

Bogomir Vrhovec¹, Jurij Gorjanc², Igor B. Mekjavič³

Hipoksična soba v Ratečah

Rateče Hypoxic Room

IZVLEČEK

KLJUČNE BESEDE: hipoksija, višinska aklimatizacija, hipoksična soba

Prilaganje na višino lahko izvedemo z izpostavljanjem hipoksiji v hiperbarični komori ali pa z vdihavanjem hipoksične plinske mešanice pri normalnem zračnem tlaku. Opisan je razvoj hipoksične sobe, v kateri hipoksično mešanico vzdržuje generator dušika. Generator, ki deluje po principu izmeničnega priskravanja in izsesavanja, zmanjša vsebnost kisika v zraku na 5%. Plinsko mešanico, ki vsebuje 95% dušika, črpamo v zaprt prostor. Koncentracija kisika v prostoru je stalno nadzorovana in ne more doseči vrednosti, nižjih od 11%. Če upade pod zeleno vrednost, se generator dušika izklopi, v prostor pa se prične vpihavati zunanji zrak. Istočasno se vključi zvočni alarm.

Hipoksično sobo so uspešno uporabljali športniki, udeleženci olimpijskih iger v Salt Lake Cityju in alpinisti pred odpravami v visoke gore.

ABSTRACT

KEY WORDS: hypoxia, altitude acclimatisation, hypoxic room

Acclimatisation to altitude may be achieved by intermittent exposure to hypoxia in a hyperbaric chamber or by inhaling a hypoxic gas mixture under normobaric conditions. We describe the development of a hypoxic room based on the latter principle. A nitrogen generator based on the vacuum pressure swing adsorption principle reduces the oxygen content of air to 5%. The resultant gas mixture containing 95% nitrogen is pumped into a sealed apartment. The level of oxygen in the apartment is monitored continuously and cannot fall below 11%. Should it fall below a preset value, the nitrogen generator is switched off, closely followed by the activation of fan to transport external air into the apartment. An audible alarm is also activated.

The hypoxic room has been successfully used by athletes prior to attending the Salt Lake City Olympic games and by alpinists prior to high altitude expeditions.

¹ Bogomir Vrhovec, univ. dipl. ing. elektr., Odsek za avtomatiko, biokibernetiko in robotiko, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana.

² Jurij Gorjanc, dr. med., Splošna bolnišnica Slovenj Gradec, 2380 Slovenj Gradec.

³ Prof. dr. Igor B. Mekjavič, Institute of Biomedical and Biomolecular Sciences, Department of Sports and Exercise Science, University of Portsmouth, St. Michael's Building, White Swan Road, Portsmouth P01 2DT, Hampshire United Kingdom, Odsek za avtomatiko, biokibernetiko in robotiko, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000 Ljubljana.

UVOD

Za uspešno in učinkovito prilagajanje na višinske razmere je potrebno telo za določen čas redno izpostavljati hipoksičnemu okolju. V visokogorju se hipoksija veča z nadmorsko višino zaradi padca tlaka. Višinsko hipoksijo lahko umetno posnemamo z barokomoro, v kateri lahko tlak znižamo, oziroma v kateri lahko ustvarimo podtlak.

Barokomore so zelo drage, potrebujejo veliko prostora in vključujejo veliko dodatne opreme. Čeprav barokomore dovoljujejo zelo natančno uravnavanje nadmorske višine in so zlati standard pri raziskavah o višinski fiziologiji in medicini, njihova cena in prostorske potrebe omejujejo uporabo v praksi, še zlasti pri aklimatizaciji športnikov in alpinistov. Pri postopkih aklimatizacije športniki ali alpinisti živijo v barokomori, v kateri je treba zagotoviti 24-urni tehnični in zdravstveni nadzor.

