



TAMARA STANCIU
ANCA CONSTANTIN

EMIL AVRAM
NICUȘOR CHIRIPUCI

CULEGERE DE EXERCITII ȘI PROBLEME PENTRU PREGĂTIREA SCAFANDRILOR - VOLUMUL 2 –



EDITURA  **CELEBRIS**

Constanța 2019



COORDONATORI

CONSUELA CONSTANTINESCU

CRISTIAN MUNTEANU

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

STANCIU, TAMARA

Culegere de exerciții și probleme pentru pregătirea scafandrilor /

Tamara Stanciu, Emil Avram, Constantin Anca, Nicușor Chiripuci. -

Constanța : Celebris, 2019-

2 vol.

ISBN 978-606-8849-57-7

Vol. 2. - 2019. - Conține bibliografie. - ISBN 978-606-8849-58-4

I. Stanciu Tamara, Avram Emil

II. Constantin Anca, Chiripuci, Nicușor

Tipărită în România

Constanța - 2019

Tipar executat de:

S.C. CELEBRIS 2008 SRL

e-mail: office@celebris.ro

comenzi@celebris.ro

Tel.: 0735 798 477

CUPRINS

Cuvânt introductiv	5
1. Capitolul 1 Utilizarea barocamerelor și a turelelor	7
1.1. Presurizarea camerelor hiperbare	7
1.2. Menținerea atmosferei de siguranță la scufundare	8
1.3. Volumul de gaz necesar pentru presurizare	8
1.4. Influența metabolismului asupra nivelului de oxigen și de bioxid de carbon din barocamere	8
1.5. Probleme rezolvate	10
1.6. Probleme propuse	18
2. Capitolul 2 Climatizarea incintelor hiperbare	21
2.1. Considerații teoretice	21
2.2. Probleme rezolvate	25
2.3. Probleme propuse	30
3. Capitolul 3 Utilizarea tabelor de scufundare la decompresie	33
3.1. Considerații teoretice	33
3.2. Probleme rezolvate	37
3.3. Probleme propuse	42
4. Capitolul 4 Transferul termic	45
4.1. Căldura	45
4.2. Modurile elementare de transfer de căldură	48
4.3. Procese complexe de transfer de căldură	49
4.4. Încălzirea și răcirea unui corp cu temperatură uniformă	50
4.5. Securitatea și confortul termic al scafandrilor	51
4.6. Probleme rezolvate	54
4.7. Probleme propuse	62
5. Capitolul 5 Instalații și echipamente hiperbare	65
5.1. Principalele instalații și echipamente hiperbare	65
5.2. Probleme rezolvate	68
5.3. Probleme propuse	72
6. Capitolul 6 Probleme recapitulative	75
6.1. Probleme rezolvate	75
6.2. Probleme propuse	72
ANEXE	91
Referințe bibliografice	102



CUVÂNT INTRODUCȚIV

Cursul de Formare, Pregătire și Antrenare Scafandri, structura din subordinea Centrului de Scafandri prin care Ministerul Apărării Naționale își exercită autoritatea națională în domeniul formării profesionale a scafandrilor și a autorizării activităților de scufundare, are o experiență de peste 50 de ani de activitate. În scopul dezvoltării și perfecționării continue a metodelor de pregătire ale cursanților, în anul 2004 a fost elaborat „Manualul de instrucție al scafandrilor” și reeditat în anul 2010.

Necesitatea standardizării pregătirii scafandrilor și nevoia de evitare a riscurilor pe timpul activităților de scufundare au condus la elaborarea manualului „Culegerea de exerciții și probleme pentru pregătirea scafandrilor” – (Volumul 1), în anul 2018. Pentru fixarea cunoștințelor teoretice de fizica scufundării și pentru identificarea în practică a soluțiilor necesare în pregătirea și abordarea scufundărilor complexe, de sistem, s-a continuat proiectul cu Volumul 2.

Scufundarea la mare adâncime necesită o pregătire suplimentară a scafandrilor calificați, atât teoretică cât și practică. Cunoștințele teoretice avansate sunt predate celor mai buni profesioniști dar și personalului tehnic (operatori de barocameră și tehnicieni de scufundare).

Planificarea scufundărilor profunde, unitare și de saturație, se face cu mare atenție. Calculul consumului de gaz respirator, al compoziției acestuia cu păstrarea limitelor admisibile și al volumului de gaz pentru presurizare este explicat teoretic și exemplificat prin problemele cuprinse în Capitolul 1. Climatizarea camerelor hiperbare necesită și ea aplicarea legilor fizicii și elemente de calcul, exemplificate în Capitolul 2. Capitolul 3 aduce în discuție noțiuni elementare de utilizare a tabelelor de scufundare deținute de Centrul de Scafandri, dar și posibilitatea



utilizării unor tabele US Navy noi, actualizate, prin accesarea link-urilor recomandate.

Capitolul 4 Transferul termic are o abordare academică, dar formula de calcul (4.28) a temperaturii corporale a unui scafandru în funcție de timp și de adâncimea de scufundare, a fost validată experimental, prin scufundări în complexul hiperbar, până la 60 msw presiune manometrică și s-a dovedit utilă la scufundarea simulată la 180 msw, pentru testarea sindromului nervos al înaltelor presiuni, scufundare efectuată la Laboratorul hiperbar în anul 2012.

Manevrarea în siguranță a instalațiilor și echipamentelor hiperbare trebuie să fie exersată în cunoștință de cauză de către tehnicienii instruiți. Verificarea noțiunilor minime din domeniu se face prin probleme de tipul celor cuprinse în Capitolul 5.

Problemele recapitulative din Capitolul 6 acoperă cuprinsul celor două volume.

