

Jakub Zieliński, Jacek Przybylski

Zakład Biofizyki i Fizjologii Człowieka Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego
Kierownik: prof. dr hab. n. med. J. Przybylski

Ile wody tracimy z oddechem?

How much water is lost during breathing?

Publikacja została przygotowana w ramach umowy o pracę na Warszawskim Uniwersytecie Medycznym

Abstract

Arising from the Antoine equation and the ideal gas law, the volume of exhaled water has been calculated. Air temperature, humidity and minute ventilation has been taken into account. During physical exercise amount of exhaled H₂O is linear, but not proportional to heart rate. And so at the heart rate of 140 bpm amount of exhaled water is approximately four times higher than during the rest and equals about 60–70 ml/h. The effect of external temperature and humidity on water lost via lungs was assessed as well. When temperature of inspired air and its humidity is 35°C and 75% respectively loss of water is 7 ml/h. Whereas when above parameters are changed to minus 10°C and 25% lung excretion of H₂O increases up to 20 ml/h. The obtained results may become the basis for the assessment of osmolarity changes on the surface of the lower airways. The increase of which is recently considered as one of the factors responsible for exercise induced bronchospasm.

Key words: physical activity, minute ventilation, excretion of water

Pneumonol. Alergol. Pol. 2012; 80, 3: 339–342

Streszczenie

Wychodząc z równania Antoine'a oraz równania stanu gazu doskonałego, obliczono objętość wody wydalanej z organizmu z powietrzem oddechowym, w zależności od temperatury i wilgotności powietrza oraz wentylacji minutowej. W czasie wysiłku fizycznego ilość wydychanej wody zależy liniowo od rytmu serca, ale nie jest do niego proporcjonalna. Przy tętnie 140 uderzeń/min wydalanie wody przez płuca jest 4-krotnie większe niż w spoczynku i wynosi 60–70 ml/h. Obliczono wpływ temperatury i wilgotności powietrza wdychanego na ilość wydychanej wody. Przykładowo, w temperaturze 35°C i przy wilgotności powietrza wdychanego równej 75% człowiek traci około 7 ml H₂O/h. Natomiast w temperaturze –10°C i przy wilgotności 25% utrata ta wzrasta do około 20 ml/h. Uzyskane wyniki mogą się stać podstawą oceny wzrostu osmotyczności w dolnych drogach oddechowych, a wzrost ten jest uważany za jeden z czynników odpowiedzialnych za powysiłkowy skurcz oskrzeli.

Słowa kluczowe: wysiłek fizyczny, wentylacja minutowa, wydalanie wody

Pneumonol. Alergol. Pol. 2012; 80, 3: 339–342

Utrata wody z powietrzem wydechowym może w istotny sposób modyfikować właściwości fizykochemiczne fazy ciekłej powierzchni dyfuzyjnej płuc. Celem niniejszej pracy była ilościowa analiza objętości wydychanej wody w zależności od wielkości wentylacji, wilgotności i temperatury powietrza wdychanego.

Przyjmuje się, że człowiek traci poprzez płuca około 600 ml wody dziennie, czyli 25 ml/h [1, 2]. Ilość wody wydalanej na skutek oddychania zależy jednak od temperatury i wilgotności wdychanego powietrza oraz od wentylacji minutowej (MV, *minute ventilation*). W różnych sytuacjach ilość wydalanej tą drogą wody może bardzo odbiegać od wyżej wspomnianych 25 ml/h.

Adres do korespondencji: dr n. fiz. Jakub Zieliński, Zakład Biofizyki i Fizjologii Człowieka WUM, ul. Chałubińskiego 5, 02–004 Warszawa, tel./faks: (22) 628 78 46, tel.: (22) 628 63 34, e-mail: jziel@op.pl

Praca wpłynęła do Redakcji: 12.07.2011 r.
Copyright © 2012 Via Medica
ISSN 0867–7077

Ilość wydalanej pary wodnej zmienia się w zależności od parametrów powietrza, przy zachowaniu stałej wentylacji. W spoczynku człowiek wykonuje średnio 16 oddechów na minutę. Objętość spokojnych oddechów (V_T) wynosi przeciętnie 0,5 l. Zatem wentylacja minutowa wynosi średnio 8 l.