Čeprav je več teorij o optimalnem režimu za aklimatizacijo športnikov na višino pred tekmo na višji nadmorski višini (1–7), kot tudi več mnenj o optimalni pripravi alpinistov pred odpravo (8–10), je pri obeh ključnega pomena vzpostaviti hipoksičen dražljaj. Do nedavnega se je aklimatizacija izvajala predvsem na terenu. Redki posamezniki, ki so imeli na voljo barokomoro v kakšnem lokalnem institutu, pa so se lahko aklimatizirali v domačem okolju. Zadnje čase je veliko zanimanje za simulacijo višinske hipoksije z zmanjševanjem vsebnosti kisika v dihalni mešanici oziroma v celotnem bivalnem prostoru. Delni tlak kisika (PO_2) je odvisen od barometričnega tlaka (P_B) in koncentracije kisika (FO_2), $PO_2 = FO_2 \times P_B$. S fiziološkega stališča je hipoksični stimulus (zmanjšani PO_2) enak, če ga dosežemo z znižanjem P_B , z znižanjem FO_2 ali znižanjem obeh dejavnikov hkrati.

Fiziološke raziskave so pokazale, da so tudi učinki aklimatizacije enaki, če višino simuliramo s podtlakom v barokomori ali pa z zmanjšanim deležem kisika oziroma povečanim deležem dušika v atmosferi pri normalnem zračnem tlaku (8). Tako mešanico zraka lahko pripravimo iz utekočinjenega plina (kisika in dušika), vendar so glede na izgube potrebne velike količine utekočinjene-

ga plina. Pri iskanju ustrezne tehnologije priprave zraka se je izkazalo, da se v ta namen lahko uspešno uporabi tehnologija, ki se v živilski industriji uporablja za preprečevanje oksidacije sadja v hladilnicah. Naprave, ki jih ta tehnologija uporablja, se imenujejo generatorji dušika. Dodatna prednost te tehnologije je, da je v prostorih normalen atmosferski pritisk, zato za izvedbo niso več potrebni hermetično zaprti prostori. V višinsko hišo ali sobo lahko spremenimo običajno zgradbo s solidno izvedenimi zaporami za vodne hlape med sloji termične izolacije. Ta tehnologija je tudi temelj višinske sobe v Ratečah.

METODOLOGIJA

V mansardnem prostoru v izmeri 50 m^3 smo uredili pogoje za simulacijo nadmorskih višin do 5500 metrov. Sestavni deli celotne opreme so:

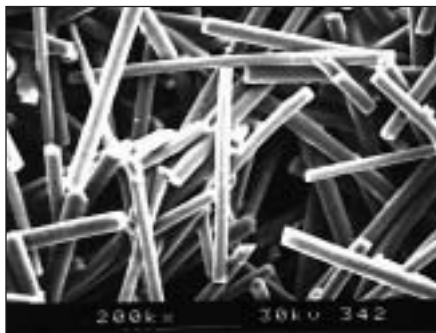
- generator dušika,
- kisikovi analizatorji,
- ventilator,
- programirani nadzorni sistem in
- računalniški program.

Generator dušika deluje tako, da iz atmosferskega zraka izloči del kisika. Na ta način ima zrak na izhodu naprave zvišano koncentracijo dušika in znižano koncentracijo kisika (1 % do 3 %). Postopek, po katerem poteka pridobivanje dušika, imenujemo adsorbicija ali priskravanje.

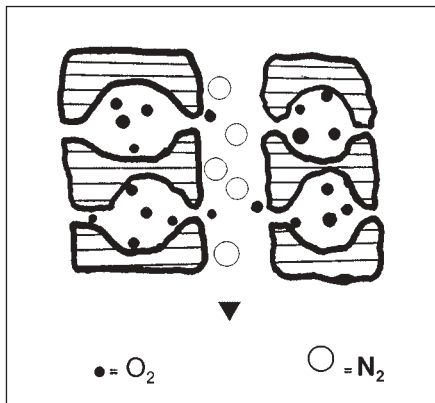
Priskravanje je postopek, pri katerem atmosferski zrak vpihavamo skozi vlaknasto strukturo aktivnega oglja, ki jo imenujemo karbonska membrana (CMS – Carbon Molecular Sieve) (slika 1). Ogljikova vlakna so na mestih, kjer se dotikajo, povezana in imajo premer 6 do 20 mikrometrov.