În consecință, mulțumesc colectivului de elaborare și consider că această lucrare, ca expresie a experienței în domeniu a autorilor, vine în completarea literaturii de specialitate, pentru sprijinul activității cursanților, instructorilor, scafandrilor, civili sau militari.

COMANDANTUL CENTRULUI DE SCAFANDRI

Comandor ing.

Bogdan DUMITRESCU

CAPITOLUL 1

UTILIZAREA BAROCAMERELOR ȘI A TURELELOR

Tamara STANCIU, Nicușor CHIRIPUCI

În Capitolul 7 Compresia și decompresia incintelor presurizate, din volumul 1 al culegerii, volum editat în anul 2018, se face o scurtă prezentare teoretică referitoare la :

- Presurizare
- Consumul de gaz
- Decompresie.

Problemele propuse se referă la:

- Presiunea de gaz adăugată a amestecului bogat - $H_b(msw)$
- Presiunea parțială completată - cantitatea de oxigen care trebuie adăugată $\Delta p_{O_2}(mbar)$
- Volumul de gaz necesar pentru presurizare - $V_p(m^3)$
- Cantitatea de oxigen medie utilizată metabolic de scafandri $VO_2(m^3)/zi/scafandru$.

În acest prim capitol al volumului 2 propunem o abordare detaliată a manevrelor tehnice care se execută de către operatorii de barocameră și a problemelor care apar în timpul scufundărilor profesionale, simulate și reale, din cadrul unităților de scafandri ale Forțelor Navale.

1.1. Presurizarea camerelor hiperbare

Scufundarea unitară în mediu uscat este scufundarea care se execută în barocamere special amenajate, unde adâncimea scufundării este dată de nivelul presiunii din incintă, presiune realizată cu aer sau cu amestec respirator sintetic. [Statul Major al Marinei Militare, 1996]

Amestecurile respiratorii se folosesc numai în conformitate cu tabela de scufundare adecvată și instrucțiunile de utilizare respective.

În funcție de activitatea ce urmează să se desfășoare în hiperbarism, barocamera se presurizează cu aer sau amestec respirator corespunzător, până la adâncimea de lucru.

După terminarea activităților se începe decompresia, conform tabelei de scufundare corespunzătoare adâncimii atinse și amestecului respirator folosit.

Presurizarea unei barocamere este o procedură relativ simplă. Aerul (21% oxigen, 79%azot) este presurizat până la adâncimea dorită. Atmosfera este sigură și respirabilă până la presiunea manometrică de 50 msw (peste această presiune apare fenomenul de narcoză dat de azot). În timpul decompresiei nu sunt probleme legate de concentrații sau de presiuni parțiale.

Este interzisă presurizarea barocamerei cu oxigen pur. Concentrația oxigenului din ambianța barocamerei nu trebuie să depășească 25% din cauza pericolului de explozie. În practică, se admite o concentrație maximă de oxigen de 23%.



1.2. Menținerea atmosferei de siguranță la scufundare

1.2.1. Saturația

La scufundările în saturație cu heliox, amestecul heliox este pompat prin partea de sus a barocamerei, peste aerul existent deja în barocameră. Presiunea parțială finală a oxigenului din amestecul final, P_{pO_2f} va depinde de presiunea parțială a oxigenului din aer și de presiunea parțială a oxigenului din amestecul heliox.

Teoretic, presurizarea poate fi începută cu un amestec sărac în oxigen. Aerul care se află deja în cameră dă o presiune parțială a oxigenului, P_{pO_2} , în limitele de siguranță. În practică există riscul ca o scurgere – o ușă neetanșă, un robinet lăsat deschis – să permită o pierdere parțială din amestecul pompat și astfel P_{pO_2} să scadă la nivele periculos de joase. Asemenea incidente pot provoca stări de inconștiență în rândul scafandrilor aflați în incinta presurizată. Din această cauză presiunea parțială a oxigenului este permanent monitorizată și în practică procedura uzuală este de a începe presurizarea cu un amestec ușor îmbogățit, 15-20% oxigen, respirabil la adâncimi mici. Compresia continuă apoi cu un amestec sărac în oxigen, de obicei 2%. Pentru scufundările de mare adâncime se va utiliza un amestec mai sărac, cum ar fi un amestec de 1%. Heliul pur nu se utilizează, este foarte greu de obținut. [Degeratu M., 2008]

1.2.2. Presiunile parțiale recomandate ale oxigenului din amestecul respirator

Presiunea parțială a oxigenului variază în funcție de activitatea scafandrului. Se recomandă valorile p_{pO_2} pentru amestecul respirator utilizat din Tabelul 1.1.

Tabelul 1.1 Valorile p_{pO_2} recomandate [IMCA, 2004]

Tipul activității de scufundare	p_{pO_2} [bar]
Scufundare scurtă de inspecție și decompresie	1.2 - 1.6
Scufundare de lucru normal cu Nitrox	1.4
Scufundare de lucru normal cu Heliox și cu Trimix	1.3
Scufundare de lucru foarte greu	≤ 1.2
Saturație în apă	0.6 – 0.8
Saturație în barocameră	0.4 -0.6

1.3. Volumul de gaz necesar pentru presurizare

Pentru presurizarea unei barocamere cu volumul inundabil $V_b(m^3)$ la presiunea hidrostatică $p_h(msw)$, volumul de gaz $V_g(m^3)$ este:

$$V_g = \frac{V_b \cdot p_h}{10} \quad (1.1)$$

Foarte important se utilizează la calcul presiunea relativă citită la manometru, nu presiunea absolută!

