstości wody na pływalność. Woda morska ze względu na rozpuszczoną sól jest gęstsza niż woda słodka: jeden litr wody słodkiej waży 1,000 kilograma, natomiast jeden litr wody morskiej waży około 1,030 kilograma (w zależności od stopnia jej zasolenia). Ta różnica pomiędzy wodą słodką i słoną może wydawać się niewielka, jednak to przez nią potrzebujesz więcej obciążenia podczas nurkowania w morzu niż podczas nurkowania w jeziorze, nawet jeśli używasz tego samego skafandra i reszty sprzętu.

Legenda Archimedesesa

Zgodnie z legendą, Archimedes wymyślił swe słynne prawo, gdy król Syrakuz nakazał mu zbadać, czy jego nowa korona jest wykonana z czystego złota. Archimedes nie mógł w żaden sposób uszkodzić korony. Gdy wszedł do wanny, zauważył, że poziom wody się podnosi - i to podsunęło mu myśl, by porównać ciężar i ilość wody wypartej przez koronę z czymś wykonanym z czystego złota. Chociaż jest to ładna historyjka, wątpi w nią większość historyków i inżynierów. Przede wszystkim, przy wielkości korony, różnica pomiędzy masą złota a masami innych metali byłaby zbyt mała, aby zmierzyć ją dostępnymi wówczas metodami. Dlatego najprawdopodobniej Legenda Archimedesesa jest tylko legendą

Względna gęstość⁴

Zdolność substancji stałych i płynów do unoszenia się na powierzchni wody (lub do tonięcia w niej), zależy od **gęstości obiektu względem wody**, czyli od stosunku gęstości obiektu i wody, w której jest zanurzony. Czysta woda słodka (o gęstości 1000 gramów na litr) jest standardem, i oczywiście jej gęstość względem wody wynosi 1. Przedmioty o gęstości poniżej 1000 gramów na litr, czyli gęstości względem wody poniżej 1, w wodzie słodkiej będą się unosić; w ich wypadku, skierowana ku górze siła wyporu będzie mieć większą wartość niż skierowana w dół siła ciężkości. Obiekty o gęstości większej od wody (ponad 1000 g na litr), czyli o gęstości względem wody słodkiej większej od 1, w wodzie słodkiej będą tonąć: siła wyporu będzie mieć mniejszą wartość od siły ciężkości. Obiekty o gęstości równej gęstości wody, czyli o gęstości względem wody równej 1,00, nie będą w czystej wodzie ani tonąć, ani pływać, i pozostaną zawieszony w toni - pod warunkiem, że nie będą działać na nie inne siły, nie będzie prądów itp. W tym wypadku, siły ciężkości i wyporu będą mieć tę samą wartość, i będą się wzajemnie równoważyć.

⁴ Oryginalny tytuł tego rozdziału brzmi *specific gravity*. Jest to wielkość fizyczna określająca stosunek gęstości obiektu do gęstości wody słodkiej, powszechnie używana w Ameryce Północnej, ale nie w Europie. Dlatego w przekładzie opisałem te same prawa fizyczne używając stosowanych w Polsce pojęć (przyp. tłum.)



To, czy masz pływalność dodatnią, ujemną czy neutralną, zależy od twojej gęstości (wraz z ekwipunkiem) względem otaczającej wody. Dodawanie i spuszczenie powietrza z jacketu zwiększa lub zmniejsza twoją całkowitą objętość, a zatem i twoją gęstość względem wody. Pozwala ci to kontrolować pływalność w trakcie nurkowania

W trakcie kursu na podstawowy stopień nurkowy, zapoznałeś się zapewne z określeniami **pływalność dodatnia, ujemna i neutralna (zerowa)**. Obiekt, który w wodzie się unosi, ma pływalność dodatnią; taki, który tonie, ma pływalność ujemną; zaś taki, który ani nie tonie, ani się nie unosi, ma pływalność neutralną, czyli zerową. W czasie nurkowania, próbujesz osiągnąć ten trzeci stan - pływalność zerową, która pozwala ci poruszać się w wodzie z największą skutecznością, bez tracenia energii podczas nurkowania na pokonywanie siły wyporu (lub grawitacji).

Pływalność twojego ciała zależy od proporcji, w jakich występują w nim różne tkanki, z których każda ma określoną gęstość. Na przykład, gęstość tkanki tłuszczowej względem wody wynosi 0,7-0,9; dla kości ta wartość wynosi około 1,9, a dla mięśni około 1,08. Każdy człowiek ma nieco inną budowę, i w zależności od czynników takich jak stosunek ilości tkanki tłuszczowej do tkanki mięśniowej, jego gęstość względem wody będzie różna. Większość z nas ma gęstość bliską gęstości wody, czyli pływalność bliską zerowej. Jednak osoby z większą ilością tkanki tłuszczowej często mają gęstość względem wody niższą niż 1 i unoszą się na powierzchni, zaś umięśnione osoby z niewielką ilością „tłuszczu” mogą mieć gęstość względem wody wyższą niż 1, i w związku z tym pływalność ujemną. Jednak sprzęt nurkowy, a zwłaszcza mokre lub suche skafandry, mimo niewielkiej masy wypierają znaczną ilość wody, zwiększając gęstość względną nurka i znacząco zwiększając pływalność. W skafandrze suchym lub w pełnym skafandrze mokrym, nawet osoba z bardzo niewielką ilością tkanki tłuszczowej będzie musiała wziąć dodatkowe obciążenie celem zrównoważenia dodatkowej siły wyporu działającej na skafander.



Gdy jesteś prawidłowo wyważony, to na wdechu, z pustym jacketem i prawie pustą butlą, będziesz się unosił zanurzony do poziomu oczu

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Ilość balastu, jakiej będziesz potrzebować w czasie nurkowania, zależy będzie od tego, czy nurkujesz w słodkowodnym zbiorniku, czy też w morzu. Nurkując w wodzie o innym zasoleniu niż poprzednio będziesz musiał dołożyć lub odjąć nieco ołowiu. Podobnie, będziesz musiał od nowa się wyważyć po zmianie skafandra. Dodatkowo, niektóre osoby potrzebują więcej balastu niż inne, nawet nurkujące w podobnym sprzęcie. Decydują o tym prawa fizyki - pływalność zależy od stosunku średniej gęstości ciała nurka do gęstości wody.

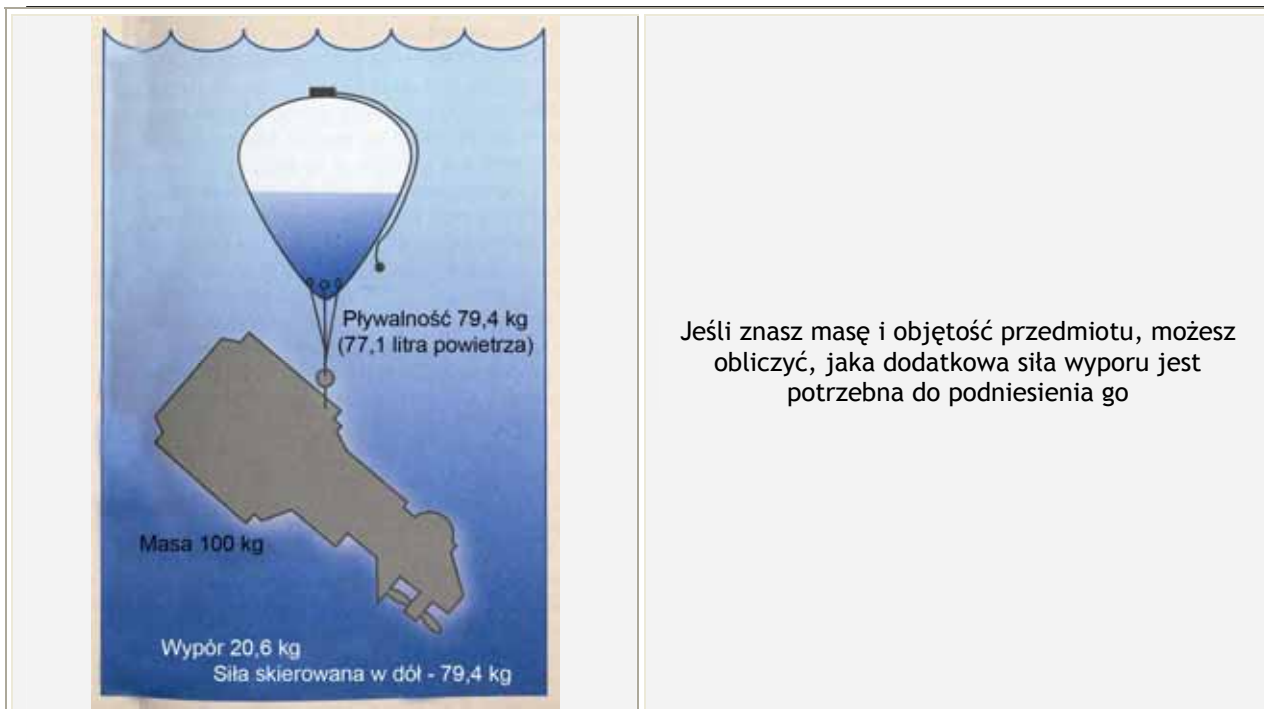
Zauważ, że dotąd pisaliśmy o nurkowaniu w wodzie słodkiej. Częściej jednak nurkujemy w wodzie morskiej, o większej gęstości niż woda słodka. Litr wody morskiej waży około 1030 gram, ma ona zatem względną gęstość wobec wody słodkiej równą 1,03. Oznacza to, że przedmiot o gęstości względem wody słodkiej równej 1,00, w wodzie morskiej będzie miał pływalność dodatnią, nie neutralną. Aby miał neutralną pływalność w wodzie morskiej, jego gęstość względem wody słodkiej musiałaby wynosić 1,03. Dodatkowo, zarówno w wodzie „słodkiej”, jak i w wodzie morskiej z różnych miejsc, zawartość soli, i co za tym idzie gęstość wody, mogą się istotnie różnić.

Dlatego w praktyce nurkowie nie próbują określić swojej gęstości względem wody i dopasować jej do stanowiska nurkowego. Jedynym skutecznym sposobem określenia potrzebnej ilości balastu w nowym środowisku lub w nowej konfiguracji sprzętowej jest sprawdzenie pływalności - wyważenie. Jak zapewne pamiętasz, w trakcie wyważania tak dostosowujesz ilość balastu, by z prawie pustą butlą (30 bar) i całkowicie pustym jacketem, na wydechu zanurzać się, a na wdechu unosić się na powierzchni z głową wynurzoną do poziomu oczu. Jeżeli wyważasz się z pełną butlą, powinieneś dodać następnie około dwóch kilogramów ołowiu, tak by zrekompensować spadek masy związany ze zużyciem powietrza w trakcie nurkowania.

Zastosowania praktyczne

Zrozumienie zagadnienia pływalności pozwala ci rozwiązywać rzeczywiste problemy podczas nurkowania. Wyobraź sobie, że chcesz odzyskać duży, ciężki i kosztowny silnik zaburtowy, który pechowo spadł do morza. Jeżeli określisz kilka parametrów silnika, będziesz mógł łatwo wyliczyć, ile pływalności będziesz potrzebował do podniesienia silnika z dna na powierzchnię. W podręczniku użytkownika znalazłeś informację, że silnik na powierzchni waży 100 kg. Chcesz wiedzieć, jaką dodatkową siłę wyporu (oprócz siły wyporu już działającej na zatopione urządzenie) musisz przyłożyć, by zrównoważyć działającą na silnik siłę ciężkości.

Po pierwsze, musisz określić bieżącą pływalność, która jest równa masie wody wypartej przez zanurzony przedmiot. Wyobraźmy sobie, że nasz silnik wypiera 20 litrów wody, która waży 20,6 kg. Zatem skierowana w górę siła wyporu działająca na silnik ma wartość odpowiadającą 20,6 kg. Przeciwdziała jej działająca w dół siła ciężkości, o wartości odpowiadającej masie 100 kg. Aby unieść silnik z dna, musimy zbilansować przeciwstawne siły działające na nasz przedmiot. Zatem, aby silnik stał się neutralnie pływalny, musi do niego zostać przyłożona działająca w górę siła, która zneutralizuje pozostałą pływalność ujemną o wartości $100 \text{ kg} - 20,6 \text{ kg} = 79,4 \text{ kg}$.



Jeśli znasz masę i objętość przedmiotu, możesz obliczyć, jaka dodatkowa siła wyporu jest potrzebna do podniesienia go

Generalnie, przy obliczeniach zaniedbujemy masę worka wypornościowego (*lift bag*), którego użyjemy do podnoszenia przedmiotów. Aby więc wyliczyć ilość wody, którą musimy przemieścić by całkowicie zrównoważyć siłę grawitacji, dzielimy pozostałą ujemną pływalność przez gęstość wody: $79,4 \text{ kg} \div 1,03 \text{ kg na liter} = 77,1 \text{ litra}$. Taką właśnie objętość wody musimy usunąć z worka wypornościowego. W praktyce, pletwonurek usunąłby tę objętość wody przez dodanie tej ilości powietrza do worka, i dodatkowo niewielkiej ilości potrzebnej do zrównoważenia ciężaru samego worka.

Być może zauważyłeś, że w powyższych obliczeniach zaniedbaliśmy masę powietrza. Teoretycznie, masa powietrza zwiększa wartość skierowanej w dół siły grawitacji. W praktyce jednak jest to wielkość tak mała, że śmiało można ją zaniedbać. Zazwyczaj w podobnych obliczeniach przeprowadzanych w celach nurkowych traktujemy wypełnione gazem przestrzenie tak, jakby były puste.

Pod ciśnieniem

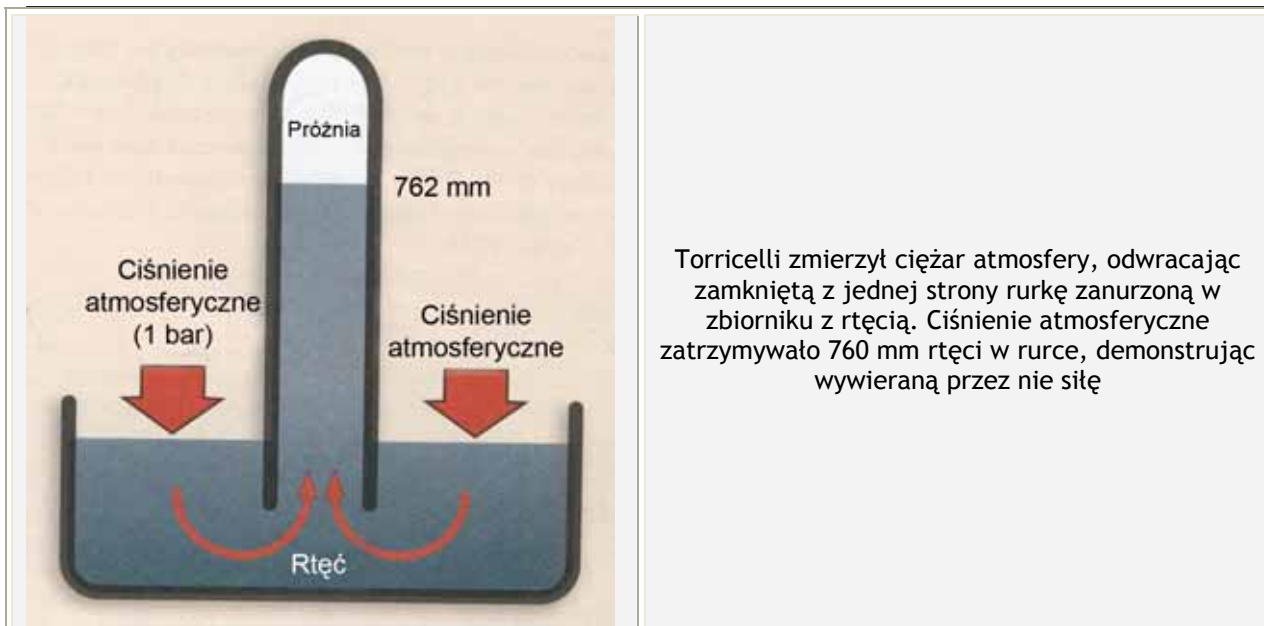
Ciśnienie jako siła

Większość ludzi zdaje sobie sprawę, że zanurzający się pletwonurek jest wystawiony na działanie zwiększonego ciśnienia. Także osoby nie nurkujące zazwyczaj miały do czynienia ze zwiększonym ciśnieniem pod wodą - gdy podczas nurkowania na zatrzymanym oddechu na basenie odczuwały ucisk w uszach na głębokości dwóch czy trzech metrów (choć mogły nie wiedzieć, jak wyrównać ciśnienie w uszach i pozbyć się dyskomfortu).