W temperaturze poniżej 100°C woda pozostaje w stanie ciekłym. Jednak pewna jej ilość może „się rozpuścić” jako para wodna w powietrzu. Ciśnienie pary nasyconej to oczywiście maksymalne ciśnienie parcjale pary wodnej w powietrzu. Jeśli powietrze zawiera maksymalną ilość pary wodnej, mówi się o parze nasyconej lub o wilgotności równej 100%. Można przyjąć, w sposób nieodbiegający od stanu rzeczywistego, że wydychane powietrze jest parą nasyconą.

Prężność (ciśnienie parcjale) pary nasyconej zależy silnie od temperatury i została następująco opisana wzorem Antoine’a [3]:

$$\text{Log}_{10}(p) = 8,07131 - \frac{1730,63}{233,426 + T} \quad (1)$$

Ciśnienie jest podane w mm Hg, a temperatura — w stopniach Celsjusza. Przy wyprowadzaniu powyższego wzoru założono, że ciśnienie powietrza wynosi 760 mm Hg, czyli jedną atmosferę.

Wzór Antoine’a pozwala obliczyć logarytm dziesiąty ciśnienia nasyconej pary wodnej. Samo ciśnienie wylicza się bardzo prosto według wzoru:

$$P = 10^{\log(p)} \quad (2)$$

Na rycinie 1 ukazano zależność prężności pary nasyconej od temperatury. W zakresie temperatur charakterystycznych dla naszego klimatu zmiany są kilkukrotne.

Niejako przy tej sposobności stało się jasne, dlaczego zimą powietrze w mieszkaniach jest „suche”. W powietrzu przegrzanego mieszkania może się rozpuścić niemal 10 razy więcej pary wodnej niż w takiej samej objętości zimnego powietrza na

zewnątrz. Dlatego zimą wilgotność powietrza w mieszkaniach niekiedy zmniejsza się do 10%, nawet gdy na zewnątrz panuje „wilgoć”.

Znając ciśnienie, można skorzystać z równania stanu gazu doskonałego, aby obliczyć liczbę moli pary wodnej wydychanej w ciągu godziny:

$$n = \frac{p \cdot MV \cdot 60}{133 \cdot R \cdot (T + 237,15)} \quad (3)$$

gdzie R to stała gazowa, równa 8,314472 [J/(mol·K)]; liczba 133 w mianowniku wynika z konieczności przeliczenia mm Hg na paskale, natomiast liczba 237,15 — z przeliczenia jednostek temperatur (stopnie Celsjusza na Kelwina).

Jak wiadomo, 1 mol pary wodnej ma masę 18 g, a jeden gram wody zajmuje objętość 1 ml. Dlatego po pomnożeniu liczby moli przez 18 otrzymujemy objętość utraconej wody w mililitrach. Od tak wyliczonej wartości należy odjąć wodę zawartą we wdychanym powietrzu.

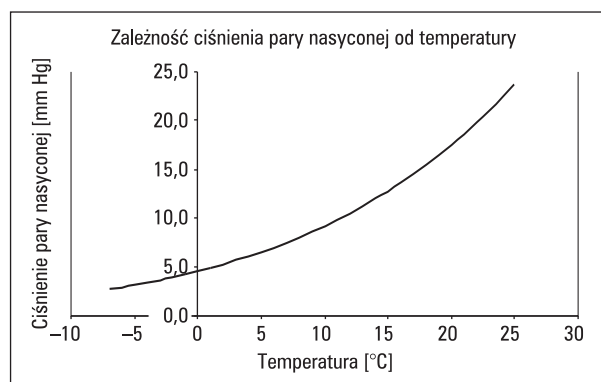
Przy wilgotności 100%, na przykład we mgłę, dokonuje się analogicznych obliczeń, wstawiając temperaturę powietrza w miejsce temperatury wnętrza ciała. W przypadku mniejszej wilgotności powietrza po prostu należy pomnożyć obliczoną objętość wchłoniętej wody przez wilgotność.