Ker so kisikove molekule manjše od dušikovih, lažje in hitreje prodirajo v pore med vlakna kot dušikove molekule in se pilepijo na notranje površine. Ta proces se imenuje priskravanje (adsorbicija) in ga shematsko prikazuje slika 2. S puščico je označena smer pretoka zraka.

V zraku, ki izhaja iz posode, se zaradi priskravanja zniža koncentracija kisika. Čez nekaj časa se pore v v aktivnem oglju zasitijo s kisikovimi molekulami. Da bi aktivno oglje



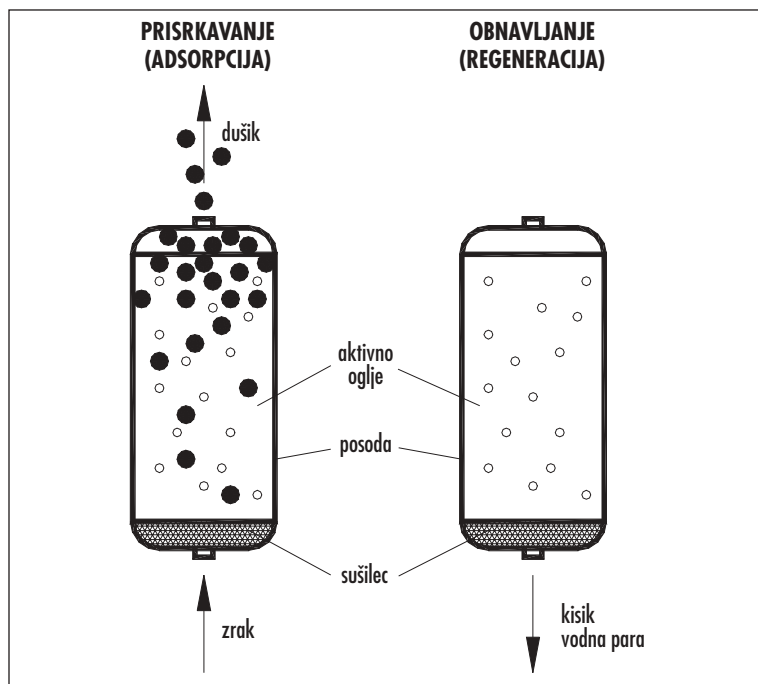
Slika 1. *Vlaknasta struktura aktivnega oglja, slikana z elektronskim mikroskopom.*



Slika 2. *Priskravanje kisika na porozni strukturi aktivnega oglja.*

lahko znova priskravalo kisik, ga je treba obnoviti. Obnavljanje izvedemo tako, da prekinemo vpihovanje zraka ter s pomočjo vakumske črpalke izsesamo priskrani kisik. Postopek, kjer v eni stopnji poteka adsorpcija, v drugi pa izsesavanje z vakuumom, se strokovno označuje kot VPSA (angl. *vacuum pressure swing adsorption*), izmenično priskravanje in izsesavanje.

Da ne bi bila zaradi obnavljanja prekinjena dobava dušika, proces poteka izmenično v dveh enotah. Medtem ko v eni poteka proces priskravanja, v drugi poteka proces obnavljanja. Vsaka stopnja se izvaja eno minuto, vmes je le kratek mrtev čas, ki je potreben za preklon posod in izenačitev tlakov. Dvostopenjsko delovanje generatorja dušika prikazuje slika 3.



Slika 3. *Dvostopenjsko delovanje generatorja dušika.*

Posebna odlika opisanega postopka je v tem, da za delovanje ne potrebuje visokega tlaka. Priskravanje je optimalno pri nadtlaku 1 bar. VPSA – generator dušika v sobi ustvarja rahel nadtlak (do 10 mm H₂O), kar onemogoča vdor atmosferskega zraka, bogatega s kisikom, iz zunanosti v višinsko sobo.

Generator dušika, ki je uporabljen v višinski sobi v Ratečah (slika 4), sestavljajo:

- dve posodi za priskravanje, ki vsebujeta aktivno oglje,
- zračna črpalka,
- vakumska črpalka,
- ventili in
- nadzorno krmilni sistem.