Ciśnienie to wielkość fizyczna opisująca siłę działającą na jednostkę powierzchni. Zgodnie z definicją fizyczną,

$$\text{ciśnienie} = \text{siła} \div \text{powierzchnia}$$

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Gazy ulegają sprężaniu i rozprężaniu pod wpływem zmian ciśnienia. Wpływ gazów używanych podczas nurkowania na twoje ciało także jest proporcjonalny do ciśnienia. Aby przewidzieć ten wpływ na podstawie praw gazowych, musisz umieć określić ciśnienie na danej głębokości.



Torricelli zmierzył ciężar atmosfery, odwracając zamkniętą z jednej strony rurkę zanurzoną w zbiorniku z rtęcią. Ciśnienie atmosferyczne zatrzymywało 760 mm rtęci w rurce, demonstrując wywieraną przez nie siłę

Ciśnienie atmosferyczne.

Ciśnienie może być wywierane na wiele sposobów, na przykład przez nacisk twojej dłoni na powierzchnię stołu. W nurkowaniu, zazwyczaj jesteśmy zainteresowani ciśnieniem gazów którymi oddychamy, i ciśnieniem otaczającej nas wody.

Na powierzchni, działa na Ciebie ciśnienie wywierane przez atmosferę ziemską, wynikające z ciężaru powietrza. Galileusz, włoski badacz z epoki renesansu, pierwszy wykazał że powietrze ma ciężar, a Evangelista Toricelli, włoski matematyk, wywnioskował, że jeśli atmosfera otacza wszystko i człowiek żyje na dnie tego „morza powietrza”, jego ciało nieustannie wystawione jest na ciśnienie zewnętrzne. W jego klasycznym eksperymencie, zanurzona w zbiorniku z rtęcią menzurka, przy próbie wyjęcia jej ze zbiornika, „zasysa” rtęć. Ciężar rtęci powoduje powstanie próżni w górnej części menzurki, przy czym maksymalna wysokość słupa rtęci w menzurce może wynieść około 760 mm, co odpowiada ciśnieniu 1,03 kilograma na centymetr kwadratowy. Toricelli uznał, że wielkość ta odpowiada ciśnieniu wyieranemu przez atmosferę, które „próbuje” wepchnąć rtęć do środka menzurki. W każdym razie, dawniej ciśnienie oznaczano właśnie w milimetrach słupa rtęci (mm Hg).

Ciśnienie wody.

W trakcie nurkowania działa na Ciebie ciśnienie wody, zwane też **ciśnieniem hydrostatycznym**. Jest ono spowodowane ciężarem wody naciskającej na Ciebie, w taki sam sposób, w jaki ciężar powietrza wywołuje ciśnienie atmosferyczne. Kilkadziesiąt lat po Torricellim, w podobnym eksperymencie francuski naukowiec Blaise Pascal wykazał, że ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza jest równe ciśnieniu wyieranemu przez słup wody morskiej o wysokości 10 metrów. Można to wyliczyć przy użyciu prostej matematyki.

Litr - czyli sześcian o wymiarach 10 cm × 10 cm × 10 cm - wody morskiej waży około 1,03 kg. Powierzchnia dolnej części sześcianu wynosi 10 cm × 10 cm = 100 cm². Aby wyliczyć ciśnienie dziesięciocentymetrowego słupa wody na jeden centymetr kwadratowy powierzchni dna, dzielimy 1,03 przez 100 cm², otrzymując 0,0103 kg/cm². Ciśnienie wywierane przez jednometrowy słup wody morskiej jest dziesięciokrotnie większe - wynosi 0,103 kg/cm². Dzieląc wartość ciśnienia atmosferycznego przez tę wielkość, możemy wyliczyć ile metrów wody wywiera ciśnienie równe atmosferycznemu: 1,030 kg/cm² ÷ 0,103 kg/cm² = 10. Zatem, 10 metrów słonej wody wywiera ciśnienie równe atmosferycznemu.

Terminologia dotycząca ciśnienia.

W zależności od twoich potrzeb, możesz mierzyć i zapisywać ciśnienie na wiele różnych sposobów, przy czym wielu z nich nie stosuje się w nurkowaniu. Wśród płetwonurków najczęściej słyszy się o barach, atmosferach i psi (system imperialny - funty na cal kwadratowy, *pounds per square inch*). Nieco rzadziej wyraża się ciśnienie w metrach lub stopach wody słodkiej albo słonej. Omówimy tutaj różne zwroty używane przy obliczaniu ciśnienia.

Najbardziej podstawową jednostką ciśnienia jest **atmosfera** lub **bar**, zapisywane w skrócie jako **atm** lub **bar**. Jedna atm/bar jest wartością ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza. Wprawdzie te dwie jednostki nie są dokładnie równoważne - jest pomiędzy nimi różnica ok. 1,3% - ale dla celów nurkowych możemy zignorować tę różnicę i przyjąć, że atm i bar są tym samym.

Ciśnienie absolutne (*absolute pressure*) to miara przyjmująca za zero ciśnienie w próżni. Jest to wartość całkowitego ciśnienia, którą zazwyczaj używasz do opisanie wpływu ciśnienia na gazy nurkowe i na twoje ciało. Z kolei, **ciśnienie względne** (*gauge pressure*) przyjmuje za punkt zerowy wartość 1 atm/bar, jest więc różnicą pomiędzy ciśnieniem całkowitym a ciśnieniem atmosferycznym. Używasz tej wielkości przy określaniu przydatnego ciśnienia, ją właśnie wskazuje większość manometrów i głębokociomierzy. Aby uzmysłowić sobie różnicę, wyobraź sobie, że manometr założony na pustą butlę nurkową wskazuje 0. Gdy odkręcisz zawór, gaz nie przepływa - ciśnienie na zewnątrz i wewnątrz butli jest takie samo, a ciśnienie względne wynosi 0 atm/bar. Jednak w butli jest powietrze - bezwzględne ciśnienie w tej butli wynosi 1 atm lub 1 bar, tyle samo co na zewnątrz.

Aby podkreślić różnicę między ciśnieniem absolutnym i względnym, na manometrach wyskalowanych w systemie metrycznym są zazwyczaj dodane słowa *absolute* lub *gauge* - o ile nie wynika to z kontekstu. Z kolei, jednostki ciśnienia na manometrach wyskalowanych w systemie imperialnym często zakończone są na literę „a” (*absolute*) lub „g” (*gauge*): ciśnienie absolutne w atmosferach zapisuje się jako **ata**, a ciśnienie wyrażone w funtach na cal kwadratowy może być zapisane jako **psia** (*absolute*) lub **psig** (*gauge*).

W systemie metrycznym, ciśnienie w butlach zazwyczaj określane jest w barach. Z kolei, funty na cal kwadratowy - *pounds per square inch* (psi, psia, psig), to jednostki ciśnienia powszechnie stosowane w systemie imperialnym do określania ciśnienia w butlach. Płetwonurkowie rzadko stosują kilogramy na centymetr kwadratowy (kg/cm^2), choć ta jednostka często stosowana jest przez naukowców.

Zarówno w systemie metrycznym, jak i imperialnym, ciśnienie bywa wyrażane poprzez głębokość - metry słonej wody (*metres of seawater*, msw), metry słodkiej wody (*metres of freshwater*, mfw), stopy słonej wody (*feet of seawater*, fsw) lub stopy słodkiej wody (*feet of freshwater*, ffw). Ten sposób określania ciśnienia ma zastosowanie na przykład przy określaniu maksymalnego ciśnienia wytrzymywanego przez obudowy do aparatów i kamer podwodnych.

Odpowiedniki ciśnienia

1 bar = 0,987 atmosfery
 1 bar = 14,5 psi
 1 bar = 10 metrów słonej wody
 1 bar = 1,02 kg/cm^2
 1 atm = 1,013 bar
 1 atm = 14,7 psi
 1 atm = 33 stopy słonej wody
 1 atm = 34 stopy słodkiej wody
 1 atm = 1,03 kg/cm^2
 1 metr słonej wody = 0,100 bar
 1 metr słodkiej wody = 0,097 bar

Uwagi:

1 bar i 1 atmosfera to wartości na tyle zbliżone, że zazwyczaj - również w tej książce - traktowane są jako równoważne.

Powyższe wartości i przeliczniki podane są w przybliżeniu. Na przykład, 1 atm to dokładnie 33,8995 stopy słonej wody - jednak przedstawiona dokładność w zupełności wystarcza dla celów nurkowych.

Ciśnienie a ciała stałe i ciecze

Materia we wszystkich stanach skupienia jest potencjalnie ściśliwa. Na poziomie atomowym, nawet w bardzo gęstych substancjach takich jak ołów czy uran, jest znacznie więcej pustej przestrzeni niż wypełniających ją cząstek elementarnych. Może się to wydawać zadziwiające, zważywszy na to, jak gęsta i ciężka wydaje się ołowiana sztabka. Jednak w gwiazdach neutronowych materia, ściśnięta przez niewyobrażalną siłę grawitacji, staje się tak gęsta, że przyniesiona na Ziemię łyżeczka od herbaty materii z jądra takiej gwiazdy ważyłaby około miliarda ton! Daje to pewne wyobrażenie na temat stopnia, w jakim kompresowalna jest materia otaczająca nas na Ziemi.

Oczywiście, siły niezbędne do skompresowania materii w takim - ani nawet w znacznie mniejszym - stopniu nie istnieją na Ziemi. Zatem mimo iż materia jest ściśliwa, w zakresie ciśnień występujących w nurkowaniu można przyjąć, że ciecze i ciała stałe są praktycznie nieściśliwe. Ciecze, choć nieściśliwe, mogą jednak przewodzić i wywierać ciśnienie - jak już się dowiedziałeś. Natomiast gazy są w dużym stopniu ściśliwe.

Zgodnie z prawem Pascala, ciśnienie zewnętrzne wywierane na powierzchnię wody (lub innej cieczy) jest rozprawdane równo we wszystkich kierunkach. Na tej właśnie zasadzie działają wszystkie urządzenia hydrauliczne. Pompy przenoszą ciśnienie na ciecz hydrauliczną w tłoku podnośnika; przekazywane ciśnienie sprawia, że tłok się unosi, podnosząc dźwigany obiekt. Podnośniki hydrauliczne mogą stosować ogromne siły tylko dzięki przykładaniu potrzebnego ciśnienia.

Zdolność przenoszenia ciśnienia przez ciecze dotyczy ciebie na dwa najważniejsze sposoby. Po pierwsze, na danej głębokości oddziałuje na ciebie ciśnienie atmosferyczne, plus ciśnienie wywierane przez całą wodę ponad tobą. Zatem, w celu określenia ciśnienia absolutnego na danej głębokości, musisz najpierw wyliczyć ciśnienie hydrostatyczne, a następnie dodać wartość ciśnienia atmosferycznego. Na przykład, na głębokości 10 metrów ciśnienie absolutne wynosi 2 bary:

**1 bar ciśnienia hydrostatycznego + 1 bar ciśnienia atmosferycznego
= 2 bary ciśnienia absolutnego**

W miarę zanurzania, ciśnienie rośnie o 1 bar co 10 metrów w słonej wodzie, lub co 10,3 metra w wodzie słodkiej. Ponieważ woda jest nieściśliwa, ta wartość pozostaje stała bez względu na głębokość. Ponieważ ten związek między głębokością a ciśnieniem pozostaje niezmienny, łatwo możesz określić ciśnienie absolutne na dowolnej głębokości. Na przykład, ciśnienie na głębokości 30 metrów wynosi:

30 msw ÷ 10 msw = 3 bar

**3 bary ciśnienia hydrostatycznego + 1 bar ciśnienia atmosferycznego
= 4 bary ciśnienia absolutnego**

Gdy znasz już ciśnienie absolutne w barach, możesz przeliczyć je na kilogramy na centymetr kwadratowy, mnożąc ciśnienie w barach przez 1,03 aby otrzymać wartość w kg/cm^2 . Tak więc, w słonej wodzie na głębokości 240 metrów ciśnienie absolutne wynosi 25 barów, czyli $25,75 \text{ kg}/\text{cm}^2$:

$$(240 \text{ msw} \div 10 \text{ msw}) + 1 \text{ bar} = 25 \text{ bar}$$

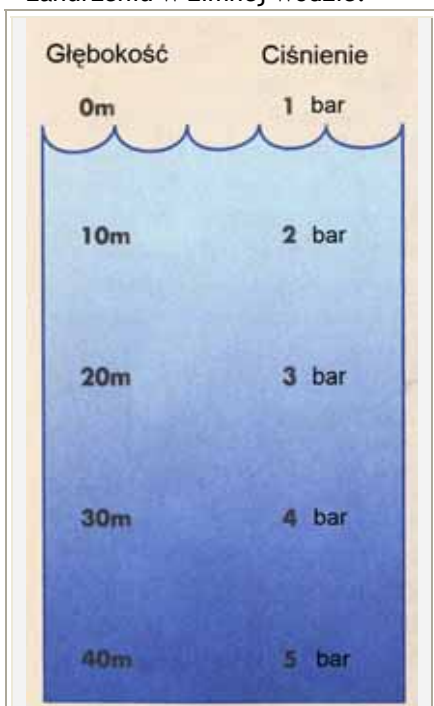
$$25 \text{ bar} \times 1,03 = 25,75 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

Ponieważ tkanki ciała składają się w większości z wody, a woda przewodzi ciśnienie, w trakcie nurkowania działające na nas zewnętrzne ciśnienie jest rozprawdane równomiernie i nie odczuwamy bezpośredniego nacisku wody. Dlatego nurkowie mogą wytrzymać duże ciśnienia panujące pod wodą. Odczuwasz wpływ ciśnienia jedynie w przestrzeniach powietrznych ciała - i dlatego w trakcie kursu na stopień podstawowy uczysz się wyrównywać ciśnienie pomiędzy nimi a środowiskiem zewnętrznym, co pozwala uniknąć dyskomfortu i urazów.

Ciśnienie a zachowanie gazów

Większość dotyczących nas pod wodą efektów ciśnienia ma związek z zachowaniem gazów. Gdy zmieniamy głębokość zanurzając się lub wynurzając, gaz w naszych przestrzeniach powietrznych i w naszym sprzęcie zmienia objętość, wpływając na naszą pływalność i fizjologię. Ciśnienie wpływa też na

tempo absorpcji gazów przez nasze tkanki, przez co musisz ograniczać czas pobytu pod wodą, tak by mieścić się w limitach wyznaczonych przez tabele bądź komputery nurkowe. Również temperatura ma wpływ na ciśnienie gazów - w butli rozgrzanej na słońcu jest większe ciśnienie niż w tej samej butli po zanurzeniu w zimnej wodzie.



Ciśnienie rośnie liniowo wraz z głębokością. Co 10 metrów, wartość ciśnienia absolutnego wzrasta o 1 bar

Kinetyczna teoria gazów.

Zrozumienie zachowanie gazów i pojęcie ciśnienia jest możliwe dzięki kinetycznej teorii gazów. Zapewne pamiętasz, że energia kinetyczna to energia mechaniczna ruchu. Gazy zachowują się w określony sposób właśnie dzięki ruchowi swoich cząsteczek.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Prawa gazowe dotyczą w taki sam sposób praktycznie wszystkich gazów. Dzięki kinetycznej teorii gazów możesz zatem stosować te same wzory dla obliczania konsumpcji gazu podczas oddychania powietrzem i nitroksenem, mimo że zawartość tlenu i azotu w tych gazach się różni.

Na poziomie molekularnym, w porównaniu z ciałami stałymi i cieczami, w gazach są stosunkowo duże odległości pomiędzy cząsteczkami. Jednak cząsteczki te są w ciągłym ruchu, nieustannie uderzając o siebie nawzajem i o inne objekty: w wypełnionym gazem naczyniu w temperaturze pokojowej i przy ciśnieniu 1 bar, w każdej sekundzie ponad 300 000 000 000 000 000 000 000 000 cząsteczek gazu uderza w każdy centymetr kwadratowy powierzchni ścianki. Ciśnienie gazu jest efektem siły uderzania wszystkich tych cząsteczek.

Energia kinetyczna cząsteczki gazu zależy od jej prędkości - powiązanej z temperaturą, oraz od masy - zależnej od rodzaju substancji. Większe i szybciej poruszające się cząsteczki cięższych gazów wywierają większą siłę przy uderzeniu. Jak dowiedziałeś się wcześniej, temperatura jest miarą prędkości poruszania się cząsteczek; im wyższa temperatura, z tym większą prędkością poruszają się cząsteczki, częściej uderzając w objekty - i

wywierając większe ciśnienie.