1.4. Influența metabolismului asupra nivelului de oxigen și de bioxid de carbon din barocamere

În afara pierderilor datorate neetanșeităților accidentale, se pierde oxigen și se produce bioxid de carbon, în timpul scufundărilor simulate, prin procesul metabolic al scafandrilor aflați

în barocameră. Volumele de gaze ventilate astfel sunt importante, cunoașterea lor contribuind la îmbunătățirea climatizării incintelor presurizate.

Pierderea nivelului de oxigen în barocameră

În volumul 1 al culegerii este indicată procedura de calcul al consumului mediu de oxigen în timpul saturației, respectiv $0,7m^3 O_2/zi/scafandru$.

Această valoare corespunde consumului metabolic mediu de oxigen recomandat, respectiv ***0.5l/min/scafandru***, în condiții de staționare. ***Rata consumului metabolic de oxigen nu depinde de adâncimea de scufundare (presiunea hidrostatică).*** [IMCA, 2004]

Simultan organismul scafandruului în staționare produce bioxid de carbon.

La presiunea atmosferică, participația volumică maximă de oxigen din aer este $r_{oxmax}=0.21$. Nivelul participației volumice minime de oxigen din aerul respirabil în scufundare este $r_{oxmin}=0.19$ la presiunea atmosferică.

Pierderea de oxigen admisă $V_{ox}(l)$ pentru o barocameră cu volumul $V_b(l)$ este:

$$V_{ox} = (r_{oxmax} - r_{oxmin}) \cdot V_b = (0.21 - 0.19) \cdot V_b = 0.02 \cdot V_b \quad (1.2)$$

Pentru a menține cantitatea de oxigen minim necesară, se completează pierderile și se calculează timpul după care este necesară suplimentarea oxigenului.

Pentru n scafandri rata consumului de oxigen $R_{ox}(l/min)$ este:

$$R_{ox} = n \cdot 0.5 \quad (1.3)$$

Perioada de timp maximă admisă $\tau_{ox}(min)$ după care se va completa oxigenul în barocameră este:

$$\tau_{ox} = \frac{V_{ox}}{R_{ox}} \quad (1.4)$$

Creșterea nivelului de bioxid de carbon în barocameră [IMCA, 2004]

Producția metabolică de bioxid de carbon este de ***0.5l/min/scafandru***. Nivelul maxim admis de bioxid de carbon pp_{CO2max} este de 10 mbar. Nivelul minim admis de bioxid de carbon pp_{CO2min} este de 1 mbar. Producția de bioxid de carbon maxim admisă $V_{CO2}(l)$ într-o barocameră cu volumul $V_b(m^3)$ este:

$$V_{CO2max} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2min}) \cdot V_b = (10 - 1) \cdot V_b = 9 \cdot V_b \quad (1.5)$$

Nivelul normal admis de bioxid de carbon p_{CO2n} este de 5 mbar. Producția de bioxid de carbon normal admisă $V_{CO2n}(l)$ într-o barocameră cu volumul $V_b(m^3)$ este:

$$V_{CO2n} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2n}) \cdot V_b = (10 - 5) \cdot V_b = 5 \cdot V_b \quad (1.6)$$

Pentru n scafandri rata producției de bioxid de carbon $R_{CO2}(l/min)$ este:

$$R_{CO2} = n \cdot 0.5 \quad (1.7)$$

Perioada de timp maximă admisă $\tau_{CO2max}(min)$ după care se va elimina bioxidul de carbon din barocameră este:

$$\tau_{CO2max} = \frac{V_{CO2max}}{R_{CO2}} \quad (1.8)$$

Perioada de timp normal admisă $\tau_{CO2n}(min)$ după care se va elimina bioxidul de carbon din barocameră este:

$$\tau_{CO2n} = \frac{V_{CO2n}}{R_{CO2}} \quad (1.9)$$



Pentru intervalul de timp $\tau_{CO2n} \div \tau_{CO2max}$ scufundarea poate decurge fără ventilație.

Oxygenul metabolic consumat în timpul decompresiei trebuie completat odată cu cantitatea de oxigen completată pentru menținerea valorii pp_{O_2} la nivelul necesar pentru decompresie!

Pentru ventilarea barocamerelor se calculează debitul optim de aer cu formula [Petrut A., 1992] :

$$Q_a = \frac{\sum Q_{CO2i}}{r_{CO2max} - r_{CO2a}} \quad (1.10)$$

$Q_a (l/min)$ - debitul de aer ventilat în barocameră;

$Q_{CO2} (l/min)$ - suma debitelor de CO_2 produse de n scafandri din barocameră;

r_{CO2max} - participația volumică maxim admisă de CO_2 din barocameră;

$r_{CO2a} = 0.0003$ - participația volumică de CO_2 din aerul proaspăt.

Dacă se consideră rata producției de CO_2 pentru 1 scafandru $0.5l/min$, pentru n scafandri avem:

$$Q_{CO2} = \sum Q_{CO2i} = n \cdot 0.5 \quad (1.11)$$

r_{CO2max} se calculează în funcție de presiunea absolută p_{ab} din barocameră:

$$pp_{CO2max} = 20mbar = 0.02bar = r_{CO2max} \cdot p_{ab} \rightarrow r_{CO2max} = \frac{0.02}{p_{ab}}.$$

De exemplu, pentru 3 scafandri care trebuie să facă o scufundare unitară cu aer la 50msw, se va calcula debitul de aer proaspăt ventilat.

$$p_H = 50msw \rightarrow p_{ab} = \frac{50}{10} + 1 = 6bar$$

$$r_{CO2max} = \frac{0.02}{p_{ab}} = \frac{0.02}{6} = 0.00333$$

$$Q_a = \frac{\sum Q_{CO2i}}{r_{CO2max} - r_{CO2a}} = \frac{3 \cdot 0.5}{0.00333 - 0.0003} = \frac{1.5}{0.00303} \cong 495(l/min)$$

Pentru siguranță se va ventila barocamera cu un debit de $500 l/min$ de aer proaspăt.

