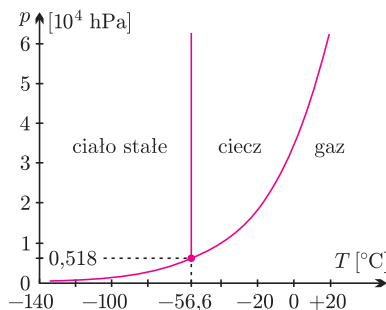




1 m² powierzchni Marsa otrzymuje od Słońca $1,52^2 = 2,31$ razy mniej energii niż w przypadku Ziemi. Ilość energii przypadająca na 1 sekundę to tzw. stała słoneczna. Dla Ziemi wynosi ona 1367 W/m². Dla Marsa będzie zatem równa $1367/2,31 \text{ W/m}^2 = 591,8 \text{ W/m}^2$.

Rok marsjański liczy średnio 668,61 marsjańskich dób średnich słonecznych. Długość marsjańskiej doby jest prawie równa ziemskiej i wynosi 24 h 37 min 22 s.

Korzystając ze wzoru Clapeyrona, obliczmy gęstość ρ marsjańskiej atmosfery, biorąc pod uwagę tylko CO₂. Masa molowa $\mu = 44 \text{ kg/kmol}$. $p = 8 \text{ hPa} = 8 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$. Załóżmy, że $T = 200 \text{ K} = -73^\circ\text{C}$. Stała gazowa $R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ J/kmol K}$. $pV = (m/\mu)RT$, z czego wynika $m/V = \rho = \mu p/(RT)$. Zatem $\rho = 0,02 \text{ kg/m}^3 = 20 \text{ g/m}^3$.



Rys. 1. Diagram fazowy CO₂.

Wycieczka na Marsa

Lech FALANDYSZ

Mimo sporadycznych zapewnień przedstawicieli różnych agencji kosmicznych i rządów o planach wysłania załogowej misji na Marsa na międzyplanetarną wyprawę i pierwszą stałą bazę przyjdzie nam chyba trochę poczekać. Jednak już teraz możemy spróbować przenieść się w myślach na powierzchnię tej pustynnej planety, posiłkując się w naszej podróży niczym nieokiełznaną wyobraźnią, prawami fizyki oraz danymi zebranymi przez bezzałogowe sondy i lądowniki.

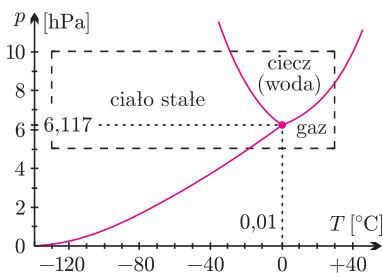
Powierzchnia Marsa jest geologicznym (a w zasadzie *areologicznym*) polem bitwy, jak na boga wojny, Marsa (Aresa) przystało. Na równinach porozrzucane są wśród wydm skały różnych wielkości. Wydmy z piasku, pyłu i popiołu wulkanicznego utworzone są przez wiatry i huragany. W innych miejscach spotkamy rozpadliny, kaniony, kratery, wulkany i twory przypominające koryta wyschniętych rzek, niektóre o wiele większe od ziemskich. Wulkan Olympus Mons jest ponad dwukrotnie wyższy od ziemskiego Mount Everestu. Krater Victoria ma około 800 km średnicy. Kaniony mają łącznie długość kilku tysięcy km, a ich głębokości wynoszą kilka kilometrów. Całe to bogactwo krajobrazowe zwieńczają okazałe i wysokie łańcuchy górskie, nad którymi widać czasem dwa niewielkie księżyce, Fobosa i Deimosa, okrążające planetę w płaszczyźnie równikowej po prawie kołowych orbitach.

Średnia odległość Marsa od Słońca jest 1,52 razy większa od średniej odległości Ziemi od Słońca. W związku z tym (oraz w wyniku braku porządnego efektu cieplarnianego) średnia temperatura na Marsie jest znacznie niższa niż na Ziemi. Na marsjańskich biegunach temperatura często osiąga minus 120°C. W okolicach równika nocą może być około minus 50°C. Jedynie w ciągu letnich dni temperatura osiąga dodatnie wartości – na równiku nawet 30°C. Oś obrotu Marsa jest nachylona do płaszczyzny orbity pod kątem 25°11'. Takie nachylenie przyczynia się do podobnego jak w przypadku Ziemi zróżnicowania długości pór roku.