Co może wydawać się ciekawe, gazy o cząsteczkach o różnej masie, lecz o tym samym cieple wywierają takie samo ciśnienie na ścianki. Cząsteczki o większej masie cząsteczkowej poruszają się wolniej, więc sumarycznie wywierają takie samo ciśnienie na ścianki jak gazy o mniejszej masie cząsteczkowej, poruszające się z większymi prędkościami. Temperatury są różne (jak pamiętasz, ciepło to nie to samo co temperatura). Na przykład, w lekkim gazie takim jak hel, po dostarczeniu pewnej ilości ciepła, cząsteczki przyspieszają w większym stopniu niż w cięższym tlenie. Mimo to, zmiana ciśnienia byłaby taka sama. Cięższy tlen, którego cząsteczki poruszają się znacznie wolniej, wywiera takie samo ciśnienie dzięki zwiększonej masie cząsteczkowej.

Różne gazy, w tej samej temperaturze i ciśnieniu zachowują tę wzajemną relację między prędkością i masą molekuly. Cząstki w lżejszych gazach poruszają się szybciej. Z kinetycznej teorii gazów wynika, że porcja gazu w określonej temperaturze ma energię kinetyczną taką jak ta sama ilość molekuł innego gazu w tej samej temperaturze (mowa o tzw "gazach idealnych", ale to przybliżenie jest prawidłowe przy ciśnieniu i temperaturze z jakimi mamy do czynienia podczas nurkowania).

Wyobraź sobie piłkę do tenisa i piłkę do koszykówki. Jeżeli rzucisz jedną i drugą z taką samą siłą, lżejsza piłeczka do tenisa poruszać się będzie szybciej, zaś cięższa koszykowa - wolniej. Jednak obie piłki uderzą o ścianę z taką samą siłą, ponieważ obie piłki - lżejsza i szybciej poruszająca się tenisowa oraz ciężka, wolno lecąca koszykowa - będą mieć taką samą energię.

Poza temperaturą i ciśnieniem, zachowanie gazu jest zależne od jego objętości. Wyobraź sobie balon wypełniony gazem. Po ściśnięciu jego objętość maleje, i cząsteczki gazu zbliżają się do siebie. Częściej zderzają się ze sobą nawzajem i ze ściankami balonu, a tę zwiększoną częstość zderzeń postrzegamy jako zwiększone ciśnienie. Analogicznie, jeżeli rozciągamy ten balon (bez dodawania gazu), jego objętość przy rozprężaniu zwiększa się. Powoduje to, że średnie odległości między cząsteczkami zwiększają się, maleje częstość zderzeń, i przez to zmniejsza się ciśnienie.

Ten związek pomiędzy prędkością a masą sprawia, że wszystkie gazy odpowiadają w ten sam sposób na zmiany temperatury, objętości i ciśnienia. Oznacza to, że bez względu na to, z jakim gazem masz do czynienia, zachowuje się on w ten sam sposób co inne gazy z punktu widzenia najważniejszych praw gazowych.



Jeżeli rzucisz lekką piłeczkę do tenisa i ciężką piłkę koszykową z taką samą siłą, obie uderzą o ścianę z taką samą siłą, choć piłka do tenisa lecieć będzie szybciej. Podobnie, zgodnie z Kinetyczną Teorią Gazów, w różnych gazach ogrzanych w takim samym stopniu nastąpi taki sam wzrost ciśnienia

No dobrze, prawie. Zasada, według której wszystkie gazy mają takie same właściwości w odniesieniu do relacji między zmianą ciśnienia a zmianą temperatury, to prawo gazów idealnych. Stwierdza ono, że wszystkie gazy zachowują się zgodnie z tymi samymi, idealnymi prawami. Jednak w rzeczywistości tak nie jest - dzięki indywidualnym właściwościom cząsteczek różnych gazów, związanych np. z ich kształtem, zachowanie gazów nieco odbiega od modelu. Na przykład, niektóre gazy w większym stopniu ulegają sprężeniu przy wzroście ciśnienia niż wynikałoby to z prawa gazów idealnych. Z tego powodu fizycy często stosują prawo gazów rzeczywistych, uwzględniające indywidualne cechy różnych gazów. Prawo gazów rzeczywistych bardziej precyzyjnie opisuje zachowanie różnych gazów, ale jest nieporównanie bardziej złożone matematycznie. Na szczęście, w warunkach w których mamy do czynienia podczas nurkowania, prawo gazów idealnych wystarczająco dokładnie opisuje zachowanie gazów rzeczywistych. Różnice między gazami wynikające z ich indywidualnych właściwości nie mają większego zastosowania nawet w warunkach temperatury i ciśnienia jakich doświadczamy w trakcie nurkowań technicznych na głębokości przekraczające 100 metrów. Praktycznie, jedyną sytuacją związaną z nurkowaniem, w której różnice pomiędzy gazami rzeczywistymi a idealnym powodują mierzalne różnice, jest sporządzanie mieszanek gazowych - nitroksu i trimiksu (to mieszanka tlenu, azotu i helu, stosowana w nurkowaniach technicznych). Mimo tego, większość osób sporządzających mieszanki i tak stosuje prawo gazów idealnych, przedkładając prostotę obliczeń nad usunięcie niewielkich rozbieżności w składzie mieszanki.

Liczba Avogadra.

W 1811 roku, włoski naukowiec i filozof Amadeo Avogadro stwierdził, że w określonej objętości gazu w stałych warunkach temperatury i ciśnienia zawsze znajduje się ta sama ilość cząsteczek gazu, niezależnie od rodzaju gazu. Wiele lat później fizycy obliczyli, że w temperaturze 0°C i przy ciśnieniu 1 bara, 22,4 litry gazu zawierają 602257 miliardów miliardów cząsteczek - czyli $6,023 \times 10^{23}$. Tę wielkość nazywamy liczbą Avogadra, a ilość cząsteczek dowolnej substancji równa liczbie Avogadra jest w chemii określana jako mol.

Zastosowanie liczby Avogadra doprowadziło do powstania Ogólnego Prawa Gazowego dla Gazów Idealnych, pojedynczego równania opisującego zachowanie dowolnego gazu przy zmieniającym się ciśnieniu, temperaturze i objętości:

$$pV = nRT$$

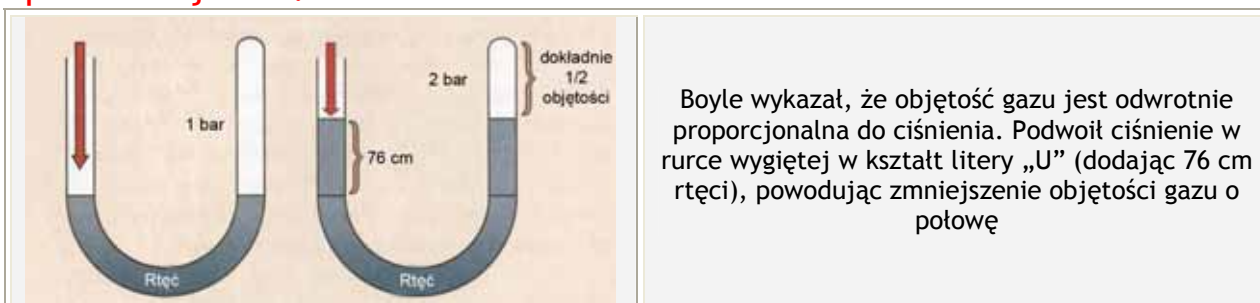
W powyższym równaniu, p to ciśnienie bezwzględne; V - objętość; n - liczba moli gazu; R - universalna stała gazowa, czyli $8,314 \text{ J/K}$ (dżul/kelwin), a T - temperatura bezwzględna.

To jedno prawo łączy w sobie dwa prawa opisane w dalszej części rozdziału, czyli prawa Boyle’a-Marriotte’a oraz prawa Charlesa. Spójrzmy na każde z nich z osobna, a następnie na zastosowania uproszczonego Ogólnego Prawa Gazowego w nurkowaniu.

Prawo Boyle’a - Mariotte’a⁵.

Sir Robert Boyle był XVII-wiecznym irlandzkim naukowcem, zainspirowanym pracami Torricellego. Podczas gdy Torricelli pierwszy określił ciśnienie atmosferyczne, Boyle próbował zbadać, w jaki sposób zmiany ciśnienia wpłyną na zmiany objętości gazów.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Z praktycznego punktu widzenia, prawo Boyle’a - Marriotte’a jest może najbardziej przydatnym do celów nurkowych ze wszystkich praw gazowych. Na przykład, możesz wykorzystać je do wyliczenia twojego tempa zużycia gazu na danej głębokości w oparciu o pomiary na innej głębokości, albo też wyliczenia, na ile czasu wystarczy ci gaz posiadany w butli. Tłumaczy też, dlaczego nie możesz wstrzymywać oddechu w trakcie nurkowania, i dlaczego podczas wynurzania powinieneś spuszczać powietrze z jacketu.



Boyle wykazał, że objętość gazu jest odwrotnie proporcjonalna do ciśnienia. Podwoił ciśnienie w rurce wygiętej w kształt litery „U” (dodając 76 cm rtęci), powodując zmniejszenie objętości gazu o połowę

Boyle przeprowadził słynny eksperyment z jednostronnie zamkniętą rurką w kształcie litery U, częściowo wypełnioną rtęcią. Od strony otwartej wlał do rurki tyle rtęci, aby w obu ramionach litery była taka sama objętość powietrza. Ponieważ poziom rtęci w obu ramionach był taki sam, ciśnienie w zamkniętym końcu rurki musiało być równe ciśnieniu wywieranemu przez atmosferę w końcu otwartym, czyli wynosiło 1 bar. Następnie, dolewał do rurki rtęć aż do momentu zmniejszenia objętości gazu w zamkniętym końcu rurki o połowę. Stwierdził, że musiał dodać 760 mm stupa rtęci (jak pamiętasz, taka ilość wywiera ciśnienie jednej atmosfery). Zatem, żeby zmniejszyć objętość gazu o połowę, musiał wywrzeć ciśnienie dwukrotnie większe; również ciśnienie powietrza w zamkniętym końcu rurki uległo podwojeniu.

⁵ W krajach anglosaskich, prawo to zwane jest prawem Boyle’a. We Francji, prawem Mariotte’a - od nazwiska francuskiego badacza, który niezależnie od Boyle’a doszedł do tych samych wniosków. W Polsce zazwyczaj honoruje się obu odkrywców, nazywając je prawem Boyle’a-Mariotte’a (przyp. tłum.)

Głębokość	Ciśnienie	Objętość	
0m	1 bar	Pełna	
10 m	2 bar	1/2	
20 m	3 bar	1/3	
30 m	4 bar	1/4	
40 m	5 bar	1/5	

Zgodnie z prawem Boyle’a-Mariotte’a, objętość gazu zmniejsza się proporcjonalnie do wzrostu ciśnienia wody w miarę zanurzenia

W tym eksperymencie Boyle wykazał, że o ile temperatura pozostaje stała, to objętość gazu jest odwrotnie proporcjonalna do wywieranego ciśnienia absolutnego. Jest to właśnie prawo Boyle’a-Mariotte’a. Zgodnie z nim, jeżeli ciśnienie rośnie, objętość gazu musi proporcjonalnie się zmniejszyć, natomiast spadek ciśnienia powoduje proporcjonalny do niego wzrost objętości gazu.

Prawo Boyle’a-Mariotte’a bardzo ułatwia wyliczenie, w jaki sposób zmieni się objętość gazu podczas zanurzenia lub wynurzenia. Jak pamiętasz, każde 10 metrów słonej wody wywiera ciśnienie równe ciśnieniu atmosferycznemu (czyli 1 bar). Zgodnie z prawem Boyle’a, objętość gazu w elastycznym bądź otwartym pojemniku będzie się zmieniać w ścisłym związku z głębokością (czyli ciśnieniem). Zatem, objętość gazu zabranego z powierzchni na głębokość 10 metrów (gdzie ciśnienie całkowite wynosi 2 bary) ulegnie zmniejszeniu o połowę. Na głębokości 20 m (ciśnienie absolutne 3 bary), gaz zostanie sprężony do jednej trzeciej pierwotnej objętości, zaś na głębokości 30 m (ciśnienie absolutne 4 bary) do jednej czwartej - i tak dalej.

Możesz użyć prawa Boyle’a-Mariotte’a do obliczenia nowej objętości gazu po zabraniu pojemnika ze znaną objętością gazu na nową głębokość. Wyobraźmy sobie, że zabieramy elastyczny zbiornik zawierający 280 litrów powietrza z powierzchni (ciśnienie atmosferyczne 1 bar) na głębokość 30 metrów, gdzie całkowite ciśnienie

wynosi 4 bary (ciśnienie atmosferyczne 1 bar plus ciśnienie hydrostatyczne 3 bary). Stosunek ciśnień na głębokości początkowej i końcowej możemy przedstawić w postaci ułamka, w którym w liczniku (liczba na górze) znajduje się ciśnienie pierwotne, a w mianowniku (liczba na dole) ciśnienie końcowe. W naszym przykładzie jest to $\frac{1}{4}$. Teraz mnożymy objętość początkową przez otrzymany ułamek, otrzymując $280 \text{ litrów} \times \frac{1}{4} = 70 \text{ litrów}$.

Prawo Boyle’a można zapisać matematycznie w postaci wzoru:

$$P \times V = K$$

gdzie K jest wartością stałą, P - całkowitym ciśnieniem, a V - objętością.

Tym razem wyobraź sobie napęczniony powietrzem balon, którego objętość na powierzchni wynosi 1 litr. Możemu to zapisać jako:

(P)		(V)		(K)
1 bar	×	1 litr	=	1

Jeżeli zanurzysz balon w wodzie morskiej na głębokość 20 metrów, gdzie ciśnienie wynosi 3 bary, ten zapis ulegnie przekształceniu:

$$3 \text{ bary} \times V = 1$$

Po prostym matematycznym przekształceniu wzoru, wyliczymy ciśnienie na nowej głębokości:

$$V = 1/3 \text{ litra}$$

Innymi słowy, na tej głębokości ciśnienie redukuje objętość do jednej trzeciej objętości początkowej. Gdy teraz zabierzesz ten sam balon na głębokość 40 metrów (ciśnienie całkowite 5 barów), objętość zmieni się następująco:

$$5 \text{ barów} \times V = 1$$

$$V = 1/5 \text{ litra}$$

Ponieważ w prawie Boyle’a-Mariotte’a znajduje się stała K - parametr, który dla konkretnego układu nie ulega zmianie - możemy przekształcić powyższy wzór w taki sposób, by był bardziej użyteczny przy

przeliczeniu objętości i ciśnienia. Ciśnienie i objętość początkowe określimy jako P_1 i V_1 , zaś końcowe jako P_2 i V_2 . Zgodnie z wzorem:

$$P_1 \times V_1 = K$$

$$P_2 \times V_2 = K$$

Czyli:

$$P_1 \times V_1 = K = P_2 \times V_2$$

Albo, prościej:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Teraz, znając objętość i ciśnienie na wyjściowej głębokości, możemy obliczyć objętość na dowolnej innej głębokości - również takiej, na której ciśnienie nie jest wielokrotnością ciśnienia atmosferycznego.

Wyobraźmy sobie teraz nurka próbującego wydobyć obiekt leżący na dnie morskim na głębokości 26 m. Nie posiada torby wypornościowej (*lift bag*), może jednak użyć dętki samochodowej. Wcześniej jednak musi określić, jaka objętość powietrza jest potrzebna do podniesienia przedmiotu, oraz upewnić się, że powietrze rozprężające się w dętce nie doprowadzi do jej rozerwania.

W oparciu o ciężar i pływalność przedmiotu, nurek stwierdził, że musi dodać 29 kilogramów siły skierowanej do góry aby oderwać przedmiot od dna. Aby wyliczyć, jak bardzo powietrze rozpręży się po wyjściu na powierzchnię, korzystamy z uprzedniego wzoru:

$$P_1 = 3,6 \text{ bara}$$

(głębokość wynosi 26 m; $26 \div 10 = 2,6$ bara ciśnienia hydrostatycznego + 1 bar ciśnienia atmosferycznego = 3,6 bara)

$$V_1 = 28,1 \text{ litra}$$

(woda morska ma gęstość 1,03 kg na litr; $29 \div 1,03 = 28,1$ litra)

$$P_2 = 1 \text{ bar}$$

(ciśnienie atmosferyczne)

V_2 to nieznaną objętość, którą chcemy wyliczyć

Po podstawieniu do wzoru $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$ znanych wartości, otrzymamy:

$$3,6 \text{ bara} \times 28,1 \text{ litra} = 1 \text{ bar} \times V_2$$

$$V_2 = 101,2 \text{ litra}$$











Teraz wiesz, że jeśli dętka jest w stanie pomieścić co najmniej 101,2 litra powietrza, nurek będzie mógł jej użyć do podniesienia z dna tego obiektu; w przeciwnym wypadku będzie to ryzykowne. Podobnie, z wzoru $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$ możesz korzystać z każdym razem, gdy znać będziesz trzy z czterech zmiennych, i nie ma znaczenia, jakich jednostek używasz (pamiętaj tylko, by w jednym wzorze nie używać jednostek różnych, np. jednocześnie funtów i kilogramów!).