1.5. Probleme rezolvate

1. Enunț/Întrebare

Cât gaz este necesar pentru presurizarea unei barocamere de $20m^3$ până la 100msw?

Rezolvare

$$V_g = \frac{V_b \cdot p_h}{10} = \frac{20 \cdot 100}{10} = 200m^3$$

2. Enunț

La presurizarea unei turele de $15m^3$ se utilizează $99m^3$ de gaz.

Întrebare

Ce adâncime este în turelă după epuizarea întregii cantități de gaz?

Rezolvare

$$V_g = \frac{V_b \cdot p_h}{10} \rightarrow p_h = \frac{V_g \cdot 10}{V_b} = \frac{99 \cdot 10}{15} = 66msw \rightarrow h = 66m$$

3. Enunț

Într-o barocameră cu volumul $V_b=3500(l)$ sunt presurizați cu aer 5 scafandri.

Întrebări

- În cât timp concentrația de oxigen din barocameră va scădea de la 21% la 19%?
- Care este intervalul de timp maxim pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță, pentru cei 5 scafandri?

Rezolvare

a. Pierderea de oxigen admisă $V_{ox}(l)$ este:

$$V_{ox} = (r_{oxmax} - r_{oxmin}) \cdot V_b = (0.21 - 0.19) \cdot 3500 = 0.02 \cdot 3500 = 70(l)$$

Rata consumului de oxigen pentru cei 5 scafandri este:

$$R_{ox} = n \cdot 0.5 = 5 \cdot 0.5 = 2.5(l/min)$$

Timpul după care concentrația de oxigen din barocameră va scădea de la 21% la 19% este:

$$\tau_{ox} = \frac{V_{ox}}{R_{ox}} = \frac{70}{2.5} = 28(min)$$

b. Rata producției de bioxid de carbon pentru cei 5 scafandri este:

$$R_{CO_2} = n \cdot 0.5 = 5 \cdot 0.5 = 2.5(l/min)$$

$$\text{Volumul barocamerei } V_b = 3500 (l) = 3.5(m^3)$$

Producția de bioxid de carbon maxim admisă $V_{CO_2max}(l)$ este:

$$V_{CO_2max} = (pp_{CO_2max} - pp_{CO_2min}) \cdot V_b = (10 - 1) \cdot 3.5 = 9 \cdot 3.5 = 31.5(l)$$

Producția de bioxid de carbon normal admisă $V_{CO_2n}(l)$ este:

$$V_{CO_2n} = (pp_{CO_2max} - pp_{CO_2n}) \cdot V_b = (10 - 5) \cdot 3.5 = 5 \cdot 3.5 = 17.5(l)$$

Durata maximă, pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță pentru cei 5 scafandri, este:

$$\tau_{CO_2max} = \frac{V_{CO_2max}}{R_{CO_2}} = \frac{31.5}{2.5} = 12.6min = 12min \frac{6 \cdot 60}{10} s = 12min36s$$

Perioada de timp normal admisă $\tau_{CO_2n}(min)$ după care se poate elimina bioxidul de carbon din barocameră este:

$$\tau_{CO_2n} = \frac{V_{CO_2n}}{R_{CO_2}} = \frac{17.5}{2.5} = 7min$$

Pentru intervalul de timp $0 \div 12min36s$ scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță în raport cu oxigenul și cu bioxidul de carbon.

4. Enunț

Într-o turelă cilindrică, cu diametrul de 2 m și lungimea de 3 m, presurizată cu aer, sunt 4 scafandri.

Întrebări

- În cât timp concentrația de oxigen din turelă va scădea la limita suportabilă?
- Care este intervalul de timp maxim pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță, pentru cei 4 scafandri?
- La cât timp după începerea presurizării se recomandă ventilația turelei?

**Rezolvare**

Volumul turelei este:

$$V_t = \pi \cdot (D^2/4) \cdot L = 3.14 \cdot (2^2/4) \cdot 3 = 9.42m^3 = 9420l$$

- a. Limita minimă de oxigen suportabilă este 19% din aerul respirabil, respectiv participația volumică $r_{oxmin} = 0.19$. Participația volumică normală a oxigenului din aerul respirabil este $r_{oxmax} = 0.21$. Pierderea de oxigen admisă $V_{ox}(l)$ este:

$$V_{ox} = (r_{oxmax} - r_{oxmin}) \cdot V_t = (0.21 - 0.19) \cdot 9420 = 0.02 \cdot 9420 \cong 188l$$

Rata consumului de oxigen pentru cei 4 scafandri este:

$$R_{OXS} = n \cdot 0.5 = 4 \cdot 0.5 = 2l/min$$

Timpul după care concentrația de oxigen din turelă va scădea de la 21% la 19% este:

$$\tau_{ox} = \frac{V_{ox}}{R_{ox}} = \frac{188}{2} = 94(min) = \frac{94}{60}h = 1\frac{34}{60}h = 1h34min$$

- b. Rata producției de bioxid de carbon pentru cei 4 scafandri este:

$$R_{CO2} = n \cdot 0.5 = 4 \cdot 0.5 = 2l/min$$

$$Volumul turelei V_t = 9.42m^3$$

Producția de bioxid de carbon maxim admisă $V_{CO2max}(l)$ este:

$$V_{CO2max} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2min}) \cdot V_t = (10 - 1) \cdot 9.42 = 9 \cdot 9.42 \cong 85l$$

Producția de bioxid de carbon normal admisă $V_{CO2n}(l)$ este:

$$V_{CO2n} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2n}) \cdot V_t = (10 - 5) \cdot 9.42 = 5 \cdot 9.42 \cong 47l$$

Durata maximă, pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță pentru cei 4 scafandri, este:

$$\tau_{CO2max} = \frac{V_{CO2max}}{R_{CO2}} = \frac{85}{2} = 42.5min = 42min30s$$

Perioada de timp normal admisă $\tau_{CO2n}(min)$ după care se poate elimina bioxidul de carbon din barocameră este:

$$\tau_{CO2n} = \frac{V_{CO2n}}{R_{CO2}} = \frac{47}{2} = 23.5min = 23min30s$$

Intervalul de timp maxim după începerea presurizării pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță în raport cu bioxidul de carbon. este de 42min30s.