Atmosfera Marsa złożona jest głównie z dwutlenku węgla CO₂ (około 98%). Znikomą resztę stanowią: tlenek węgla CO, tlen O₂ i para wodna. Przy powierzchni planety ciśnienie atmosfery jest bardzo małe, wynosi około 8 hPa (na Ziemi około 1013 hPa) i wartość ta ulega niewielkim wahaniom. Gdyby nawet skład atmosfery przypominał ziemski, zbyt niskie ciśnienie uniemożliwiłoby oddychanie. Przy powierzchni Marsa gęstość atmosfery wynosi 20 g/m³, a więc 64,5 razy mniej niż ziemskie równe 1,29 kg/m³.

Prędkości cząsteczek gazu atmosferycznego są różne. Dlatego najczęściej oblicza się dla cząsteczek wartość średniej prędkości kwadratowej $v_{sr} = \sqrt{3RT/\mu}$. W najcieplejsze dni na Marsie, gdy temperatura jest w pobliżu 30°C, v_{sr} wynosi około 0,4 km/s, czyli jest porównywalna ze średnią prędkością cząsteczek powietrza ziemskiego, które w warunkach normalnych mają średnią prędkość około 0,5 km/s. Jeżeli cząsteczka gazu osiągnie tzw. prędkość ucieczki z pola grawitacyjnego planety, to oddali się w przestrzeń międzyplanetarną. Porównajmy wartości prędkości cząsteczek z wartością prędkości ucieczki. Prędkość ucieczki ciała z powierzchni Marsa (druga prędkość kosmiczna) obliczona ze wzoru $v_{II} = \sqrt{2GM/R}$, gdzie $M = 6,42 \cdot 10^{23} \text{ kg}$ i $R = 3389 \text{ km}$ oznaczają masę i średni promień Marsa, wynosi około 5 km/s. Wynika stąd, że średnie prędkości cząsteczek są kilkanaście razy mniejsze od prędkości ucieczki, dlatego też Mars utrzymuje stabilną atmosferę. Mała średnia prędkość cząsteczek w porównaniu z v_{II} nie oznacza, że nie ma cząsteczek, którym udaje się uciec z Marsa. Na dużej wysokości, na skutek m.in. reakcji egzotermicznych, działania wiatru słonecznego i promieniowania kosmicznego, część gazu atmosferycznego ma wystarczającą energię kinetyczną, by uciec z Marsa. Przed kilkoma miliardami lat, w czasach gdy planety były młode i gorące, wysoka temperatura atmosfery sprzyjała ucieczce lekkich atomów i cząsteczek. Obecnie atmosfera zawiera głównie cięższe cząsteczki CO₂. W przeszłości skład atmosfery zmieniał się również pod wpływem wulkanów, które przyczyniały się do uzupełniania atmosfery gazami wyrzucanymi podczas erupcji.

Rysunek 1 przedstawia diagram fazowy ukazujący, jaki stan skupienia ma CO₂ w zależności od ciśnienia i temperatury. Punkt potrójny dla CO₂ odpowiada



Rys. 2. Diagram fazowy wody.