Prawo Boyle'a-Mariotte'a stwierdza, że ciśnienie i objętość gazu są **odwrotnie proporcjonalne**.

Natomiast ciśnienie gazu i jego gęstość są **wprost proporcjonalne**. Jest to stosunkowo łatwe do zrozumienia intuicyjnego. Jeśli zmniejszysz objętość gazu, zwiększając ciśnienie, ta sama ilość cząsteczek musi się zmieścić w mniejszej objętości - zostają one zagęszczone. Zatem gęstość jest wprost proporcjonalna do ciśnienia bezwzględnego.

Przy ciśnieniu dwóch barów, gaz jest dwukrotnie gęstszy niż na powierzchni. Przy ciśnieniu trzech barów jest ono trzy razy gęstsze - i tak dalej. Dlatego właśnie im głębiej się znajdujesz, tym szybciej zużywasz gaz oddechowy. Oddychasz powietrzem pod takim samym ciśnieniem, jakie panuje na danej głębokości.

Jeśli wykonasz pełny wdech na głębokości 10 metrów, wdychasz dwukrotnie więcej cząsteczek powietrza co przy pełnym wdechu na powierzchni. Dlatego każdy wdech na tej głębokości wymaga użycia dwukrotnie większej ilości cząsteczek gazu z butli niż na powierzchni, w związku z czym zapas gazu wystarczy na czas o połowę krótszy.

Głębokość	Objętość	Ciśnienie	Gęstość		Głębokość	Objętość	Ciśnienie	Gęstość	
0m	1	1 bar	x 1		0m	1	1 bar	x 1	
10m	1/2	2 bar	x 2		10m	1/2	2 bar	x 2	
20m	1/3	3 bar	x 3		20m	1/3	3 bar	x 3	
30m	1/4	4 bar	x 4		30m	1/4	4 bar	x 4	
40m	1/5	5 bar	x 5		40m	1/5	5 bar	x 5	

Gęstość gazu jest wprost proporcjonalna do ciśnienia. Z lewej strony, gęstość wzrasta gdy ciśnienie ściska tę samą liczbę cząsteczek w coraz mniejszej objętości. Z prawej strony, objętość się nie zmienia - tak, jak objętość twoich płuc w trakcie zanurzania na coraz większą głębokość - ale gęstość również wzrasta. Dlatego im głębiej przebywasz, tym więcej gazu pobierasz z butli przy każdym wdechu

W miarę zanurzania, ten związek pomiędzy ciśnieniem a głębokością a ilością zużywanego gazu pozostaje stały - zgodnie z prawem Boyle'a-Mariotte'a. Zatem im głębiej się znajdujesz, tym szybciej zużywasz powietrze. Przy nurkowaniu na głębokość 20 metrów (ciśnienie - 3 bary), zapas powietrza wystarczy jedynie na jedną trzecią tego czasu, co na powierzchni; przy czterech atmosferach na jedną czwartą - i tak dalej. Jest to szczególnie ważne w nurkowaniu technicznym - butla z gazem, który na powierzchni wystarczyłby na dwie godziny, na głębokości 110 metrów będzie pusta już po dziesięciu minutach. Z tego powodu nurkowie techniczni zazwyczaj używają zestawów dwubutlowych o dużej objętości, i rośnie zainteresowanie rebreatherami o obiegu zamkniętym, recyklującymi wydychany gaz.

Chociaż określanie ciśnienia panującego na danej głębokości jest skutecznym sposobem na oszacowanie czasu, na jaki wystarczy ci gaz pod wodą, nie jest to sposób niezawodny. Wynika to z nierównomiernego tempa oddychania w trakcie nurkowania, które może ulec radykalnej zmianie pod wpływem czynników takich jak zimno, wyczerpanie, stres; dodatkowo, w trakcie nurkowania rzadko przebywasz przez cały czas na jednej głębokości.



Ponieważ na dużych głębokościach gaz oddechowy jest zużywany znacznie szybciej niż na płytkiej wodzie, podczas nurkowania na duże głębokości stosuje się dwubutlowe zestawy o dużej pojemności - tak, aby zagwarantować wystarczającą ilość gazu na cały czas nurkowania

Jest oczywiste, że prawo Boyle'a-Mariotte'a ma wiele zastosowań w nurkowaniu. Za każdym razem gdy nurkujesz, zabierasz ze sobą pod wodę napełnione gazem „zbiorniki” - butlę, jacket, maskę, zatoki i płuca. Także neopren twojego mokrego skafandra zawiera miliony drobnych pęcherzyków gazu, które

zmieniają objętość w miarę zanurzania i wynurzania. Dlatego w miarę zanurzania twój mokry skafander ma coraz mniejszą wyporność i zapewnia coraz słabszą izolację.

Prawo Charlesa.

Doświadczenia Boyle’a dotyczyły wzajemnych relacji objętości i ciśnienia, nie brały jednak pod uwagę trzeciego czynnika - temperatury. Wpływ temperatury na zachowanie gazów został po raz pierwszy zbadany przez francuskiego naukowca, Jacquesa Charlesa, którego prace zostały w większości opisane później przez jego kolegę, Josepha Gay-Lussaca.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Wyobraź sobie, że masz pełną butlę, ale planujesz nurkowanie w zimnej wodzie. Prawo Charlesa pozwala określić spadek ciśnienia w butli, gdy obniży się jej temperatura.

Charles stwierdził, że przy stałym ciśnieniu, wzrost temperatury powoduje zwiększenie objętości gazu w zbiorniku. Natomiast przy stałej objętości, wzrost temperatury powoduje wzrost ciśnienia. Innymi słowy, prawo Charlesa stwierdza, że zmiana ciśnienia lub objętości w danej objętości gazu jest wprost proporcjonalna do zmiany bezwzględnej temperatury. Przykładem tej własności jest ogólna zasada, że ciśnienie w pełnej butli wzrośnie o 0,6 bara na każdy stopień Celsjusza. Jest to tylko przybliżenie, niemniej dość dokładnie oddające rzeczywistość. Aby wykonać dokładne obliczenia, musimy zastosować prawo Charlesa. Jest najbardziej użyteczne, gdy połączymy je z prawem Boyle’a - Marriotte’a:

$$P \times V = K \times T$$

$$\frac{P \times V}{T} = K$$

W powyższym wzorze, P to ciśnienie bezwzględne, V to objętość, T - temperatura bezwzględna, a K to wielkość stała dla danego układu.

Podobnie jak w poprzednim rozdziale, ponieważ K jest wielkością stałą, we wzorze możemy porównać równania dla dwóch zestawów objętości, ciśnienia i temperatury

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = K = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}$$

Równanie to bierze pod uwagę wszystkie możliwe czynniki - ciśnienie, objętość i temperaturę, i jest matematycznym sposobem zapisu Ogólnego Prawa Gazowego dla Gazów Idealnych. Poniżej znajduje się kilka przykładów użycia Ogólnego Prawa Gazowego w sytuacjach nurkowych.

Podczas napełniania, twoja 12-litrowa butla osiąga temperaturę 52°C podczas napełniania do 200 bar. Woda, w której zamierzasz nurkować, ma temperaturę 7°C, i chciałbyś wyliczyć ciśnienie w butli po wejściu do wody.

P_1 200 bar (ciśnienie względne) + 1 bar = 201 bar (ciśnienie absolutne)

V_1 ponieważ objętość butli jest niezmienna ($V_1 = V_2 = 12$ litrów), możemy usunąć objętość z obu stron równania

T_1 52°C + 273°C = 325 K (kelwinów)

T_2 7°C + 273°C = 280 K (kelwinów)

Ponieważ z równania usunęliśmy objętość, równanie uległo uproszczeniu:

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$

Po podstawieniu wartości pod symbole, otrzymujemy:

$$\frac{201 \text{ bar}}{325 \text{ K}} = \frac{P_2}{280 \text{ K}}$$

a po przekształceniu

$$P_2 = \frac{201 \text{ bar} \times 280 \text{ K}}{325 \text{ K}}$$

$P_2 = 173$ bar (ciśnienie absolutne) - 1 bar = 172 bary (ciśnienie względne)

Nurek komercyjny, zaopatrywany w powietrze z powierzchni, ma do dyspozycji kompresor o wydajności 500 litrów na minutę. Temperatura na powierzchni wynosi 29 °C, zaś na głębokości 55 metrów, gdzie będzie pracował, temperatura wody wynosi 5 °C. Ile powietrza będzie w stanie dostarczyć na minutę na tą głębokość?

- P_1 1 bar (ciśnienie absolutne)
 V_1 500 litrów
 T_1 302 K
 P_2 6,5 bara (ciśnienie absolutne)
 T_2 278 K
 V_2 szukana objętość

$$\frac{1 \text{ bar} \times 500 \text{ litrow}}{302 \text{ K}} = \frac{6,5 \text{ bara} \times V_2}{278 \text{ K}}$$

$$V_2 = \frac{1 \text{ bar} \times 278 \text{ K} \times 500 \text{ litrow}}{302 \text{ K} \times 6,5 \text{ bara}}$$

$$V_2 = 70,81 \text{ litra na minutę}$$

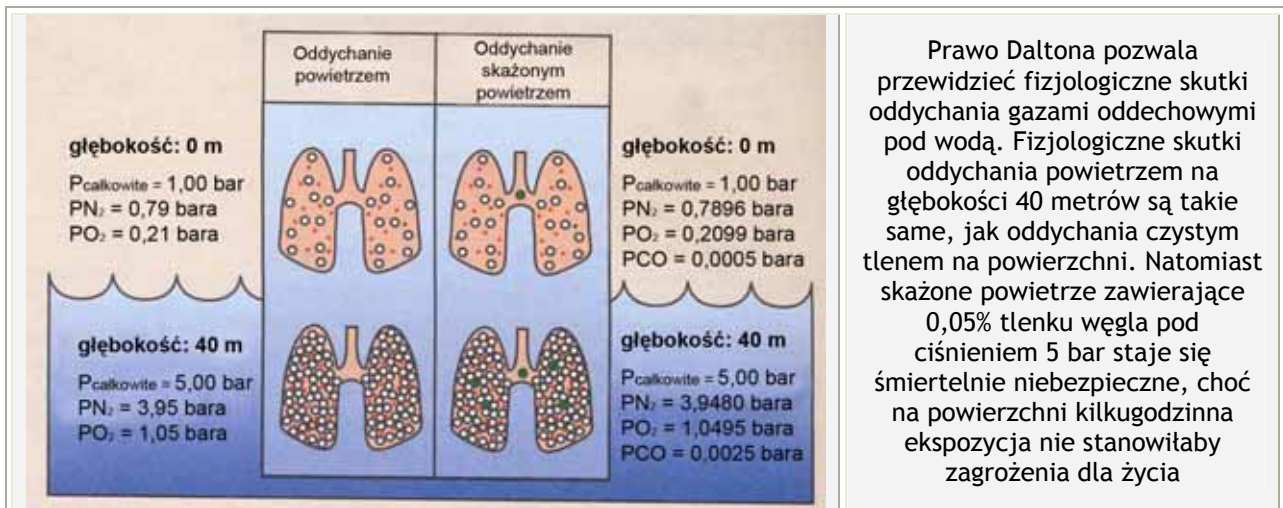
Taką wydajność będzie mieć na głębokości 55m powierzchniowy kompresor.

Prawo Daltona.

Prawo Boyle’a-Mariotte’a, Charlesa i oba razem w postaci Ogólnego Prawa Gazowego opisują zachowanie dowolnego gazu bądź mieszanki gazów - czyli zarówno czystego tlenu, powietrza, nitroksu, jak i trimiksu. Prawa te umożliwiają określenia ilości posiadanego gazu i zmian jego objętości, są zatem bardzo istotne dla nurków.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Stosujesz prawo Daltona dla określenia maksymalnej głębokości podczas nurkowania na wzbogaconym powietrzu. Razem z prawem Henry’ego, jest kluczowe dla układania modeli dekompresyjnych przez twój komputer nurkowy bądź tabele nurkowe.

Spójrzmy teraz na inne właściwości gazów, szczególnie odnoszące się do fizjologii. Gdy mówimy o oddychaniu mieszkanką gazową, poszczególne gazy wchodzące w jej skład zaczynają mieć znaczenie. Gdy gazy mieszają się, ich cząsteczki rozprzodkowane są równomiernie. Oznacza to, że chociaż mogą różnić się masą cząsteczkową i wielkością, to dzięki ich bezustannemu ruchowi będą wymieszane równomiernie. Jednak w obrębie tej jednorodnej mieszanki, każdy z gazów wykazuje swoje indywidualne zachowanie w odniesieniu do ciśnienia.



Pierwszą osobą, która zbadała to zjawisko był angielski naukowiec John Dalton - znany również jako ten, który pierwszy stwierdził, że materia złożona jest z atomów. Wyniki jego doświadczeń nad zachowaniem

gazów w mieszkankach opisuje prawo Daltona: całkowite ciśnienie mieszaniny gazów jest równe sumie ciśnień poszczególnych gazów wchodzących w skład tej mieszaniny - każdy gaz zachowuje się, jakby tylko on był obecny i zajmował całą przestrzeń.

W skrócie oznacza to, że każdy z gazów wchodzących w skład mieszanki zachowuje się niezależnie od innych. Indywidualne ciśnienie wywierane przez każdy z gazów składowych jest proporcjonalne do ilości cząsteczek tego gazu w mieszaninie. To indywidualne ciśnienie wywierane przez każdy z gazów tworzących mieszaninę określane jest jako ciśnienie parcjalne (partial pressure, oznaczane jako pp lub z literą P przed nazwą gazu - np. PO₂). Tak jak wskazuje nazwa, ciśnienie parcjalne gazu w mieszaninie jest częścią całkowitego ciśnienia wywieranego przez mieszaninę. Zrozumienie pojęcia ciśnienia parcjalnego jest ważne, ponieważ, jak wkrótce się dowiesz, zarówno rozpuszczalność, jak i dyfuzja gazów w tkankach ciała są proporcjonalne do ciśnienia parcjalnego tego gazu.

Jako przykład, weźmy powietrze. Dla uproszczenia, zignorujemy gazy śladowe zakładając, że powietrze składa się z 21% tlenu i 79% azotu. Zatem, zgodnie z prawem Daltona, 21% całkowitego ciśnienia będzie wywierane przez cząsteczki tlenu, a 79% całkowitego ciśnienia będzie wywierane przez cząsteczki azotu w mieszaninie. Jeśli całkowite ciśnienie wynosi 1 bar (ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza), to ciśnienie parcjalne tlenu wyniesie 0,21 bara, a ciśnienie parcjalne azotu - 0,79 bara. Zamiast barów, można w analogiczny sposób użyć dowolnych innych jednostek, np. psi bądź kg/cm², jednak w zastosowaniach nurkowych ciśnienia parcjalne zazwyczaj podaje się w barach.

Formuła T

Możesz używać prawa Daltona dla określenia ciśnienia parcjalnego danego gazu przy danym ciśnieniu absolutnym i zawartości gazu w mieszaninie; albo dla określenia zawartości gazu w mieszaninie znając ciśnienie parcjalne i absolutne; albo też dla określenia ciśnienia parcjalnego gdy znasz frakcję gazu i ciśnienie absolutne. Jeżeli znasz dwie z wielkości występujących w równaniu, możesz wyliczyć trzecią. Aby ułatwić sobie zadanie, możesz skorzystać z Formuły T:

$$\frac{P_g}{F_g \quad | \quad P_{\text{całkowite}}}$$

W formule tej, P_g to ciśnienie parcjalne gazu, F_g - frakcja gazu w mieszaninie (wyrażona jako ułamek dziesiętny, np 36% to 0,36), zaś P_{całkowite} to ciśnienie bezwzględne.

Aby skorzystać z Formuły T, zakryj wielkość której poszukujesz, i zrób to, na co wskazują dwie pozostałe. Na przykład, jeśli znasz F_g i P_{całkowite}, i chcesz wyliczyć P_g, zakrywasz je. F_g i P_{całkowite} znajdują się obok siebie, czyli te dwie wartości należy pomnożyć by otrzymać P_g. Jeśli natomiast znasz P_g i F_g, a chcesz wyliczyć P_{całkowite}, zakrywasz P_{całkowite}, pozostawiając P_g nad F_g. Zatem, aby wyliczyć P_{całkowite}, musisz podzielić P_g przez F_g.