- c. Se recomandă ventilația turelei la 24min după începerea presurizării.

5. Enunț

Într-o turelă sferică de rază $R = 1.5m$ sunt presurizați cu aer, la 30msw, 5 scafandri.

Întrebare

- La ce interval de timp după începerea presurizării, se recomandă începerea ventilației?
- Care este debitul de ventilație al aerului proaspăt?

Rezolvare

- a. Volumul turelei este:

$$V_t = \pi \cdot R^3 \cdot (4/3) = 3.14 \cdot 1.5^3 \cdot (4/3) = 14.13m^3 = 14130l$$

Limita minimă de oxigen suportabilă este 19% din aerul respirabil, respectiv participația volumică $r_{oxmin} = 0.19$. Participația volumică normală a oxigenului din aerul respirabil este $r_{oxmax} = 0.21$. Pierderea de oxigen admisă $V_{ox}(l)$ este:

$$V_{ox} = (r_{oxmax} - r_{oxmin}) \cdot V_t = (0.21 - 0.19) \cdot 14130 = 0.02 \cdot 14130 \cong 282l$$

Rata consumului de oxigen pentru cei 5 scafandri este:

$$R_{oxs} = n \cdot 0.5 = 5 \cdot 0.5 = 2.5l/min$$

Timpul după care concentrația de oxigen din turelă va scădea de la 21% la 19% este:

$$\tau_{ox} = \frac{V_{ox}}{R_{ox}} = \frac{282}{2.5} = 112.8(min) = \frac{112.8}{60}h \cong 1h52min$$

Rata producției de bioxid de carbon pentru cei 5 scafandri este:

$$R_{CO2} = n \cdot 0.5 = 5 \cdot 0.5 = 2.5l/min$$

$$\text{Volumul turelei } V_t = 14.3m^3$$

Producția de bioxid de carbon maxim admisă $V_{CO2max}(l)$ este:

$$V_{CO2max} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2min}) \cdot V_t = (10 - 1) \cdot 14.3 = 9 \cdot 14.3 \cong 128l$$

Producția de bioxid de carbon normal admisă $V_{CO2n}(l)$ este:

$$V_{CO2n} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2n}) \cdot V_t = (10 - 5) \cdot 14.3 = 5 \cdot 14.3 \cong 71l$$

Durata maximă, pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță pentru cei 5 scafandri, este:

$$\tau_{CO2max} = \frac{V_{CO2max}}{R_{CO2}} = \frac{128}{2.5} = 51min12s$$

Perioada de timp normal admisă $\tau_{CO2n}(min)$ după care se poate elimina bioxidul de carbon din barocameră este:

$$\tau_{CO2n} = \frac{V_{CO2n}}{R_{CO2}} = \frac{71}{2.5} = 28min24s$$

Pentru intervalul de timp $0 \div 51min$ scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță în raport cu oxigenul și cu bioxidul de carbon.

$$b. \quad p_H = 30msw \rightarrow p_{ab} = \frac{30}{10} + 1 = 4bar$$

Participația volumică maxim admisă de bioxid de carbon în barocameră este:

$$r_{CO2max} = \frac{0.02}{p_{ab}} = \frac{0.02}{4} = 0.005$$

Debitul necesar de aer proaspăt ventilat este (10)

$$Q_a = \frac{\sum Q_{CO2i}}{r_{CO2max} - r_{CO2a}} = \frac{5 \cdot 0.5}{0.005 - 0.0003} = \frac{2.5}{0.0047} \cong 532l/min.$$

6. Enunț

O barocameră de $7.5 m^3$ este presurizată cu aer. În barocameră sunt 6 scafandri. La 30min de la începerea presurizării se începe ventilația atmosferei din incintă.

Întrebări

- Este sigură atmosfera din punct de vedere al siguranței scafandrilor față de oxigen în cele 30 de minute?
- Dar față de bioxidul de carbon?
- Dacă scafandrii sunt la saturație 5 zile, cât oxigen vor consuma ei?

**Rezolvare**

Volumul barocamerei este:

$$V_b = 7.5m^3 = 7500l$$

a. Limita minimă de oxigen suportabilă este 19% din aerul respirabil, respectiv participația volumică $r_{oxmin} = 0.19$. Participația volumică normală a oxigenului din aerul respirabil este $r_{oxmax} = 0.21$. Pierderea de oxigen admisă $V_{ox}(l)$ este:

$$V_{ox} = (r_{oxmax} - r_{oxmin}) \cdot V_b = (0.21 - 0.19) \cdot 7500 = 0.02 \cdot 7500 = 150l$$

Rata consumului de oxigen pentru cei 6 scafandri este:

$$R_{ox} = n \cdot 0.5 = 6 \cdot 0.5 = 3l/min$$

Timpu după care concentrația de oxigen din barocameră va scădea de la 21% la 19% este:

$$\tau_{ox} = \frac{V_{ox}}{R_{ox}} = \frac{150}{3} = 50min$$

$30min < 50min \rightarrow$ atmosfera este sigură în raport cu oxigenul, concentrația nu scade sub 19%.