ciśnieniu 5180 hPa i temperaturze $T = -56,6^{\circ}\text{C}$. Na Marsie ciśnienie oscyluje w pobliżu 8 hPa, jest więc ponad 600 razy mniejsze od ciśnienia w punkcie potrójnym. Jeżeli temperatura zmienia się w granicach od około -130°C do około 30°C , to z wykresu wynika, że CO_2 na Marsie może istnieć jako gaz lub jako ciało stałe (szron), natomiast nie w stanie ciekłym. Przy wzroście temperatury szron sublimuje, stając się gazem. Za obserwowane sezonowe zmiany rozmiarów marsjańskich czap polarnych odpowiada właśnie sublimacja zestalonego CO_2 . Rozważmy jeszcze, w jakich stanach skupienia może istnieć na Marsie woda, która tam jest, lecz jeszcze nie wiemy, w jakiej ilości. Rysunek 2 przedstawia diagram fazowy z punktem potrójnym dla wody. Prostokąt zaznaczony przerywaną linią wskazuje przybliżone granice, w jakich przy powierzchni planety zmienia się ciśnienie atmosferyczne oraz temperatura. Wynika z tego, że H_2O na Marsie może istnieć w każdym z trzech stanów skupienia. Ponieważ temperatura przeważnie jest dużo niższa od 0°C , więc H_2O ma postać lodu. W letniej nocy H_2O jest w postaci lodu, ale gdy nastanie ciepły dzień, lód ten sublimuje do postaci lotnej, albo przy wyższym ciśnieniu zamienia się w ciecisz, która paruje. W atmosferze Marsa wykryto pojawianie się bardzo rozrzedzonych obłoków pary wodnej. W letni dzień wieczorem, gdy temperatura jest już niska, para wodna się skrapla, a przy dalszym ochłodzeniu woda zamarza. Przy ciśnieniu poniżej tego, jakie odpowiada punktowi potrójnemu, następuje resublimacja pary i powstaje szron. Możliwe, że w składzie czap polarnych oprócz CO_2 jest pewna ilość wodnego szronu.

Bezpieczne lądowanie na Marsie wymaga wybrania odpowiedniej pory. Czasami na powierzchni planety szaleją huragany. Mimo tego, że gęstość atmosfery jest niewielka, to jednak wichury działają z wyraźnie widocznymi skutkami. Największe huragany powstają, gdy Mars znajdzie się w pobliżu peryhelium. Wówczas burze piaskowe utrzymują się przez kilka tygodni na południowej półkuli, czasem sięgając nawet półkuli północnej. Widoczność jest wówczas bardzo ograniczona. Obliczmy moc wiatru podczas huraganu i porównajmy ją z mocą huraganów ziemskich. Prędkość wiatru w porywach dochodzi na Marsie do $v = 300 \text{ km/h} \approx 80 \text{ m/s}$. Oszacujmy wpływ wiatru marsjańskiego na przykładową powierzchnię S . Moc wiatru przez powierzchnię $P/S = \frac{1}{2}\rho v^3$ to około 5800 W/m^2 , a odpowiadające jej ciśnienie $p = \frac{1}{2}\rho v^2$ wynosi około 70 Pa. Na Ziemi odpowiednikiem marsjańskiego huraganu jest wichur mający ponad 8 stopni w skali Beauforta. Na Marsie ogromną prędkość wiatru rekompensuje mniejsza niż ziemska gęstość atmosfery, ważnym czynnikiem jest jednak niższe ciężenie – przyszli marsjańscy osadnicy będą musieli w czasie wichur odpowiednio zabezpieczać znajdujące się w rejonie złej pogody urządzenia, pojazdy i obiekty mieszkalne.

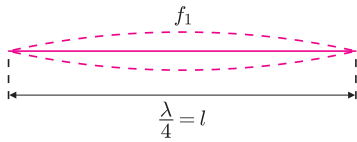
Przy odpowiednio dobrej pogodzie możemy wybrać się na **zwiedzanie planety**. Jak jednak podróżować? Pieszce wędrowki mają na Marsie jedną zaletę: ważymy tylko 38% tego, co na Ziemi. Poza tym udogodnieniem spotkają nas tylko same utrudnienia. Po wydmach, pagórkach, wśród rozpadlin i skalnych rumowisk, wśród wąwozów i kanionów, na stokach wulkanów i w górach, nasza wędrowka byłaby uciążliwa i powolna. Bardzo rozrzedzona atmosfera nie chroni przed szkodliwym promieniowaniem kosmicznym, musielibyśmy zatem nosić specjalne kombinezony ochronne. Użyteczny byłby wygodny gąsienicowy pojazd przystosowany do ruchu po wydmach i nierównym podłożu. Podróże samolotami takimi, jakich używamy na Ziemi, są niemożliwe. Samoloty turboodrzutowe oraz turbośmigłowe pobierają bezpośrednio z atmosfery ziemskiej tlen, który wykorzystują jako utleniacz paliwa. W atmosferze Marsa jest go o wiele za mało. Ponadto, aby samolot wzniósł się ponad pas startowy w rozrzedzonej marsjańskiej atmosferze, powinien uzyskać szybkość około pięciokrotnie większą niż na ziemskim lotnisku, czyli mniej więcej równą prędkości dźwięku w ziemskich warunkach. Być może na podróże w najbardziej odległe miejsca na planecie nadawałby się samolot raketowy, dysponujący własnym zapasem utleniacza, np. ciekłego tlenu. Na dalsze odległości i do miejsc trudno dostępnych podróże należałoby odbywać w specjalnym module, który wznosiłby się i dalej przemieszczał dzięki kilku silniczkom napędowym i manewrowym. A może opłaca się polecieć balonem? Siła wyporu w atmosferze ziemskiej przy powierzchni jest 171 razy większa od analogicznej siły wyporu