Przykład:

Planujesz nurkowanie na głębokość 20 m, i nie chcesz by ciśnienie parcjalne przekroczyło 1,2 bara. Jaka byłaby maksymalna zawartość tlenu w twojej mieszance?

Spośród wartości zestawionych w Formule T, znasz P_g (PO₂ = 1,2 bara) i P_{całkowite} (głębokość 20 metrów - czyli 3 bary), i chcesz wyliczyć F_g (zawartość tlenu w mieszance). Po zastąpieniu F_g w formule pozostaje P_g nad P_{całkowite}. Dzielisz zatem P_g przez P_{całkowite}, otrzymując 1,2 ÷ 3 = 0,4, czyli 40%. To jest maksymalne stężenie tlenu w twojej mieszance.

Wyobraź sobie, że ciśnienie wzrasta dwukrotnie. Wzajemne proporcje tlenu i azotu nie uległy zmianie, zatem oba gazy wywierają ciśnienia parcjalne stanowiące taką samą jak poprzednio część całkowitego ciśnienia. Gdy całkowite ciśnienie wynosi 2 bary, ciśnienie parcjalne tlenu wyniesie 0,21 × 2 = 0,42 bara, a ciśnienie parcjalne azotu 0,79 × 2 = 1,58 bara.

Matematycznie, prawo Daltona można zapisać jako:

$$P_{\text{całkowite}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

We wzorze $P_{\text{całkowite}}$ to całkowite ciśnienie, zaś P_1 , P_2 itd. oznaczają ciśnienia parcjalne poszczególnych gazów.

Zgodnie z prawem Daltona, możemy łatwo wyliczyć ciśnienie parcjalne dowolnego ze składników mieszaniny gazowej o znanym ciśnieniu, mnożąc procentową zawartość tego gazu w mieszaninie przez całkowite ciśnienie bezwzględne.

$$P_1 = P_{\text{całkowite}} \times \% \text{zawartość gazu}$$

Spójrzmy na przykład typowy dla nurkowania technicznego: jakie będą ciśnienia parcjalne w trimiksie Tx16/33 (mieszaninie zawierającej 16% tlenu, 33% helu i 51% azotu) na głębokości 67 metrów?

$P_{\text{całkowite}} = 7,7 \text{ bara}$ ($67 \div 10 = 6,7 \text{ bara}$ ciśnienie hydrostatyczne + 1 bar ciśnienie atmosferyczne = 7,7 ciśnienie całkowite)

$$P_{O_2} (\text{tlen}) = 0,16 \times 7,7 \text{ bara} = 1,23 \text{ bara}$$

$$P_{N_2} (\text{azot}) = 0,51 \times 7,7 \text{ bara} = 3,93 \text{ bara}$$

$$P_{He} (\text{hel}) = 0,33 \times 7,7 \text{ bara} = 2,54 \text{ bara}$$

Zauważ, że jeśli zsumujemy wszystkie ciśnienia parcjalne, otrzymamy całkowite ciśnienie 7,7 bara.

Jeśli to konieczne, ciśnienie parcjalne może zostać wyliczone w barach, i następnie przeliczone na inne wartości. Jaka zatem będzie wartość ciśnienia parcjalnego P_{N_2} z poprzedniego zadania w kg/cm^2 i w psia?

$$3,92 \text{ bara} \times 1,03 = 4,04 \text{ kg/cm}^2 \text{ ciśnienie bezwzględne}$$

$$3,92 \text{ bara} \times 14,7 = 57,6 \text{ psia}$$

Inaczej niż w nurkowaniu, w medycynie często wyraża się ciśnienie parcjalne w milimetrach słupa rtęci (mmHg). Aby zamienić ciśnienie parcjalne w barach na mmHg, należy pomnożyć wartość przez 760. Dla powyższego przykładu:

$$3,92 \text{ bara} \times 760 = 2979 \text{ mmHg}$$

Zastanowimy się teraz, dlaczego ciśnienia parcjalne są dla nas istotne. Jak dowiedziałeś się podczas dyskusji na temat prawa Boyle’a-Marriotte’a i oddychania na głębokości, pod wodą każda porcja powietrza zawiera więcej cząsteczek niż porcja o takiej samej objętości na powierzchni. Oznacza to, że chociaż procentowy skład mieszaniny gazów jest taki sam pod wodą i na powierzchni, to ilość cząsteczek gazów wzrasta wraz z głębokością i ciśnieniem. Na przykład, jeżeli twoja teoretyczna pojemność płuc na powierzchni wynosi 100×10^{21} cząsteczek gazu, to 79×10^{21} z nich to cząsteczki azotu, a 21×10^{21} - cząsteczki tlenu (przyjmując w uproszczeniu, że powietrze składa się z 79% azotu i 21% tlenu i nie biorąc pod uwagę gazów śladowych). Gdybyś natomiast oddychał na powierzchni czystym tlenem, w każdym wdechu pobierałbyś 100×10^{21} cząsteczek tlenu.

Ale wróćmy do powietrza: jeżeli ciśnienie wzrosłoby pięciokrotnie, tak jak podczas nurkowania na głębokość 40 metrów, potrzebowałbyś 500×10^{21} cząsteczek gazu aby uzyskać tę samą objętość płuc. Z tej nowej ilości, 395×10^{21} ($0,79 \times 500 \times 10^{21}$) byłoby cząsteczkami azotu, zaś 105×10^{21} ($0,21 \times 500 \times 10^{21}$) byłoby cząsteczkami tlenu. Jest to w przybliżeniu taka sama ilość jak ta, którą wdychasz oddychając czystym tlenem na powierzchni.

Zamiast liczyć cząsteczki, Dalton posłużył się ciśnieniami parcjalnymi. Na przykład, spójrzmy na ciśnienia parcjalne tlenu w powyższych przykładach. Na powierzchni, gdy oddychasz powietrzem, ciśnienie parcjalne tlenu wynosi 0,21 bara ($0,21 \times 1 \text{ bar}$), ale gdy oddychasz czystym tlenem, P_{O_2} wynosi 1 bar ($1,0 \times 1 \text{ bar}$). Na głębokości 40 metrów, ciśnienie parcjalne tlenu także w przybliżeniu wynosi 1 bar (całkowite ciśnienie na głębokości 40 metrów wynosi 5 barów, $0,21 \times 5 \text{ barów} = 1,05 \text{ bara}$). Dlatego fizjologiczny wpływ tlenu jest taki sam, bez względu na to czy oddychasz czystym tlenem na powierzchni, czy powietrzem na głębokości 40 metrów. Z fizjologicznego punktu widzenia, wpływ gazu na organizm zależy wyłącznie od jego ciśnienia parcjalnego. Różne gazy obecne w mieszaninie mogą mieć swoje odrębne efekty, ale nie wpływają one bezpośrednio na siebie.

Zgodnie z prawem Daltona, każdy z gazów wchodzących w skład mieszaniny wywiera część ciśnienia całkowitego równą jego procentowej zawartości w mieszaninie

Całkowite ciśnienie 1 bar		Całkowite ciśnienie 2 bary	
PN ₂ pp	.79 bar	PN ₂ pp	1.58 bar
PO ₂ pp	.21 bar	PO ₂ pp	.42 bar

Zjawisko to jest szczególnie ważne zarówno w nurkowaniu rekreacyjnym, jak i technicznym ze względu na fakt, że tlen staje się toksyczny w chwili, gdy jego ciśnienie parcjalne przekracza 1,4 bara. Chociaż nie przekroczysz tego limitu nurkując z powietrzem w granicach nurkowania rekreacyjnego, to w trakcie nurkowania z użyciem nitroksu (mieszanki tlenu z azotem, o zawartości tlenu wyższej niż w powietrzu) może się to zdarzyć. Mieszanki nitroksowe różnią się zawartością tlenu, i w związku z tym mają różną maksymalną głębokość operacyjną - czyli głębokość, na której ciśnienie parcjalne tlenu osiągnie wartość 1,4 bara. W nurkowaniu technicznym, nawet powietrze zawiera zbyt wiele tlenu w trakcie nurkowania poniżej 67 metrów. Dlatego nurkowie techniczni, schodzący na duże głębokości, używają gazów oddechowych zawierających hel - pozwalający na zmniejszenie ciśnienia parcjalnego tlenu, jak i ciśnienia parcjalnego wywołującego narkozę azotu. Nurkowie techniczni zwykle biorą ze sobą na nurkowanie jedną lub więcej mieszanek oddechową do użycia w trakcie dekompresji - każda z nich o określonej zawartości tlenu, i o wyznaczonej maksymalnej głębokości operacyjnej w oparciu o PO₂. Prawo Daltona może być również wykorzystane przy rozpatrywaniu zanieczyszczeń gazów oddechowych. Stosując prawo Daltona, możesz porównać efekt oddychania gazem o określonym stężeniu parcjalnym w mieszance używanej na określonej głębokości z efektem oddychania mieszaną zawierającą większą ilość tego gazu na powierzchni. Jest to tak zwany ekwiwalent powierzchniowy (surface equivalency). Na przykład, wyobraź sobie, że na skutek awarii sprężarki przy nieefektywnym systemie filtracji, butla nurkowa została nabitą gazem zawierającym 0,05% tlenku węgla (CO). Chociaż jest to wysoce niepożądane, kilkugodzinne oddychanie tlenkiem węgla o takim stężeniu na powierzchni - czyli pod ciśnieniem parcjalnym PCO = 0,0005 bara - nie będzie stanowić zagrożenia dla życia. Jednak na głębokości 40 metrów, przy ciśnieniu absolutnym równym 5 bar, sytuacja się zmienia. Teraz PCO wyniesie 0,0025 bara, i ilość molekuł CO wdychanych przez nurka jest taka, jakby na powierzchni oddychał mieszaną zawierającą 0,25% CO. Jest to śmiertelnie niebezpieczne. Dlatego ekwiwalentem powierzchniowym opisanej mieszanki podczas nurkowania na 40 m jest mieszanka oddechowa zawierająca 0,25% tlenku węgla. W składzie mieszanki w butli nic się oczywiście nie zmieniło, ale inne są fizjologiczne konsekwencje oddychania mieszaniną na skutek wzrostu ciśnienia parcjalnego gazu toksycznego.

Ciśnienie a nurkowanie na wysokości

Jak zapewne wiesz, obniżone ciśnienie atmosferyczne na wysokościach przekraczających 300 m n.p.m. wymaga odbycia osobnego szkolenia i wymusza nurkowanie z użyciem specjalnych zasad. Przy użyciu zwykłych tabel, konieczne jest stosowanie specjalnych poprawek. Prawa Boyle'a-Marriotte'a, Charlesa i równanie stanu gazu doskonałego obowiązują tak samo, jak na poziomie morza - chociaż przy wykonywaniu obliczeń musisz wziąć pod uwagę obniżone ciśnienie atmosferyczne na wysokości. Ponieważ powietrze jest ściśliwe, zmiana ciśnienia przy zmianie wysokości o określoną wartość nie jest stała, jak to ma miejsce w wodzie. W wodzie morskiej, zmiana głębokości o 10 metrów zawsze powoduje zmianę ciśnienia o 1 atmosferę. Jednak powietrze jest ściskane przez powietrze powyżej, i im niżej, tym jest gęstsze - w związku z czym różnica ciśnień pomiędzy wysokościami 0 i 300 m n.p.m. jest większa niż między wysokościami 3000 i 3300 metrów. Możesz określić bezwzględne ciśnienie na danej wysokości w metrach słupa wody morskiej, stosując

następujący wzór:

ciśnienie = $10 \div 2,718(0,000125 \times \text{wysokość n.p.m.})$

Jednak dla celów nurkowych, wystarczająca jest zgrubna metoda obliczania ciśnienia, polegająca na odejmowaniu 0.035 atm na każde 300 metrów wysokości n.p.m., aż do wysokości 3000 m. Niektórzy odejmują 0.1 atm na każde 1000 m, co daje zbliżone wyniki. Żadne z tych dwóch przybliżeń nie jest precyzyjne, ale oba są wystarczająco dokładne dla celów nurkowych. Poniżej użyjemy pierwszej z metod.

Wyobraź sobie nurkowanie w górskim jeziorze położonym na wysokości 1800 metrów. Twój głębokościomierz został ustawiony na tę wysokość, i wskazuje głębokość 10 m (został skalibrowany na wodę morską, zatem w rzeczywistości znajdujesz się nieco głębiej niż 10 m. Nie ma to jednak znaczenia, gdyż interesuje nas ciśnienie, a nie sama głębokość). Jeżeli wypuścisz bojkę zawierającą 1 litr powietrza, jaką objętość będzie mieć to powietrze na powierzchni?

Ciśnienie na powierzchni, P2, wynosi 0,79 atm ($1800 \text{ m} \div 300 = 6$; $6 \times 0,035 = 0,21 \text{ atm}$; $1,00 \text{ atm} - 0,21 \text{ atm} = 0,79 \text{ atm}$).

Całkowite ciśnienie pod wodą, P1, wynosi 1,79 atm ($1,00 \text{ atm}$ ciśnienia hydrostatycznego + $0,79 \text{ atm}$ ciśnienia atmosferycznego = $1,79 \text{ atm}$).

Objętość powietrza pod wodą, V1, to 1 l.

$$P1 \times V1 = P2 \times V2$$

$$V2 = P1 \times V1 \div P2$$

$$V2 = 1,79 \text{ atm} \times 1 \text{ l} \div 0,79 \text{ atm}$$

$$V2 = 2,26 \text{ l}$$

Na skutek obniżonego ciśnienia atmosferycznego na wysokości, wzrost objętości gazu podczas wynurzenia z głębokości 10 m do powierzchni jest większy niż na poziomie morza - zgodnie z prawem Boyle'a-Mariotte'a.

Nitroks a prawo Daltona

Jak zapewne wiesz, nitroks (EANx) to mieszanina azotu i tlenu o wyższej zawartości O2 niż w powietrzu - czyli o obniżonej zawartości azotu, co pozwala na wydłużenie czasów bezdekompresyjnych. Z tego powodu, nitroks staje się coraz popularniejszy wśród nurków rekreacyjnych. Używany jest też przez nurków technicznych dla przyspieszenia usuwania azotu i/lub helu z tkanek ciała, i tym samym dla skrócenia czasu dekompresji.

Nurkując rekreacyjnie z nitroksiem, zazwyczaj stosujesz specjalne nitroksowe tabele bądź ustawiasz komputer nurkowy w tryb nitroksowy, tak aby nie przekroczyć limitów bezdekompresyjnych. Możesz także wyliczać Równoważną Głębokość Powietrzną (Equivalent Air Depth - EAD) dla danej głębokości rzeczywistej podczas nurkowania z nitroksiem, która pozwoli ci używać standardowych tabel powietrznych. Formuła wyliczania EAD opiera się na Prawie Daltona:

Error! Objects cannot be created from editing field codes.

Z matematycznego punktu widzenia, formuła ta wyznacza głębokość, na której PN2 podczas nurkowania na powietrzu byłaby taka sama, jak na danej głębokości w czasie nurkowania na nitroksie o odpowiedniej zawartości tlenu. Określenie (1 - %tlenu) określa procentową zawartość azotu w nitroksie, zaś (głębokość + 10) określa całkowite ciśnienie wyrażone w metrach słupa wody. Po pomnożeniu tych dwóch wartości otrzymujesz PN2 wyrażone w mswa. Po podzieleniu tej wartości przez 0,79, czyli frakcję azotu w powietrzu, uzyskujesz „głębokość” w mswa (uwaga - uwzględniając ciśnienie wywierane przez atmosferę!), na której ciśnienie parcjalne azotu w powietrzu miałoby taką samą wartość. Po odjęciu 10 przeliczasz ciśnienie absolutne na ciśnienie hydrostatyczne - jest to wartość podawana przez głębokościomierz.

Także podczas obliczania maksymalnej głębokości na jaką możesz zejść oddychając daną mieszanką nitroksową stosujesz prawo Daltona: $PO_2 = P_{\text{CAŁKOWITE}} \times \%O_2$, przy czym maksymalne PO_2 to 1,4 bara. Wyobraź sobie, że nurkujesz z nitroksiem EANx36 (36% tlenu):

$$1,4 \text{ bar} = P_{\text{CAŁKOWITE}} \times 0,36$$

$$P_{\text{CAŁKOWITE}} = 3,9 \text{ bar}$$

Po przeliczeniu barów na metry słupa wody otrzymujesz wartość 39 mswa, od której należy odjąć 10 by uzyskać głębokość wynoszącą 29 metrów. Jak widać, nurkując na nitroksie 36 jest możliwe przekroczenie maksymalnej dozwolonej głębokości, pomimo pozostawania w granicach limitów nurkowania rekreacyjnego (40 metrów)

Prawo Henry’ego.