b. Rata producției de bioxid de carbon pentru cei 6 scafandri este:

$$R_{CO2} = n \cdot 0.5 = 6 \cdot 0.5 = 3l/min$$

Producția de bioxid de carbon maxim admisă $V_{CO2max}(l)$ este:

$$V_{CO2max} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2min}) \cdot V_b = (10 - 1) \cdot 7.5 = 9 \cdot 7.5 \cong 67.5l$$

Producția de bioxid de carbon normal admisă $V_{CO2n}(l)$ este:

$$V_{CO2n} = (pp_{CO2max} - pp_{CO2n}) \cdot V_b = (10 - 5) \cdot 7.5 = 5 \cdot 7.5 \cong 37.5l$$

Durata maximă, pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță pentru cei 6 scafandri, este:

$$\tau_{CO2max} = \frac{V_{CO2max}}{R_{CO2}} = \frac{67.5}{3} = 22min30s$$

Perioada de timp normal admisă $\tau_{CO2n}(min)$ după care se poate elimina bioxidul de carbon din barocameră este:

$$\tau_{CO2n} = \frac{V_{CO2n}}{R_{CO2}} = \frac{37.5}{3} = 12min30s$$

Scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță în raport cu bioxidul de carbon, doar pentru intervalul de timp de 22min30s după începerea presurizării. La 30 min de la presurizare, producția de bioxid de carbon este prea mare.

c. Consumul de oxigen care trebuie asigurat pentru cei 6 scafandri, în cele 5 zile de saturație este:

$$C_{ox} = 0.7 \cdot 6 \cdot 5 = 21m^3$$

7. Enunț

Pentru presurizarea unei barocamere la 50 msw, peste aerul atmosferic existent, cu un amestec cu presiunea parțială a oxigenului finală $pp_{O2f} = 500mb$, se utilizează 2 amestecuri de 2% (c_s) și de 10% (c_b).

Întrebare

Câți msw de amestec 10% trebuie adăugați (citiți la manometru)?

Rezolvare

Presiunea de fund este $pH_f = 50msw$.

c_s - concentrația amestecului sărac

c_b - concentrația amestecului bogat

Presiunea amestecului bogat care trebuie adăugat pH_b (msw) (10%) este:

$$pH_b = \frac{pp_{O_2c} - pH_f \cdot c_s\%}{(c_b\% - c_s\%)} = \frac{(500 - 210) - 50 \cdot 2}{(10 - 2)} = \frac{290 - 100}{8} \cong 24 \text{msw}$$

$pH_b = 24 \text{msw}$ este presiunea adăugată din amestecul bogat, până când se citesc 24msw la manometru (presiunea relativă).

8. Enunț

O barocameră trebuie să fie presurizată până la presiunea parțială a oxigenului de $pp_{O_2} = 500 \text{mbar}$, prin utilizarea unui amestec 6% peste aerul existent în barocameră la presiunea normală.

Întrebare

Ce adâncime de presurizare (presiune relativă) trebuie să indice manometrul?

Rezolvare

Amestecul bogat este $c_b = 6\%$. Deoarece nu avem alt amestec, concentrația amestecului sărac $c_s = 0\%$. Oxigenul adăugat are presiunea parțială:

$$pp_{O_2c} = pp_{O_2f} - 210 = 500 - 210 = 290 \text{mbar}$$

Presiunea amestecului de presurizare va fi:

$$pH_b = \frac{pp_{O_2c} - pH_f \cdot c_s}{c_b - c_s} = \frac{290 - 0}{6 - 0} = 48.3 \text{msw}$$

Presiunea relativă a amestecului la manometru este

$$pH_m \cong 48 \text{msw}.$$

9. Enunț/Întrebare

Câți msw de amestec respirator 2% oxigen trebuie adăugați într-o barocameră presurizată pentru a crește presiunea parțială a oxigenului cu 50mbar?

Rezolvare

Amestecul bogat este $c_b = 2\%$. Deoarece nu avem alt amestec, concentrația amestecului sărac $c_s = 0\%$. Oxigenul adăugat are presiunea parțială

$$pp_{O_2c} = 50 \text{mbar}$$

Adâncimea amestecului de presurizare (presiunea manometrică) va fi

$$pH_b = \frac{pp_{O_2c} - H_f \cdot c_s}{c_b - c_s} = \frac{50 - 0}{2 - 0} = 25 \text{msw}.$$

10. Enunț/Întrebare

Ce amestec respirator trebuie utilizat pentru presurizarea unei barocamere de la suprafață până la 100msw, astfel încât presiunea parțială a oxigenului să se încadreze în limitele de siguranță recomandate pentru saturație?

Rezolvare

Avem un singur amestec, caz în care concentrația amestecului sărac $c_s = 0$.

Limita inferioară a presiunii parțiale a oxigenului recomandată este 400mbar. În barocameră era oxigen cu presiunea parțială 210mbar. Oxigenul minim adăugat are presiunea parțială:

$$pp_{O_2cmin} = 400 - 210 = 190 \text{mbar}$$



Limita superioară a presiunii parțiale a oxigenului recomandată este 600mbar. Oxigenul maxim adăugat are presiunea parțială:

$$pp_{O_2cmax} = 600 - 210 = 390\text{mbar}$$

Presiunea amestecului de presurizare este

$$pH_b = \frac{pp_{O_2c} - pH_f \cdot c_s}{c_b - c_s} = \frac{pp_{O_2c}}{c_b} \rightarrow \text{concentrația } c_b = \frac{pp_{O_2c}}{H_b}$$

Dar barocamera se presurizează la 100msw, deci $pH_b = 100\text{msw}$.