Za meritev in regulacijo koncentracije kisika v višinski sobi skrbi nadzorno krmilni sistem, ki ga sestavljata krmilnik generatorja dušika in nadzorni program, ki se izvaja na osebнем računalniku. Meritev koncentracije kisika se izvaja s pomočjo elektrokemičnega analizatorja. V primeru previsoke koncentracije kisika deluje VPSA – generator neprekinjeno, če pa koncentracija kisika upade pod nastavljeni prag, se generator dušika izklopi, vključí pa se ventilator, ki v prostor črpa svež zrak iz zunanosti. Nadzorno krmilni sistem dopušča nastavitve koncentracije med 12 in 21 % kisika (specifikacije so podane v tabeli 1).

Neodvisno od nadzornega krmilnega sistema deluje drugi analizator koncentracije kisika, ki je namenjen opozarjanju v primeru motnje v delovanju krmilnika. V kolikor

Tabela 1. Specifikacija generatorja dušika.

princip delovanja	izmenična adsorpcija s pomočjo vakuma (angl. <i>vacuum pressure swing</i>)
kapaciteta sistema	3–6 m ³ /uro (nastavljivo)
koncentracija O ₂ na izhodu	1–3%
čas redukcije v prostoru 50 m ³ v 6 urah	od 21 % na 11 % O ₂
napajanje	220V 50Hz
priključna moč	1,2 kVA
območje delovanja	10–30°C
elektrokemični analizatorji kisika:	
– merilno območje	0–25 % O ₂
ponovljivost	0,2%
resolucija	0,1%
izhod	tokovna zanka 4–20 mA

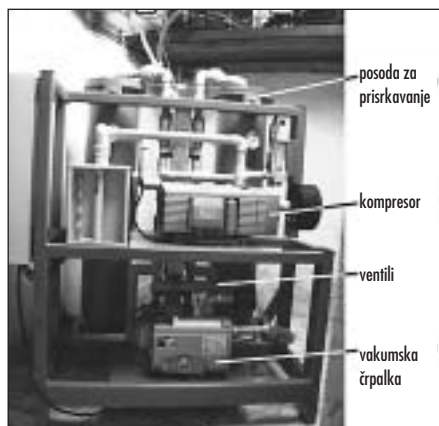
koncentracija upade pod dovoljeni minimum (12 %), merilnik sproži zvočni alarm. Zvočni alarm je znak, da je z regulacijskim sistemom nekaj narobe in da morajo gostje sobo nemudoma zapustiti oziroma odpreti okna.

Posamezne parametre lahko upravljalec nastavi preko ukazne plošče na samem krmilniku, kar je precej zamuden in nepregleden postopek. Za lažje upravljanje s krmilnikom je na osebнем računalniku na voljo nadzorni program, ki omogoča nastavljanje parametrov, odčitavanje trenutnih vrednosti koncentracije kisika, spremljanja alarmov in prikaz zgodovine koncentracije kisika v višinski sobi. Nadzorni program je zaščiten z geslom, tako da ga lahko zažene le upravljalec.

V zaprtih prostorih, kjer dlje časa bivajo ljudje, lahko sčasoma pride do povečane, človeku nevarne koncentracije ogljikovega dioksida. Da v višinsko sobo ne bi bilo treba vgraditi dodatnega sistema za izločanje ogljikovega dioksida, je dogovorjen tak režim obratovanja, da zjutraj, ko gostje odidejo iz sobe na trening, upravljalec generator dušika izklopi, sobo temeljito prezračí, nato pa jo zapre in vključí generator dušika.

REZULTATI IN ZAKLJUČEK

Pri določanju vsebnosti kisika za simulacijo določene nadmorske višine v višinski sobi je treba upoštevati tudi izhodiščno nadmorsko



Slika 4. VPSA generator dušika.

višino (900 m) oziroma izhodiščni tlak v Ratečah. Za natančno simulacijo višine je treba vsebnost kisika spreminjati z barometričnim tlakom. Pri določeni vsebnosti kisika lahko pričakovane dnevne in sezonske spremembe barometričnega tlaka povzročijo spremembe v simulirani višini. Analiza sezonskih sprememb barometričnega tlaka v Ratečah je pokazala, da pri stalni nastavitvi vsebnosti kisika lahko ob vremenskih spremembah pričakujemo spremembe v simulirani višini do 100 m (v ekstremnih primerih do 200 m). Taka nastavitve zadostuje pri aklimatizaciji športnikov in alpinistov.