Codziennie mamy do czynienia z roztworami różnych substancji - na przykład wtedy, gdy mieszamy cukier z kawą. Cząsteczki substancji rozpuszczonej (w powyższym przykładzie, cukru) zostają równomiernie wymieszane i rozmieszczone wśród cząsteczek rozpuszczalnika (wody). Chociaż substancja rozpuszczona i rozpuszczalnik współwystępują, obie substancje wciąż wykazują cechy indywidualne.

ZASTOSOWANIE W NURKOWANIU: Prawo Henry’ego stanowi teoretyczną podstawę modeli dekompresyjnych. Bez zrozumienia, w jaki sposób gazy rozpuszczają się w cieczach i jak opuszczają roztwór (lub tkanki płuconurka), nie mielibyśmy tablic nurkowych ani komputerów pozwalających nam na zmniejszenie ryzyka choroby dekompresyjnej przez wyliczenie czasów bezdekompresyjnych i harmonogramów dekompresji.

Zapewne myślisz o roztworach jako o cieczach, w których są rozpuszczone ciała stałe (na przykład, cukier rozpuszczony w wodzie); jednak roztwory powstają również przez rozpuszczenie w cieczy gazu. Może najlepiej znanym przykładem takich roztworów są napoje gazowane: po otwarciu butelki lub puszki powierzchnia napoju burzy się i pieni, gdy rozpuszczony w napoju dwutlenek węgla uchodzi z roztworu. Przykład ten ukazuje, że gazy ulegają rozpuszczeniu w cieczach, a po zmianie warunków zewnętrznych ilość gazu, która może pozostać w roztworze, ulega zmianie.

Podczas dyskusji o stanach materii dowiedziałeś się, że stan ciekły wykazuje cechy pośrednie pomiędzy stanami stałym i gazowym. W cieczy, względne odległości pomiędzy cząsteczkami są mniejsze niż w gazie, ale większe niż w ciele stałym⁶ - pozostaje zatem dostatecznie dużo miejsca, by cząsteczki gazów mogły wnikać pomiędzy cząsteczki cieczy. Proces przenikania gazów do roztworu nazywamy rozpuszczaniem gazu w cieczy.



Być może najlepiej znanymi przykładami działania prawa Henry’ego są napoje gazowane. Gdy otworzysz butelkę, rozpuszczony pod zwiększonym ciśnieniem dwutlenek węgla gwałtownie opuszcza roztwór. Jest to dowodem, że gazy rozpuszczają się w cieczach, a przy zmianie warunków środowiska ilość gazu rozpuszczonego w roztworze może ulec zmianie

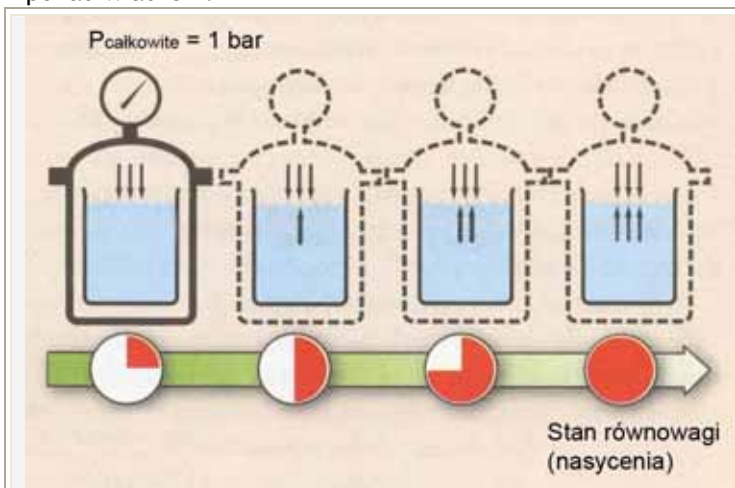
Ciekawą cechą gazów rozpuszczonych w wodzie jest to, że zachowują one własności typowe dla gazów. Chociaż są całkowicie otoczone przez cząsteczki cieczy - rozpuszczalnika, cząsteczki gazu wciąż wywierają ciśnienie. Takie ciśnienie wywierane przez cząsteczki danego gazu rozpuszczonego w cieczy nazywane jest prężnością gazu (gas tension).

William Henry, angielski chemik i fizyk, współpracownik Johna Daltona, był jedną z pierwszych osób badających zachowanie gazów rozpuszczonych w cieczach. Wnioski, do których doszedł w trakcie swoich eksperymentów, ujmuje prawo Henry’ego: ilość gazu, która rozpuszcza się w cieczy w danej temperaturze, jest wprost proporcjonalna do ciśnienia parcjalnego tego gazu. Istnieją zatem dwa

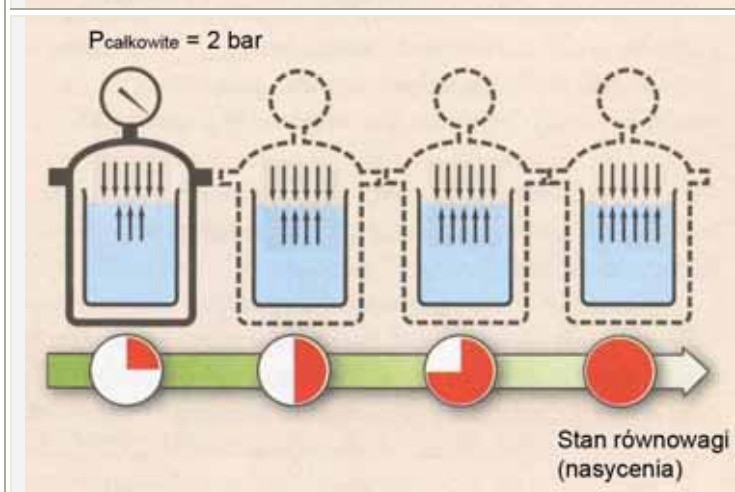
⁶ Jak pamiętasz z wcześniejszej części rozdziału, woda jest jednym z nielicznych wyjątków - średnie odległości między cząsteczkami są większe w stanie stałym niż w stanie ciekłym. (przyp. tłum.)

podstawowe czynniki wpływające na rozpuszczalność gazu w cieczy: ciśnienie parcjalne gazu i temperatura. Także ciecze różnią się rozpuszczalnością wobec konkretnych gazów.

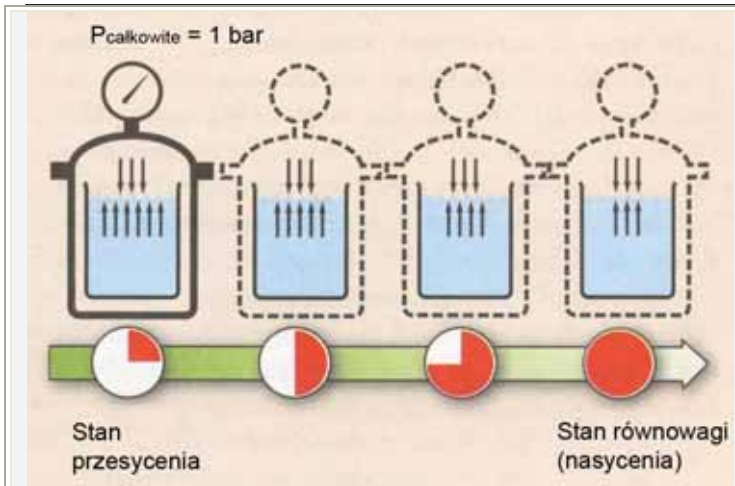
Jako nurkowie, zainteresowani jesteśmy przede wszystkim rozpuszczalnością gazów w wodzie, która jest rozpuszczalnikiem stanowiącym większą część masy naszych ciał. Wyobraź sobie teoretyczne wiadro wody, nie zawierającej żadnych rozpuszczonych gazów. W takim wiadrze, prężność gazów wynosi zero. Gdy tylko woda wejdzie w kontakt z gazem, jego cząsteczki zaczną przenikać do cieczy - przepływając ze strefy wysokiego ciśnienia do strefy niskiego ciśnienia, podobnie jak wówczas, gdy otworzysz zawór napełnionej butli i sprężone powietrze wypływa na zewnątrz. Gaz będzie się rozpuszczał w wodzie aż do momentu, gdy prężność tego gazu (ciśnienie) osiągnie taką samą wartość, jak jego ciśnienia parcjalne ponad wiadrem.



Gaz będący w kontakcie z cieczą rozpuszcza się w niej, aż do chwili osiągnięcia stanu równowagi ze środowiskiem zewnętrznym. Jest to stan wysycenia



Jeśli wzrośnie ciśnienie gazu będącego w kontakcie z cieczą, gaz będzie się rozpuszczał aż do chwili osiągnięcia nowego stanu równowagi



Jeśli ciśnienie gazu w kontakcie z cieczą ulegnie obniżeniu, gaz będzie wydzielać się z roztworu aż do chwili osiągnięcia stanu równowagi z nowym ciśnieniem zewnętrznym

Zjawisko to przebiega w ten sam sposób wówczas, gdy w kontakcie z wodą znajdzie się mieszanina gazów - na przykład powietrze. Zgodnie z prawem Daltona, każdy z gazów znajdujących się w kontakcie z wodą będzie się w niej rozpuszczał aż do chwili, gdy jego prężność w roztworze będzie miała taką samą wartość, jak jego ciśnienie ponad roztworem. Każdy z gazów w mieszaninie będzie się zachowywał niezależnie od innych. Jeśli więc włożysz do komory ciśnieniowej zawierającej czysty azot wspomniane wyżej wiadro wody pozbawione wszelkich gazów, N_2 będzie rozpuszczał się w roztworze aż do chwili, gdy jego prężność w roztworze zrówna się z P_{N_2} w kontakcie z cieczą. Teraz wyobraź sobie, że zwiększamy całkowite ciśnienie poprzez dodanie do komory pewnej ilości tlenu. Chociaż ciśnienie bezwzględne wzrosło, P_{N_2} w kontakcie z wodą jest takie samo, i azot już nie przechodzi do roztworu. Natomiast zacznie się w niej rozpuszczać tlen, aż do chwili, gdy jego prężność zrówna się z P_{O_2} w atmosferze komory.

Różnica pomiędzy ciśnieniem parcjalnemu gazu w kontakcie z cieczą a prężnością gazu w cieczy nazywana jest gradientem ciśnienia (pressure gradient). Gdy gradient ciśnienia jest duży, tempo wnikania cząsteczek gazu do wody jest wysokie. W miarę rozpuszczania gazu w wodzie maleje gradient ciśnienia, i spada tempo przenikania cząsteczek gazu do wody.

Gdy prężność gazu w cieczy osiągnie równowagę z ciśnieniem parcjalnemu gazu pozostającego w kontakcie z cieczą, nie następuje już przyrost ani spadek całkowitej ilości rozpuszczonego gazu w cieczy.

Poszczególne cząsteczki będą rozpuszczać się w cieczy i jednocześnie opuszczać ją - niemniej całkowita ilość cząsteczek rozpuszczonych będzie pozostawać na stałym poziomie. Ciecz zawierającą taką stałą ilość cząsteczek gazu określamy jako wysyconą tym gazem.

Wyobraź sobie, że poprzednio opisane wiadro pozostało w komorze rekompresyjnej wypełnionej azotem i tlenem wystarczająco długo, by nastąpiło wysycenie wody tymi dwoma gazami. Gdy podniesiesz ciśnienie poprzez dodanie do komory azotu, woda przestanie być wysycona azotem, który będzie rozpuszczał się w niej aż do chwili zrównania prężności azotu w wodzie z ciśnieniem parcjalnemu tego gazu ponad roztworem. Jednak w odniesieniu do tlenu, woda pozostaje wysycona tym gazem, jako że P_{O_2} pozostaje stałe. Tylko podniesienie ciśnienia parcjalnemu tlenu przez dodanie O_2 do komory może spowodować zwiększenie ilości tego gazu w roztworze. Zatem, im większe ciśnienie parcjalne gazu w kontakcie z wodą, tym więcej gazu rozpuści się w niej - i gaz będzie się rozpuszczał aż do chwili zrównania prężności gazu rozpuszczonego z jego ciśnieniem parcjalnemu.

Wyobraźmy sobie teraz, że umieścisz to wiadro z wodą w komorze rekompresyjnej w atmosferze azotu i tlenu pod ciśnieniem dwóch barów na czas wystarczająco długi, by nastąpiło wysycenie wody obydwojma gazami. Co się stanie, gdy obniżysz ciśnienie do jednego bara?

Obniżenie ciśnienia w takim układzie oznacza, że prężność gazów rozpuszczonych w cieczy jest wyższa niż ciśnienia parcjalne tych samych gazów znajdujących się w kontakcie z powierzchnią. Woda będzie przesyciona gazami, czyli zawierać będzie więcej rozpuszczonych gazów niż mógłby ich pomieścić roztwór pod tym ciśnieniem. Znowu pojawi się gradient ciśnienia, i gazy będą przepływać z układu o wyższym ciśnieniu do układu o niższym ciśnieniu. Tym razem układem o wyższym ciśnieniu będzie roztwór - zatem gazy będą się wydzielać z roztworu (desaturacja) aż do chwili osiągnięcia stanu równowagi z ciśnieniami parcjalnymi tych gazów w kontakcie z roztworem. Jeśli przed obniżeniem ciśnienia woda miała P_{N_2} równe 1,58 bara i P_{O_2} równe 0,42 bara, po obniżeniu ciśnienia do 1 bara oba gazy będą wydzielać się z

roztworu aż do chwili, gdy PN₂ wyniesie 0,79 bara a PO₂ - 0,21 bara - tyle, ile w wynoszą one w mieszaninie w kontakcie z powierzchnią wody.

Na skutek twoich doświadczeń z napojami gazowanymi, mógłbyś oczekiwać, że w wodzie pojawią się pęcherzyki w trakcie wydzielania azotu i tlenu z roztworu. W praktyce, takich pęcherzyków raczej nie zobaczysz: ciecze mogą tolerować znaczne przesylenie gazami bez formowania pęcherzyków. Zamiast tego, gaz będzie dyfundował z roztworu przez jego powierzchnię. Jeśli jednak prężność rozpuszczonego gazu będzie zbyt duża - a właściwie, jeśli gradient ciśnień będzie zbyt duży - gaz będzie wydelać się z roztworu szybciej niż może dyfundować przez powierzchnię cieczy. Wtedy dojdzie do powstania pęcherzyków. Inne czynniki, takie jak wstrząśnięcie cieczy, mogą także ułatwić powstawanie pęcherzyków.

W ten właśnie sposób prawo Henry'ego odnosi się do nurkowania i dekompresji. Podczas nurkowania jesteś poddany zwiększonemu ciśnieniu, i oddychasz gazami oddechowymi - powietrzem bądź nitroksenem - pod ciśnieniem równym otaczającemu cię. W związku z tym, PN₂ jest wyższe w twoich płucach niż w twojej krwi i w pozostałych twoich płynach ustrojowych. Zgodnie z prawem Henry'ego, azot rozpuszcza się w twoich tkankach (to samo dzieje się z tlenem - ale ponieważ procesy metaboliczne powodują jego szybkie zużycie, nie ma on wpływu na dekompresję). Kiedy się wynurzasz, twoje tkanki są przesycone azotem. O ile pozostałeś w granicach limitów bezdekompresyjnych tabel bądź komputera, gradient PN₂ będzie na tyle niski, że nie dojdzie do tworzenia się pęcherzyków azotu odpowiadających za wystąpienie choroby dekompresyjnej.

Jeżeli przekroczysz limity bezdekompresyjne (w sposób nieplanowany podczas nurkowania rekreacyjnego, bądź zgodnie z planem - nurkując technicznie), musisz wykonać przystanek dekompresyjny. Pisząc bardzo skrótowo, przystanki są tak zaplanowane, aby po twoim wyjściu na powierzchnię nie wystąpił zbyt duży gradient ciśnień pomiędzy twoimi tkankami a otoczeniem, mogący skutkować wystąpieniem choroby dekompresyjnej. Podczas przystanku dekompresyjnego, część nadmiernie rozpuszczonego azotu dyfunduje z twoich tkanek do płuc, i następnie na zewnątrz organizmu. Gdy gradient ciśnienia obniży się wystarczająco, możesz wynurzyć się do następnego przystanku, gdzie następuje wydalenie z organizmu części pozostałego azotu - aż do chwili, gdy prężność N₂ w tkankach obniży się wystarczająco, byś mógł bezpiecznie wynurzyć się na powierzchnię.

Zmienność cech ludzkiego organizmu sprawia, że fizjologia dekompresji i modelowania dekompresji są znacznie bardziej skomplikowane niż mogłoby się to wydawać na podstawie krótkiego opisu zachowania wiadra z wodą. Po pierwsze, nie wszystkie twoje tkanki pochłaniają azot w tym samym tempie, co wynika z różnic w ich przepuszczalności (zdolności do przechodzenia przez rozpuszczony azot między tkankami). Tempo pochłaniania zależy też od unaczynienia tkanek, na które z kolei mogą wpływać takie zmienne jak intensywność ruchu podczas pływnięcia bądź temperatura wody, mogąca ograniczyć krążenie w kończynach.