Pentru limita inferioară

$$c_{bmin} = \frac{pp_{O_2cmin}}{pH_b} = \frac{190}{100} = 1.9\% \cong 2\%$$

Pentru limita superioară

$$c_{bmax} = \frac{pp_{O_2cmax}}{pH_b} = \frac{390}{100} = 3.9\% \cong 4\%$$

Amestecul utilizat trebuie să se încadreze în marja $(2 \div 4)\%$ oxigen.

11. Enunț/Întrebare

Dacă la 100msw în incinta presurizată presiunea parțială a oxigenului este 500mbar, care va fi presiunea parțială a oxigenului la 40 msw, în cazul în care nu se mai completează atmosfera cu oxigen?

Rezolvare

La 100msw presiunea absolută este:

$$p_{ab} = \frac{pH_f}{10} + 1 = \frac{100}{10} + 1 = 11\text{bar}$$

Dar presiunea parțială a oxigenului la 100msw este

$$pp_{O_2} = 500\text{mbar} = 0.5\text{bar}$$

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} \rightarrow r_{O_2} = \frac{pp_{O_2}}{p_{ab}} = \frac{0.5}{11} = 0.0454$$

unde r_{O_2} este participația volumică a oxigenului din amestecul respirator, valoare care rămâne neschimbată dacă nu se schimbă compoziția amestecului respirator (concentrația oxigenului).

La 40msw presiunea absolută este:

$$p_{ab} = \frac{pH_f}{10} + 1 = \frac{40}{10} + 1 = 5\text{bar}$$

Presiunea parțială a oxigenului la 40msw este

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} = 0.0454 \cdot 5 \cong 0.227\text{bar} = 227\text{mbar}$$

12. Enunț

Presiunea parțială a oxigenului, dintr-o turelă presurizată la 120msw, este 650 mbar.

Întrebări

- Care este presiunea parțială a oxigenului din incintă la 60msw?
- Ce trebuie făcut ca să se asigure scafandrilor confortul minim în raport cu oxigenul?

Rezolvare

a. Presiunea parțială a oxigenului la 120msw este

$$pp_{O_2} = 650\text{mbar} = 0.65\text{bar}$$

Presiunea absolută la 120msw este

$$p_{ab} = \frac{p_{H_f}}{10} + 1 = \frac{120}{10} + 1 = 13\text{bar}$$

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} \rightarrow r_{O_2} = \frac{pp_{O_2}}{p_{ab}} = \frac{0.65}{13} = 0.05 \rightarrow c_{O_2} = 5\%$$

r_{O_2} - participația volumică a oxigenului din amestec este constantă dacă nu se adaugă oxigen;

c_{O_2} - concentrația oxigenului

La 60msw presiunea absolută este

$$p_{ab} = \frac{p_{H_f}}{10} + 1 = \frac{60}{10} + 1 = 7\text{bar}$$

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} = 0.05 \cdot 7 = 0.35\text{bar} = 350\text{mbar}$$

b. Presiunea parțială a oxigenului minimă pentru confortul scafandrilor este 400mbar.

În acest caz trebuie completată o diferență de

$$pp_{O_2c} = 400 - 350 = 50\text{mbar}$$

Se poate completa diferența de presiune parțială prin două metode:

1. Presurizarea cu același amestec cu presiunea la presiunea de completare p_{H_c}

$$H_c = \frac{pp_{O_2c}}{c_{O_2}} = \frac{50}{5} = 10\text{msw} \rightarrow \text{presiunea la adâncimea de fund } p_{H_f} = 60 + 10 = 70\text{msw}$$

2. Adăugarea manuală de oxigen: 10 (cmsw) $\rightarrow \Delta pp_{O_2} = 10(\text{mbar})$

Pentru $pp_{O_2c} = 50\text{mbar}$ de oxigen se adaugă

$$p_{H_{O_2c}} = \frac{50}{10} = 5\text{cmsw}.$$

Se adaugă manual 5cmsw de oxigen.

13. Enunț / Întrebare

În cazul unei scufundări de inspecție la o platformă maritimă, la ce adâncime trebuie să se înceapă decompresia dacă amestecul respirator utilizat este 30%?

Rezolvare

Din Tabelul 1.1, presiunea parțială a oxigenului din amestec în acest caz trebuie să fie $pp_{O_2} = 1.6\text{bar}$. Concentrația amestecului este 30% $\rightarrow r_{O_2} = 0.3$.

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} \rightarrow p_{ab} = \frac{pp_{O_2}}{r_{O_2}} = \frac{1.6}{0.3} = 5.33\text{bar}$$

$$\text{Dacă } p_{ab} = 5.33\text{bar} \rightarrow p_h = 5.33 - 1 = 4.33\text{bar} = 43.3\text{msw} \rightarrow h \cong 43\text{m}.$$

Se recomandă începerea decompresiei la 43m, cu amestec respirator 30%..

14. Enunț / Întrebare

Pentru o lucrare subacvatică la 50msw, cu efort minim (normal) din partea scafandrului, ce amestec Nitrox va fi utilizat?

Rezolvare

Din Tabelul 1.1, presiunea parțială a oxigenului din amestec în acest caz trebuie să fie $pp_{O_2} = 1.4\text{bar}$. presiunea la adâncimea de lucru:

$$p_h = 50\text{msw} \rightarrow p_{ab} = \frac{50}{10} + 1 = 6\text{bar}$$

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} \rightarrow r_{O_2} = \frac{pp_{O_2}}{p_{ab}} = \frac{1.4}{6} \cong 0.23 \rightarrow c\%_{O_2} = 23\%$$

Amestecul utilizat va fi Nitrox 23% (23% O_2 77% N_2).

**15. Enunț**

Un scafandru verifică o conductă, utilizând un amestec respirator Trimix 20%.