Zatem, znając objętość i częstotliwość oddechów, temperaturę wnętrza ciała oraz temperaturę i wilgotność powietrza można policzyć ilość wody traconej podczas oddychania.

W tabeli 1 przedstawiono ilość wody [ml/h] traconej z oddechem w różnych warunkach atmosferycznych.

W temperaturze -10°C powietrze zawiera tak mało wody, że jego wilgotność ma niewielkie znaczenie dla utraty wody przez płuca. Odwrotna sytuacja ma miejsce podczas upału.

Jak wiadomo, przy wysokich temperaturach powietrza następuje istotna utrata wody z potem.



Rycina 1. Zależność ciśnienia parcjalego pary nasyconej od temperatury powietrza

Figure 1. Dependence of vapor pressure on air temperature

Tabela 1. Utrata wody z oddechem [ml/h] przy stałej ciepłocie ciała wynoszącej 37°C i wentylacji minutowej równej 8 l/min

Table 1. Water lost via lungs [ml/h] at constant body temperature equal to 37°C and minute ventilation equal to 8 l/min

		Wilgotność wdychanego powietrza		
		25%	50%	75%
Temperatura zewnątrzna	35°C	16,24	11,52	6,79
	20°C	18,91	16,84	14,78
	5°C	20,16	19,36	18,55
	-10°C	20,70	20,42	20,14

Nie odwadniamy się natomiast znacząco przez płuca. Podczas mrozów pocimy się tylko nieznacznie, w zamian za to jednak więcej wody tracimy z oddechem. Poza tym mechanizm utraty wody jest znacząco inny. Para wodna jest gazem, który odparowuje z powierzchni pęcherzyków płucnych, nie zawiera więc soli. Pot natomiast przenika przez skórę jako ciecz. Odwadnianie przez skórę prowadzi zatem do znacznie większej utraty sodu i potasu niż odwadnianie przez płuca.

Jak przedstawiono w tabeli 1, w temperaturze 35 °C i przy wilgotności 75% człowiek traci już bardzo niewiele wody. Powyżej 37 °C i przy wilgotności bliskiej 100% ilość wody wchłanianej podczas wdechu jest większa niż wydalonej podczas wydechu. Prowadzi to do duszności i wrażenia „parności”.

Wspomniane wrażenie „parności” i problemy z oddychaniem mogą być odczuwalne już w temperaturach nieznacznie niższych niż 37°C. Podczas oddychania chłodnym powietrzem część wody z przestrzeni pozakomórkowej odparowuje na powierzchni pęcherzyków płucnych. Jeżeli przy dużej wilgotności powietrza temperatura powietrza zbliża się do temperatury wnętrza ciała, to proces ten zostaje zatrzymany, co wymusza zwiększony odpływ naczyniami limfatycznymi.

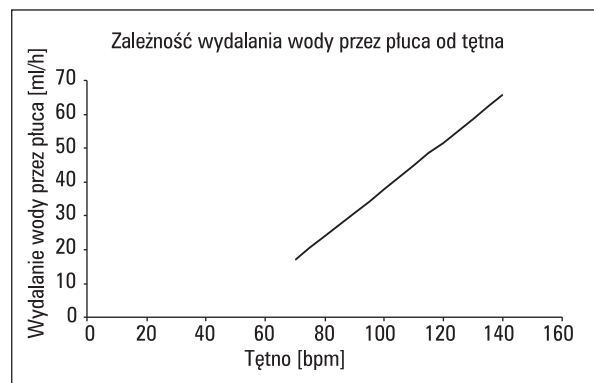
Do tej pory wychodzono z założenia, że oddychająca osoba pozostaje w spoczynku. Podczas wysiłku wentylacja może się zwiększyć z 8 l/min do 200 l/min, czyli ponad 20-krotnie. Oczywiście, nie jest możliwe utrzymanie tak dużej wentylacji przez dłuższy czas. Jednak podczas długotrwałego wysiłku możliwy jest jej kilkukrotny wzrost. Dlatego podczas uprawiania dyscyplin wytrzymałościowych (triathlon) możliwa jest utrata nawet kilku litrów wody przez płuca.