Inną ważną różnicą pomiędzy wiadrem wody a twoim ciałem jest zróżnicowana rozpuszczalność gazów w różnych tkankach. Na przykład, w takich samych warunkach w określonej objętości tkanki tłuszczowej może się rozpuścić znacznie więcej azotu niż w tej samej objętości krwi, pomimo iż prężności azotu w stanie równowagi w obu tkankach będą takie same. W trakcie nurkowań technicznych na trimiksie (mieszanka tlenu, azotu i helu) niektóre tkanki mogą szybciej ulegać nasyceniu helem niż azotem ze względu na mniejszą gęstość i większe tempo dyfuzji He niż N₂.

Ze względu na te zmienne, podczas nurkowania twoje tkanki pochłaniają i uwalniają azot (i inne gazy) w niejednakowym tempie. Po wystarczająco długim czasie pobytu na danej głębokości, wszystkie tkanki osiągnęłyby stopień wysycenia (saturacji); jednak ze względu na relatywnie krótki czas trwania nurkowań, także nurkowań technicznych, w czasie pobytu pod wodą niektóre części ciała nurka ulegają nasyceniu w dużym stopniu, podczas gdy inne nie.

Pomimo wszystkich tych zmiennych, zachowanie gazów w roztworze zgodnie z prawem Henry'ego tworzy podstawę teorii dekompresji. Fizjologowie ciągle odkrywają zachodzące w naszych ciałach procesy wpływające na zachowanie rozpuszczonych gazów, jednak wiemy już wystarczająco, by z dużym prawdopodobieństwem przewidzieć efekt dekompresyjny danego profilu nurkowego. Dlatego twoje zapadnięcie na chorobę dekompresyjną jest bardzo mało prawdopodobne, pod warunkiem że przestrzegasz podstawowych zasad bezpiecznego nurkowania i pozostajesz w granicach bezpieczeństwa tabel lub komputera nurkowego.

Oprócz ciśnienia, temperatura wpływa na roztwory gazów w cieczach. Nie ma to bardzo dużego znaczenia w odniesieniu do dekompresji, jako że temperatura twojego ciała waha się w minimalnym stopniu. Natomiast zmiana rozpuszczalności gazów wraz z temperaturą ma duże znaczenie dla

podwodnych organizmów. Przykładowo, temperatura ma duży wpływ na ilość rozpuszczonego tlenu, niezbędnego rybotom i innym wodnym organizmom do oddychania.

Gdy woda (lub inna ciecz) jest ogrzewana, tempo ruchów cząsteczek rośnie. Im szybciej cząsteczki rozpuszczalnika poruszają się, tym więcej miejsca potrzebują - pozostawiając mniej miejsca na cząsteczki rozpuszczonych gazów. W związku z tym, im wyższa temperatura, tym w stanie nasycenia mniejsza ilość gazu mieści się w danej objętości cieczy. Być może zauważyłeś, że otwarty ciepły napój gazowany pieni się znacznie intensywniej niż zimny. Także gdy podgrzewasz wodę, niewielkie bąbelki powietrza tworzą się na długo przedtem, nim woda zacznie się gotować. Przyspieszone ruchy cząsteczek wody powodują zmniejszenie ilości miejsca dostępnego cząsteczkom rozpuszczonego gazu, który będzie dyfundował do niewielkich kieszonek gazowych umiejscowionych na ściankach naczyń, w których utworzy pęcherzyki odrywające się następnie od ściany i wyptywające na powierzchnię cieczy. Dowiesz się więcej na temat procesów zachodzących w twoim ciele pod wpływem rozpuszczonych gazów, choroby dekompresyjnej i modeli dekompresyjnych w rozdziale piątym - Płetwonurek od Wewnątrz.

Gazy, które powinieneś znać

Wiele pierwiastków występuje w naturze w stanie gazowym. Ponieważ gazy łatwo się mieszają, w naturze przeważnie spotykamy gazy wymieszane z innymi, a nie w stanie czystym. Najczęściej spotykaną mieszkanką gazową występującą na Ziemi jest oczywiście powietrze. Chociaż dla większości celów możemy przyjąć, że powietrze składa się z 79% azotu i 21% tlenu, w rzeczywistości oprócz azotu i tlenu zawiera ono także argon, dwutlenek węgla, neon, hel, krypton, wodór, ksenon, radon, tlenek węgla i szereg innych gazów.

W normalnych warunkach, skład suchego powietrza jest względnie stały, i składa się (w częściach objętościowych) z następujących gazów:

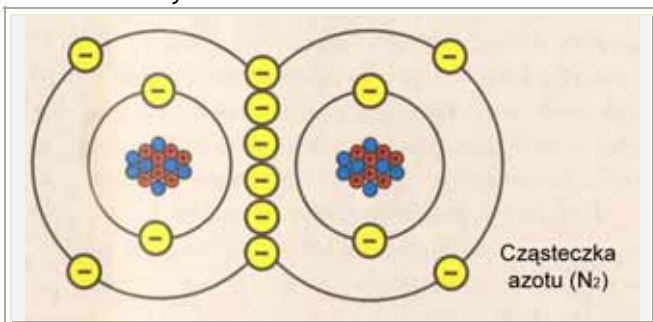
Azot	78,084%
Tlen	20,946%
Argon	0,934%
Dwutlenek węgla	0,033%

Pozostałe składniki powietrza - neon, hel, krypton, wodór, ksenon, radon i tlenek węgla - opisywane są jako gazy rzadkie, i łącznie stanowią jedynie 0,003% atmosfery.

Omówione zostaną teraz indywidualne cechy niektórych gazów, dowiesz się też o ich znaczeniu w nurkowaniu.

Azot

Azot pierwiastkowy jest spotykany bardzo często, i łatwo reaguje z innymi substancjami. Dlatego jest on spotykany w wielu naturalnych substancjach, takich jak np. białka. W powietrzu występuje azot cząsteczkowy: dwa połączone ze sobą atomy azotu tworzą jedną cząsteczkę azotu (N₂). W takim stanie, azot jest gazem obojętnym, czyli nie reagującym z innymi substancjami - przynajmniej z perspektywy płetwonurka: choć azot jest głównym składnikiem atmosfery, nasze organizmy nie używają go w trakcie oddychania. Dla roślin azot nie jest gazem obojętnym, i może uczestniczyć w ważnych procesach biochemicznych.

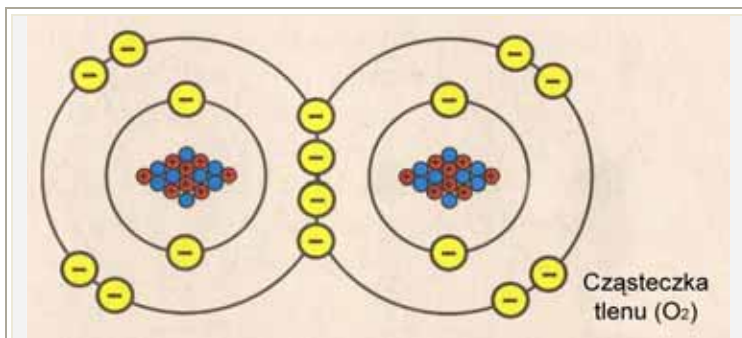


Podczas nurkowania, wdychany przez nas azot może powodować szereg problemów. Chociaż nie bierze udziału w procesach oddechowych, azot (i w różnym stopniu także inne gazy obojętne i reaktywne) wdychany pod ciśnieniem wpływa na przewodzenie sygnałów w centralnym układzie nerwowym, powodując efekt znieczulający - tak zwaną narkozę azotową, czasem określaną jako „narkozą głębin”. W Rozdziale V Encyklopedii, „Płetwonurek od wewnątrz”, znajdziesz więcej informacji na temat narkozy.

Niezależnie od narkotycznych efektów azotu wdychanego pod ciśnieniem, N₂ rozpuszcza się w tkankach podczas nurkowania, zgodnie z prawem Henry’ego. Dlatego, aby minimalizować ryzyko wystąpienia choroby dekompresyjnej, musisz przestrzegać limitów wyznaczanych przez tabele nurkowe bądź komputer nurkowy. W nurkowaniu rekreacyjnym azot jest gazem mającym największy wpływ na

dekompresję. Jednak, jak już wkrótce się dowiesz, inne gazy także mogą powodować chorobę dekompresyjną.

Tlen



Tlen jest bardzo reaktywny, zarówno w formie pierwiastkowej, jak i cząsteczkowej (O_2): łatwo tworzy wiązania z innymi pierwiastkami, i występuje w ogromnej gamie związków chemicznych. Tlen jest też jednym z najczęściej występujących składników atmosfery. Uważa się, że częstość jego występowania jest związana z reakcjami rozpadu ozonu w górnych warstwach atmosfery, jak również z reakcjami fotosyntezy prowadzonej przez

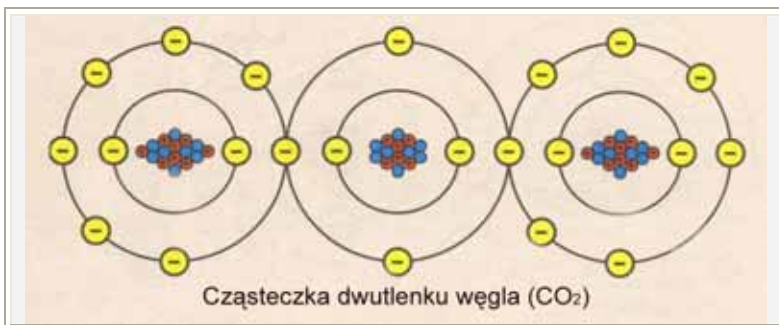
fitoplankton, zwłaszcza bruzdnice i okrzemki, w powierzchniowych, prześwietlonych warstwach oceanu. Inaczej niż to było w przypadku azotu, tlen jest niezbędny naszym organizmom do przeprowadzania procesów metabolicznych, czyli reakcji, w których z pokarmu jest pozyskiwana energia niezbędna do podtrzymywania życia. Dlatego tlen nie jest zazwyczaj problemem z punktu widzenia dekompresji. Metabolizm i inne procesy zachodzące w organizmie powodują zużywanie tlenu, tak że jego gradient ciśnienia pozostaje niski i nie przyczynia się do powstawania pęcherzyków dekompresyjnych. Eksperymenty wykazały, że w odniesieniu do dekompresji tlen może zachowywać się podobnie jak gaz obojętny, lecz tylko wtedy, gdy w trakcie nurkowania jest wdychany pod bardzo dużymi ciśnieniami parcjalnymi (PO_2). W związku z tym, generalnie nie jest to problemem, gdyż wymagane PO_2 znajduje się znacznie powyżej granicy toksyczności tlenu. Aby narazić się na problemy dekompresyjne podczas oddychania tlenem, musiałbyś znacznie przekroczyć limity toksyczności tlenowej, a wtedy wystąpienie poważnych problemów związanych z toksycznością O_2 byłoby bardziej prawdopodobne niż wystąpienie problemów dekompresyjnych powodowanych przez tlen.

Może wydawać się dziwnym, że choć potrzebujesz tlenu do życia, to pod zwiększonym ciśnieniem może on mieć działanie toksyczne. Jak już się dowiedziałeś, maksymalne PO_2 akceptowalne podczas aktywnego nurkowania to 1,4 bara, a nurkowie techniczni w trakcie postoju na przystankach dekompresyjnych mają akceptowalny limit 1,6 bara. Oddychając powietrzem w granicach limitów głębokości dla nurkowania rekreacyjnego, nie osiągniesz PO_2 1.4 bar/atm, ale używając wzbogaconego powietrza - nitroksu (gazu zawierającego powyżej 21% tlenu - zazwyczaj 32% lub 36%) możesz ten limit przekroczyć.

Co ciekawe, chociaż metabolizm i inne procesy chemiczne utrzymują PO_2 poniżej poziomu, w którym mogłoby dojść do powstawania pęcherzyków dekompresyjnych, wciąż w krwi może znajdować się wystarczająco dużo rozpuszczonego tlenu by przyczynić się do wystąpienia narkozy gazowej. Azot i tlen mają podobną rozpuszczalność w tłuszczach, co wydaje się jednym z głównych czynników wpływających na występowanie narkozy. Dlatego, choć procesy wpływające na wystąpienie narkozy są złożone i nie do końca wyjaśnione, zakładamy, że tlen w takim samym stopniu jak azot wywołuje narkozę. W związku z tym, nurkując na wzbogaconym powietrzu (nitroksie) uznajemy, że ma ono taki sam potencjał narkotyczny jak powietrze.

W Rozdziale V dowiesz się więcej na temat toksyczności tlenowej i narkozy.

Dwutlenek węgla



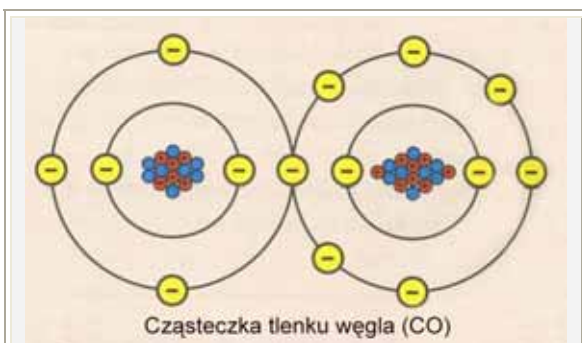
Dwutlenek węgla (CO₂) jest gazem dobrze rozpuszczalnym w wodzie. W związku z tym, stężenie CO₂ w wodzie jest wyższe niż w powietrzu. Do atmosfery dwutlenek węgla trafia przede wszystkim jako produkt procesów oddychania organizmów, a także - oprócz innych zanieczyszczeń powietrza - w efekcie spalania paliw kopalnych. Dwutlenek węgla jest też gazem cieplarnianym, który wpływa na

zwiększenie zatrzymywania ciepła przez atmosferę Ziemi, i w konsekwencji na jej ogrzanie. Wielu naukowców uważa, że oceany absorbują większość dwutlenku węgla powstałego przy spalaniu paliw kopalnych, spowalniając tym samym narastanie efektu cieplarnianego. Jednak chociaż morze pozwoliło odsunąć problem w czasie, globalne ocieplenie postępuje i staje się jednym z najpoważniejszych problemów ludzkości.

W stężeniach, w jakich normalnie występuje w atmosferze, dwutlenek węgla jest bezwonny, bezbarwny i nie ma smaku, choć w dużych stężeniach ma kwaśny zapach i smak. Dlatego właśnie napoje gazowane mają charakterystyczny zapach i smak, który zmienia się, gdy gaz się ulotni.

Jak wyjaśniono w rozdziale poświęconym fizjologii - „Nurek od wewnątrz”, zbyt wysokie stężenie dwutlenku węgla w gazie oddechowym może powodować trudności z oddychaniem i uczucie braku powietrza w trakcie pobytu pod wodą. Podczas nurkowania na zatrzymanym oddechu, zbyt niskie stężenie CO₂ wynikające z intensywnej hiperwentylacji przed nurkowaniem może zwiększać ryzyko nagłej utraty przytomności pod wodą.

Tlenek węgla

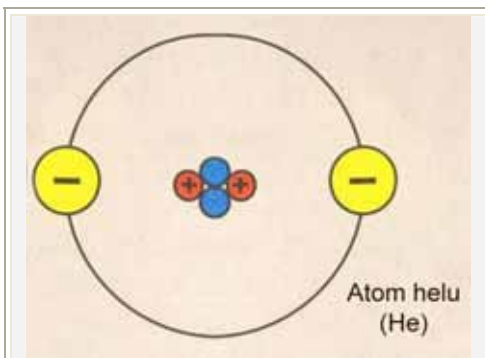


W atmosferze ziemskiej tlenek węgla (CO) występuje w bardzo małych ilościach. Większość tego gazu jest wytwarzana przez człowieka jako produkt uboczny reakcji spalania węglowodorów, np. paliw kopalnych. Tlenek węgla jest bardzo toksyczny, ale jednocześnie bezbarwny, bezwonny i pozbawiony smaku - co czyni go trudnym do wykrycia bez użycia specjalnych analizatorów. Na szczęście, CO często występuje wraz z innymi gazami, które można wyczuć zmysłami smaku lub powonienia; dlatego właśnie nie należy nurkować z powietrzem, które ma nieprzyjemny smak lub zapach. Tlenek węgla rzadko trafia do butli z gazem

oddechowym dla nurków, jednak niekiedy do tego dochodzi. Najczęściej przyczyną jest niewłaściwy smar użyty w sprężarce lub jej niepoprawna konserwacja w połączeniu z niesprawnym systemem filtracji, a czasem również złe umiejscowienie sprężarki i niesprawny system filtracji. Użycie niewłaściwych smarów lub zaniedbania przy konserwacji mogą doprowadzić do zapłonu wewnątrz sprężarki. Natomiast gdy sprężarka jest ustawiona w niewłaściwym miejscu, może dojść na przykład do sprężania gazów wydechowych tej samej sprężarki - o ile ma ona silnik benzynowy. Współcześnie stosowane filtry skutecznie usuwają tlenek węgla ze sprężanego powietrza, katalizując jego utlenienie do dwutlenku węgla (podobnie jak robią to katalizatory w samochodach), który następnie jest usuwany. Jednak niewłaściwe bądź zużyte filtry mogą przepuszczać jeden lub oba z tych gazów, a przy bardzo wysokich stężeniach CO nawet sprawny filtr może część tlenku węgla przepuszczać.