Višinsko sobo so se uspešno uporabljali alpinisti in smučarski tekači. Omembe vredna je uporaba višinske sobe treh članov ekipe, ki se je udeležila zimskih olimpijskih iger v Salt Lake Cityju. Športniki so mesec dni pred odhodom podnevi trenirali na okoliških smučiščih, na višini 900 m nadmorske višine, ponoči pa spali na simulirani nadmorski višini do 3000 m. Fiziološki procesi aklimatizacije so tako potekali ponoči, med spanjem. Subjektivni občutki z občasnih višinskih treningov

na sosednjih ledenikih kot tudi objektivna zapažanja na podlagi meritev srčnega utripa so pokazala pospešeno in bolj učinkovito prilagajanje na obremenitev na višini.

Alpinisti, člani različnih visokogorskih odprav, so se tudi uspešno višinsko aklimatizirali v višinski sobi. V primerjavi s športniki so se alpinisti v povprečju le en teden pripravljali v višinski sobi. Postopek je bil enak kot pri športnikih. Podnevi so trenirali na okoliških gorah, ponoči pa so spali v višinski sobi. V nasprotju s športniki, ki so ves čas aklimatizacije spali na enaki višini (na nadmorski višini lokacije tekem), so alpinisti postopoma zmanjševali vsebnost kisika v sobi. Ponavadi je bila končna simulirana višina enaka nadmorski višini baznega tabora Everesta (5300 m).

Vse aklimatizacije, ki so se izvajale nad simulirano višino 4000 m, so bile opravljene v sodelovanju z zdravnikom odprave ali z zdravnikom, ki je nadzoroval postopek aklimatizacije. Tisti člani odprav, ki še niso dosegli večjih nadmorskih višin v svoji plezalni karieri, pa so pod zdravniškim nadzorom lahko ocenili svoj odziv na večje nadmorske višine.

LITERATURA:

1. Chapman RE, Stray-Grundersen J, Levine BD. Individual variation in response to altitude training. *J Appl Physiol* 1998; 85: 1448-1456.
2. Bailey DM, Davies B, Romer L, Castell L, Newsholme E, Gandy G. Implications of moderate altitude training for sea-level endurance in elite distance runners. *Eur J Appl Physiol* 1998; 78: 360-368.
3. Haykowsky MJ, Smith DJ, Malley P, Norris SR, Smith ER. Effects of short term altitude training and tapering on left ventricular morphology in elite swimmers. *Can J Cardiol* 1998; 14: 678-681.
4. Stray-Gundersen J, Levine BD. »Living high and training low« can improve sea level performance in endurance athletes. *Br J Sports* 1999; 33: 150-151.
5. Fulco CS, Rock PB, Cymerman A. Improving athletic performance: Is altitude residence or altitude training helpful? *Aviat Space Environ Med* 2000; 71: 162-171.
6. Hahn AG, Gore CJ, Martin DT, Ashenden MJ, Roberts AD, Logan PA. An evaluation of the concept of living at moderate altitude and training at sea level. *Comp Biochem Physiol* 2001; Part A 128: 777-789.
7. Meeuwesen T, Hendriksen IJM, Holeywijn M. Training-induced increases in sea-level performance are enhanced by acute intermittent hypobaric hypoxia. *Eur J Appl Physiol* 2001; 84: 283-290.
8. Wilber RL. Current trends in altitude training. *Sports Medicine* 2001; 31: 249-265.
9. Bartscher M, Bachmann O, Hatzl T, Hotter B, Likar R, Philadelphia M, Nachbauer W. Cardiopulmonary and metabolic responses in healthy elderly humans during a 1-week hiking programme at high altitude. *Eur J Appl Physiol* 2001; 84: 379-386.
10. Ward MP, Milledge JS, West JB. High altitude medicine and physiology. 3rd ed. London: Arnold. p. 44-49.

Prispelo 6. 10. 2002