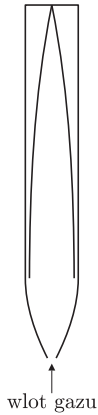
Skala Francisca Beauforta, służąca do opisu siły wiatrów na Ziemi, jest w przybliżeniu dana wzorem $B \approx 1,13v^{2/3}$, gdzie v jest prędkością wiatru w m/s.



Siła nośna balonu zależy od różnicy gęstości gazów we wnętrzu balonu i wokół niego. Na kulisty balon próżniowy o objętości V w atmosferze ziemskiej działa siła wyporu: $F_Z = \rho_1 V g_Z$. Na Marsie natomiast $F_M = \rho_2 V g_M$, gdzie $\rho_1 = 1,29 \text{ kg/m}^3$, $\rho_2 = 0,02 \text{ kg/m}^3$, co pozwala nam oszacować stosunek sił wyporu $F_Z/F_M = (\rho_1/\rho_2) \cdot (g_Z/g_M) = = 64,5 \cdot 2,65 \approx 171$.



Rys. 3



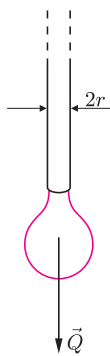
Rys. 4



Rys. 5



Rys. 6



Rys. 7

Załóżmy, że w kropłomierzu znajduje się woda o temperaturze 20°C , a średnica wewnętrzna otworu wylotowego wynosi $d = 1\text{ mm}$. Współczynnik napięcia powierzchniowego dla wody w tej temperaturze wynosi $\sigma = 7,27 \cdot 10^{-2}\text{ N/m}$, a gęstość wody $\rho = 10^3\text{ kg/m}^3$.

w atmosferze Marsa. Nie jest zatem oczywiste, czy siła wyporu pokona ciężar samego balonu i czy on się wzniesie. Aby to rozstrzygnąć, obliczymy ciężar kulistego balonu próżniowego oraz wartość siły wyporu działającej na ten balon w atmosferze Marsa. Aby balon zachował kulisty kształt, powinien być wykonany ze sztywnego materiału. Załóżmy, że nasz „balon próbny” ma promień 1 m i jest wykonany z nowoczesnego włókna węglowego, mającego niewielką gęstość $\rho_b = 600\text{ kg/m}^3$. Załóżmy, że ścianka balonu ma grubość $d = 0,1\text{ mm}$. Ciężar Q pustego balonu na Marsie wynosi: $Q = mg_M = 4\pi r^2 \rho_b d g_M \approx 2,8\text{ N}$. Siła wyporu jest równa $\rho_2 V g_M = \rho_2 (4/3)\pi r^3 g_M = 0,31\text{ N}$, jest zatem mniejsza niż Q . Niewielka gęstość atmosfery jest przyczyną niewystarczającej siły wyporu.