Na szczęście, profesjonalne centra nurkowe utrzymują swoje sprężarki w dobrym stanie, dodatkowo regularnie testując sprężane powietrze. Dlatego do zatrucia tlenkiem węgla w nurkowaniu dochodzi rzadko.

Hel



Hel (He) jest stosunkowo rzadkim gazem. Stwierdzono jego istnienie dopiero w 1868 roku, a po raz pierwszy pozyskano go z rud metali dopiero w roku 1895. Obecnie Stany Zjednoczone są głównym dostawcą helu. Choć hel jest gazem względnie tanim (w porównaniu do wielu innych gazów), niektórzy oceniają, że jego zasoby dostępne do komercyjnej eksploatacji ulegną wyczerpaniu przed końcem wieku. Hel jest drugim najlżejszym gazem, cięższym jedynie od wodoru. Jest pierwiastkiem tak niereaktywnym, że w stanie gazowym występuje tylko w postaci pojedynczych atomów, nie tworząc nawet wiązań między własnymi atomami. Hel nigdy też nie wchodzi w skład związków chemicznych.

Znaczenie helu jest duże w nurkowaniu technicznym i komercyjnym, jako że gaz ten nie powoduje narkozy. Nurkowie komercyjni standardowo używają helioksu (mieszanki helu i tlenu) podczas przeprowadzania robót na dużych głębokościach. Natomiast w nurkowaniu technicznym, trimiks (mieszanka azotu, helu i tlenu) jest powszechnie stosowany podczas nurkowań na głębokości większe niż ok. 50 m. Dodatkową zaletą helu, związaną z jego małą gęstością - znacznie niższą niż gęstość azotu czy tlenu - jest łatwość oddychania nim na dużych głębokościach.

Jednak hel ma też pewne wady jako gaz nurkowy. Jako lekki gaz, He dyfunduje szybciej niż O₂ czy N₂, a zatem szybciej rozpuszcza się w tkankach nurka. Dla określonego profilu i frakcji tlenu, czas dekompresji jest dłuższy podczas nurkowania z użyciem mieszanki opartej na helu niż z użyciem powietrza/wzbożonego powietrza.

Kolejnym problemem jest dobre przewodnictwo cieplne helu, znacznie wyższe niż azotu lub tlenu. Nie ma to większego znaczenia przy oddychaniu, ale czyni hel mało przydatnym jako gaz do napełniania suchych skafandrów. Hel pochłania i przewodzi ciepło na tyle szybko, że niektórzy nurkowie woleliby raczej nurkować w zalanym suchym skafandrze, niż w skafandrze suchym, ale napełnionym helu. Poza problemami z przewodnictwem cieplnym, używanie różnych gazów do oddychania i napełniania suchych skafandrów mogłoby powodować pewne problemy z dekompresją. Ponieważ hel dyfunduje bardzo szybko, podczas dekompresji może poprzez skórę rozpuszczać się w tkankach szybciej niż inne rozpuszczone gazy (np. azot) będą z tkanek usuwane przez płuca. W związku z tym, całkowita ilość rozpuszczonego gazu może wzrosnąć do takiego poziomu, że zaczną się formować pęcherzyki. To zjawisko jest określane jako izobaryczna przeciwdyfuzja (isobaric counterdiffusion), i może zachodzić, gdy nurek oddycha wolno dyfundującym gazem, a jest otoczony gazem szybko dyfundującym. Może również się zdarzyć w trakcie oddychania szybko dyfundującym gazem podczas dekompresji/usuwania z tkanek gazu wolno dyfundującego.

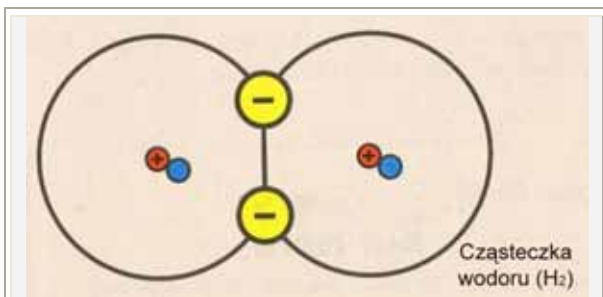
W związku z tym, podczas nurkowania z użyciem mieszanek helowych powinien mieć osobny system napełniania suchego skafandra. Choć można używać powietrza lub nitroksu, większość nurków technicznych stosuje w tym celu argon; gaz ten zostanie omówiony wkrótce.

Dwa kolejne problemy związane z użyciem helu dotyczą przede wszystkim nurków komercyjnych, choć w coraz większym stopniu także nurków technicznych. Po pierwsze, w helu dźwięk rozchodzi się szybciej niż w powietrzu, zniekształcając mowę podczas rozmowy przez elektroniczne komunikatory głosowe. Efekt można neutralizować dzięki elektronicznym filtrom korygującym głos, które sprawiają, że mowa staje się zrozumiała dla innych nurków i dla obsługi na powierzchni. Drugi problem polega na tym, że choć hel nie ma własności narkotycznych, to przy bardzo dużych ciśnieniach parcjalnych (generalnie, na głębokościach większych niż 120 m) wywołuje tzw. Syndrom Nerwowy Wysokich Ciśnień (High Pressure Nervous Syndrome - HPNS), objawiający się drżeniem, mdłościami, zmęczeniem i upośledzeniem procesów myślowych. Jednym z rozwiązań jest użycie trimiksu zamiast helioksu podczas takich nurkowań, gdyż narkotyczne działanie azotu chroni przed HPNS. Był to jeden z głównych powodów rozporządzenia stosowania trimiksu.

Odkryty najpierw na Słońcu, później na Ziemi

Przed rokiem 1868 istnienie helu przewidywano teoretycznie, ale nikt nie udowodnił, że pierwiastek ten rzeczywiście istnieje. Dopiero w tym roku Sir Joseph N. Lockyer i P.J. Janssen potwierdzili istnienie helu w chromosferze Słońca. Aby potwierdzić odkrycie, Lockyer pracował z Eduardem Franklandem, specjalistą od spektroskopii. Hel odkryto na Ziemi dopiero 30 lat później

Wodór



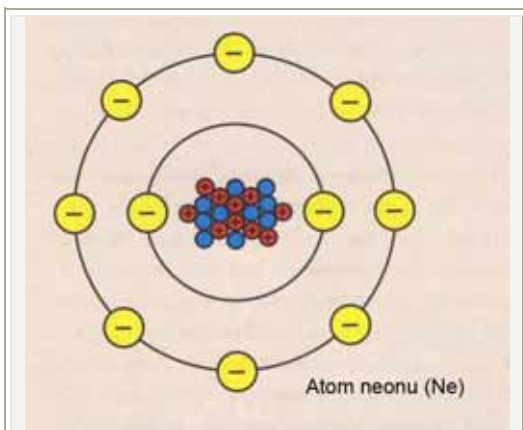
Wodór ma szereg cech idealnego gazu nurkowego. Jest najlżejszym ze wszystkich gazów, i jest uważany za najczęściej występujący pierwiastek we wszechświecie. W każdym razie, na Ziemi dostępny jest łatwo: można szybko i tanio uzyskać wodór przeprowadzając elektrolizę wody, która ulega rozszczepieniu na wodór i tlen. Wodór ma pewne działanie narkotyczne, ale znacznie słabsze niż azot czy tlen, zaś z punktu widzenia dekompresji wydaje się być lepszy niż hel. Co więcej, w odróżnieniu od

helu, wodór nie powoduje Syndromu Nerwowego Wysokich Ciśnień (HPNS). Francuska firma zajmująca się nurkowaniami komercyjnymi, Comex, przeprowadzała udane eksperymenty nad użyciem wodoru w trakcie głębokich nurkowań komercyjnych.

Wodór ma jednak poważną wadę: jest bardzo reaktywny. W stanie gazowym występuje w postaci dwuatomowych cząsteczek (H_2), które w obecności tlenu gwałtownie, wybuchowo z nim reagują, tworząc wodę. Mieszanka oddechowa, w skład której wchodzi wodór, nie może zawierać więcej niż 4% O_2 ze względu na duże prawdopodobieństwo zajścia reakcji wybuchowej. Zgodnie z prawem Daltona, minimalna głębokość na której możnaby takiej mieszanki używać to około 30 m. Jednak ponieważ taki gaz wciąż pozostaje mieszką wybuchową, przy jej używaniu należy stosować się do szeregu ważnych zasad bezpieczeństwa. Na przykład, trzeba zachować ostrożność przy zmianie gazów podczas dekompresji, tak by reakcja wybuchowa nie zaszła w płucach!

Obecnie oraz w niedalekiej przyszłości, użycie wodoru jako gazu nurkowego przypuszczalnie pozostanie w fazie eksperymentalnej, i będzie raczej ograniczone do głębokich nurkowań komercyjnych. Gaz ten w przewidywalnej przyszłości nie będzie stosowany jako gaz oddechowy przez nurków technicznych, a zwłaszcza rekreacyjnych.

NEON



Większości z nas neon (Ne) kojarzy się przede wszystkim z emisją światła w trakcie przewodzenia prądu. Choć rzeczywiście obecnie jest to jego najpowszechniejsze zastosowanie, w ciągu następných dekad neon może stać się popularnym gazem stosowanym przez nurków technicznych i komercyjnych. Obecnie jego zastosowanie w nurkowaniu jest w fazie eksperymentów, ale z wielu powodów może to wkrótce ulec zmianie.

Podobnie jak hel, neon jest niereaktywnym pierwiastkiem, który nie tworzy nawet wiązań z innymi atomami neonu: gaz neonowy złożony jest z pojedynczych atomów neonu, podobnie jak to jest w wypadku helu. Neon nie wchodzi również w skład żadnego znanego związku chemicznego. Nie ma własności narkotycznych i jest gęstszy od helu - w mniejszym stopniu niż hel przewodzi ciepło i zniekształca

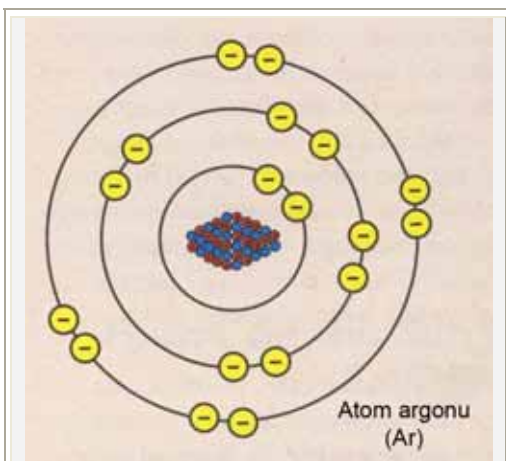
mowę, pozwala też na skrócenie czasu dekompresji w porównaniu z helem. Przez jego gęstość, pod dużymi ciśnieniami trudniej oddychać neonem niż helem - ale jest on wystarczająco lekki, by umożliwić oddychanie na głębokościach rzędu 155 m, w pobliżu górnych limitów nurkowania technicznego.

Do chwili obecnej, nurkowanie na mieszkach zawierających neon było ograniczone do fazy eksperymentalnej, głównie w związku z kosztami: uzyskanie czystego neonu jest bardzo kosztowne, znacznie droższe niż uzyskanie helu - i w związku z tym używanie neonu jako gazu oddechowego byłoby niepraktyczne. Można natomiast stosunkowo łatwo i tanio w procesie mrożenia wydzielić z powietrza „helioneon” - mieszaninę 25% helu i 75% neonu. Taka mieszanina mogłaby być, teoretycznie, bardzo użyteczna do sporządzania mieszanek gazowych do nurkowań technicznych. Wraz ze wzrostem cen handlowych helu na skutek wyczerpywania się jego złóż, helioneon mógłby zastąpić go w nurkowaniu.

Powszechny wszędzie, tylko nie u nas...

Neon, którego nazwa pochodzi od greckiego neos - nowy, jest uważany za czwarty najczęściej występujący we Wszechświecie pierwiastek. Zważywszy na jego przydatność jako gazu nurkowego, jego większa dostępność byłaby pożądana. Niestety, na Ziemi jest on bardzo rzadki, i stanowi mniej niż 0.002% atmosfery. Naukowcy sądzą, że neon występuje we Wszechświecie w dużych ilościach dzięki reakcjom jądrowym, zachodzącym we wnętrzu gwiazd

Argon



Argon (Ar) jest fizjologicznie obojętnym gazem (w niektórych warunkach tworzy wiązania z innymi pierwiastkami - ale nie w twoim ciele), który, podobnie jak hel i neon, występuje w postaci pojedynczych atomów.

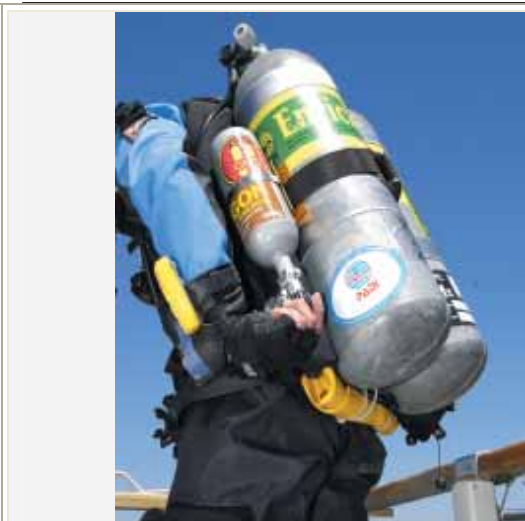
Na pierwszy rzut oka, zastosowanie argonu w nurkowaniu wydaje się wątpliwe. Jest gazem bardzo gęstym i w związku z tym utrudniającym oddychanie, ma też słabe działanie narkotyczne. Gdybyś próbował nurkować na mieszance argonu i tlenu, doświadczyłbyś narkozy i problemów z oddychaniem już na głębokości 6 m.

Argon jest jednak znakomitym izolatorem ze względu na wielkość jego atomów i niskie ciepło właściwe. Dlatego jest on często używany przez nurków rekreacyjnych, technicznych i komercyjnych do napełniania suchych skafandrów, jako że zapewnia lepszą izolację niż powietrze. Ponieważ argon jest bardzo gęsty, izobaryczna przeciwyfuzja nie stanowi

problemu. Mimo to, ze stosowaniem argonu do napełniania suchych skafandrów wiążą się pewne potencjalne problemy.

Po pierwsze, dotychczas przeprowadzono mało badań dotyczących dekompresji na lekkim gazie w środowisku ciężkiego gazu. Te wątpliwości w dużym stopniu rozwiewa fakt, że nie ma teoretycznych podstaw do przypuszczeń, że takie problemy mogłyby wystąpić, oraz że nurkowie od lat używali argonu do napełniania suchych skafandrów, bez zgłaszania większych problemów. Musisz sobie jednak zdawać sprawę, że napełniając swój skafander argonem, w pewien sposób eksperymentujesz.

Druga wątpliwość wiąże się z faktem, że musisz być absolutnie pewny, że nikt przypadkowo nie użyje twojej butli z argonem do oddychania pod wodą. Ponieważ systemy do napełniania skafandrów argonem zazwyczaj używają czystego gazu, brak tlenu byłby znacznie większym problemem niż gęstość argonu czy jego efekt narkotyczny. Aby uniknąć takich problemów, twój zestaw do napełniania argonem nie powinien mieć drugiego stopnia automatu oddechowego, ani innego mechanizmu który pozwoliłby na oddychanie gazem z butli. Poza tym, zazwyczaj argon jest przechowywany w małej butli, wyraźnie oznaczonej w celu minimalizacji ryzyka jej pomyłki z butlą zawierającą gaz oddechowy.



Nurkowie techniczni często używają argonu do napełniania suchych skafandrów. Potrzebna jest do tego oddzielna butla i specjalny automat - bez drugiego stopnia z ustnikiem!