Zazwyczaj bezpośredni pomiar MV podczas wysiłku fizycznego nie jest możliwy. Bezproblemowy jest natomiast pomiar tętna. Można się więc posłużyć wzrostem tętna jako miarą natężenia wysiłku fizycznego. Korelacje między tętnem a zużyciem tlenu oraz zużyciem tlenu i wentylacją są zaskakująco duże — dla wysiłków aerobowych wynoszą ponad 80% [4]. Na podstawie tych wyników można oszacować zależność między MV i tętnem:

$$MV = HR \cdot 0,66 - 30 \quad (4)$$

W rezultacie można obliczyć ilość wody traczonej z oddechem w funkcji tętna. Wyniki przedstawiono na rycinie 2.

Jak widać, jest to zależność liniowa, co nie oznacza, że ilość traczonej wody jest proporcjonal-



Rycina 2. Zależność wydalenia wody przez płuca, podczas wysiłku fizycznego, od tętna; wykorzystano zależności między wentylacją minutową, zużyciem tlenu i tętnem (źródło: [4])

Figure 2. Dependence of water excretion via lungs during physical exercise on the heart rate. Relationships between minute ventilation, oxygen consumption and heart rate has been used

na do tętna — przedłużenie prostej nie przecina środka układu współrzędnych, dlatego 2-krotne zwiększenie tętna, z 70 uderzeń/min do 140 uderzeń/min, powoduje prawie 4-krotny wzrost wentylacji i utraty wody.

Należy pamiętać, że wartości te są znacząco wyższe u chorych z gorączką. Jest to spowodowane zwiększonym metabolizmem przy wyższej temperaturze. Dlatego tak ważne jest, aby podczas chorób związanych z zapaleniem dróg oddechowych spożywać więcej płynów niż zazwyczaj. Nie chodzi tylko o możliwość odwodnienia — utrata wody przez płuca może powodować zmiany fizykochemiczne właściwości fazy ciekłej powierzchni dyfuzyjnej płuc.

Co więcej, wykazano [5], że wzrost osmolarności na poziomie dolnych dróg oddechowych może, poprzez uwolnienie histaminy, leukotrienów i prostaglandyn, prowadzić do skurczu oskrzeli u osób z astmą. Z wyników zebranych w tabeli 1 wynika, że oddychanie mroźnym powietrzem powoduje nie tylko wychłodzenie dróg oddechowych, ale również znaczną utratę wody przez płuca i to niezależnie od wilgotności powietrza.

Zatem opisane w niniejszej pracy zależności wydają się mieć, oprócz aspektu czysto teoretycznego, również i implikacje kliniczne.

Konflikt interesów

Autorzy oświadczają, że podczas przygotowania niniejszej publikacji nie wystąpił żaden konflikt interesów.

Piśmiennictwo

1. Szepańska-Sadowska E. Fizjologia człowieka z elementami fizjologii stosowanej i klinicznej. Traczyk W.Z., Trzebski A. Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2001; 831–832.
2. Konturek S. Fizjologia człowieka. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2001.
3. Antoine C. Tensions des vapeurs; nouvelle relation entre les tensions et les températures. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences 1888; 107: 681–684, 778–780, 836–837.
4. Gastinger S., Sorel A., Nicolas G., Gratas-Delamarche A., Prioux J. A comparison between ventilation and heart rate as indicator of oxygen uptake during different intensities of exercise. J. Sports Sci. Med. 2010; 9: 110–118.
5. Anderson S.D., Daviskas E. The mechanism of exercise-induced asthma is. J. Allergy Clin. Immunol. 2002; 106: 453–459.