Z tego samego powodu niektóre efekty akustyczne są na Marsie inne niż na Ziemi. Obliczymy prędkość dźwięku przy powierzchni Marsa, przyjmując dane takie, jak przy obliczeniu gęstości marsjańskiej atmosfery. Stosunek ciepła właściwych dla CO_2 wynosi $k = c_p/c_v = 1,3$. Prędkość dźwięku w temperaturze -73°C wynosi $v_{s,M} = \sqrt{kRT/\mu} = 220\text{ m/s}$. Dźwięk w atmosferze marsjańskiej rozchodzi się około 1,5 raza wolniej niż w atmosferze ziemskiej. Czy ma to wpływ na dźwięki muzyki, którą chcielibyśmy zagrać w atmosferze Marsa? Weźmy pod uwagę strunę instrumentu muzycznego (rys. 3). Częstotliwość podstawowa drgań f_1 zależy od wielkości siły F naciągu struny oraz od masy m i długości l struny według wzoru: $f_1 = \sqrt{F/ml}$. Jeżeli parametry te będą takie jak na Ziemi, to i częstotliwość f_1 oraz wyższe harmoniczne również będą takie same. Inaczej natomiast zagrają aerofony. Weźmy pod uwagę zamkniętą piszczałkę (rys. 4). Jeżeli na Ziemi w temperaturze 20°C wydaje

ona ton podstawowy o częstotliwości $f_1 = 440\text{ Hz}$, to ma ona długość $l = v_{s,Z}/(4f_1) = 19,3\text{ cm}$. Na Marsie, przy mniejszej prędkości dźwięku piszczałka ta ma ton podstawowy o częstotliwości $f_1 = 287\text{ Hz}$; na Ziemi ma ton podstawowy a^1 równy 440 Hz , natomiast na Marsie jej ton podstawowy zbliżony jest do tonu d^1 . Aby piszczałka miała na Marsie ton podstawowy a^1 , jej długość powinna wynosić $12,6\text{ cm}$. Piszczałka przeniesiona z atmosfery ziemskiej do atmosfery marsjańskiej ma podstawowy ton niższy, a jego częstotliwość stanowi $0,65$ częstotliwości na Ziemi. Aby na Marsie zagrać

na organach według zapisu nutowego stosowanego na Ziemi, należy skorzystać z piszczałek mających około 65% długości piszczałek użytych na Ziemi. Gdy zagramy piszczałkami takimi samymi jak na Ziemi, tony muzyki będą transponowane. Na rysunku 5 przedstawiony jest zapis nutowy popularnej dziecięcej piosenki „Włazł kotek na płotek i mruga...”. Tak gramy na Ziemi. Jeżeli na Marsie nie zmienimy piszczałek i zagramy zgodnie z tym zapisem, to usłyszymy muzykę według zapisu przedstawionego na rys. 6. Aby na Marsie muzyka ta brzmiała jak na Ziemi, należy wybrać do każdego tonu piszczałkę o 35% krótszą niż na Ziemi i korzystać z ziemskiego zapisu nutowego (rys. 5). Z kolei, jeżeli krótsze piszczałki przeniesiemy na Ziemię, to dadzą one częstotliwości $1,53$ razy większe niż na Marsie – piszczałka, która na Marsie ma długość $12,6\text{ cm}$ i wydaje tam ton podstawowy a^1 o częstotliwości 440 Hz , na Ziemi daje ton podstawowy $674,6\text{ Hz}$ (dis^2).

Na koniec rozważmy zjawisko tworzenia się kropli cieczy wychodzących z kropłomierza (rys. 7), znajdującego się na Marsie w klimatyzowanym pomieszczeniu. Na wypływającą kroplę działa siła napięcia powierzchniowego. Gdy kropla stanie się odpowiednio duża, jej ciężar przewyżczy siłę napięcia powierzchniowego i kropla oderwie się. Jak duża może być kropla na Marsie? Dla uproszczenia obliczeń załóżmy, że kropla ma kształt kulisty. Gdy kropla odrywa się, jej ciężar Q równy jest sile $F = \pi d \sigma$ napięcia powierzchniowego, proporcjonalnej do obwodu otworu kropłomierza πd i napięcia powierzchniowego σ . Z porównania sił dostajemy promień $R_M = (3d\sigma/(4\rho g_M))^{1/3}$. Po podstawieniu wartości liczbowych otrzymamy $R_M = 2,45\text{ mm}$. Dla Ziemi natomiast, gdzie $g_Z = 2,65 g_M$, dostaniemy $R_Z = 2,45/(2,65)^{1/3} = 1,8\text{ mm}$. Wynika stąd, że przeciętna marsjańska kropla jest około $2,5$ raza większa od ziemskiej, co może mieć znaczenie podczas odmierzania kropel kropłomierzem, a także podczas kąpieli pod marsjańskim prysznicem.