Întrebare

Până la ce adâncime poate el să facă inspecția subacvatică, în condiții de siguranță în raport cu oxigenul?

Rezolvare

Din Tabelul 1.1, presiunea parțială a oxigenului din amestec în acest caz trebuie să fie $pp_{O_2} = 1.3\text{bar}$. Concentrația amestecului este $20\% \rightarrow r_{O_2} = 0.2$.

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} \rightarrow p_{ab} = \frac{pp_{O_2}}{r_{O_2}} = \frac{1.3}{0.2} = 6.5\text{bar}$$

$$\text{Dacă } p_{ab} = 6.5\text{bar} \rightarrow p_h = 6.5 - 1 = 5.5\text{bar} = 55\text{msw}.$$

16. Enunț

O echipă de lucrători subacvatici execută un montaj de platformă maritimă, în condiții de muncă grea, la 90msw.

Întrebare

Ce amestec respirator este recomandat să utilizeze?

Rezolvare

Din Tabelul 1.1, presiunea parțială a oxigenului din amestec în acest caz trebuie să fie $pp_{O_2} = 1.2\text{bar}$. Presiunea absolută la 90msw este:

$$p_h = 90\text{msw} \rightarrow p_{ab} = \frac{90}{10} + 1 = 10\text{bar}$$

$$pp_{O_2} = r_{O_2} \cdot p_{ab} \rightarrow r_{O_2} = \frac{pp_{O_2}}{p_{ab}} = \frac{1.2}{10} = 0.12 \rightarrow c\%_{O_2} = 12\%$$

Se recomandă utilizarea unui amestec respirator sintetic de maxim 12% oxigen.

1.6. Probleme propuse**1. Enunț**

Într-o barocameră cu volumul $V_b = 4(m^3)$ sunt presurizați cu aer 6 scafandri.

Întrebări

- În cât timp concentrația de oxigen din barocameră va scădea de la 21% la 19%?
- Care este intervalul maxim de timp pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță, pentru cei 6 scafandri?

(R: a. 26min40s și b. 12min)

2. Enunț

Într-o turelă cilindrică, cu diametrul de 1.8m și lungimea de 2.6m, presurizată cu aer, sunt 3 scafandri.

Întrebări

- În cât timp concentrația de oxigen din barocameră va scădea la limita suportabilă?
(R: 1h28min)
- Care este intervalul de timp maxim pentru care scufundarea poate decurge fără ventilație, în condiții de siguranță, pentru cei 3 scafandri? (R: 39min40s)

c. La cât timp după începerea presurizării se recomandă ventilația turelei? (R: 22min)

3. Enunț

Într-o turelă sferică de rază $R = 1m$ sunt presurizați cu aer 4 scafandri, până la 50msw.

Întrebări

- La ce interval de timp după începerea presurizării, se recomandă începerea ventilației? (R: 18min)
- Care este debitul optim de aer proaspăt ventilat? (R: 660l/min)

4. Enunț

O barocameră de $5m^3$ este presurizată cu aer. În barocameră sunt 5 scafandri. La 50min de la începerea presurizării se începe ventilația atmosferei din incintă.

Întrebări

- Este sigură atmosfera din punct de vedere al siguranței scafandrilor față de oxigen în cele 50 de minute? (R: atmosfera nu este sigură în raport cu oxigenul)
- Dar față de bioxidul de carbon? (R: Nu, 18min)
- Dacă scafandrii sunt la saturație 4 zile, cât oxigen vor consuma ei? (R: $14m^3$)

5. Enunț

Pentru presurizarea unei barocamere la 80msw, peste aerul atmosferic existent, cu un amestec cu presiunea parțială a oxigenului finală $pp_{O_2f} = 600mbar$, se utilizează 2 amestecuri de 4% (c_s) și de 8% (c_b).

Întrebare

Câți msw de amestec 8% trebuie adăugați (citiți la manometru)? (R: 17.5msw)

6. Enunț

O barocameră trebuie să fie presurizată până la presiunea parțială a oxigenului de $pp_{O_2} = 600mbar$, prin utilizarea unui amestec 5% peste aerul existent în barocameră la presiunea normală.

Întrebare

Ce presiune trebuie să indice manometrul? (R: 78msw)

7. Enunț/Întrebare

Câți msw de amestec respirator 4% trebuie adăugați într-o barocameră presurizată pentru a crește presiunea parțială a oxigenului cu 100mbar? (R: 25msw).

8. Enunț/Întrebare

Ce amestec respirator trebuie utilizat pentru presurizarea unui simulator de la suprafață până la 80msw, pentru o scufundare de antrenament în saturație, astfel încât presiunea parțială a oxigenului să se încadreze în limitele de siguranță recomandate? (R: 5 ÷ 7%)

9. Enunț/Întrebare

Dacă la 80msw în incinta presurizată presiunea parțială a oxigenului este 600mbar, atmosfera va fi sigură din punct de vedere al presiunii parțiale a oxigenului la 50 msw, în cazul în care nu se mai completează oxigen în barocameră? (R: Da).

**10. Enunț**

Presiunea parțială a oxigenului, dintr-o turelă presurizată la 90msw, este 600 mbar.

Întrebări

- Care este presiunea parțială a oxigenului din incintă la 40msw? (R: 300mbar)
- Ce trebuie făcut ca să se asigure scafandrilor confortul minim în raport cu oxigenul?

R:

- 1 – Se coboară la 57msw cu același amestec
- 2 – Se adaugă manual 10cm_{sw} de oxigen.

11. Enunț / Întrebare

Când trebuie să se înceapă decompresia, dacă se lucrează la inspecția unei lucrări subacvatice și dacă amestecul respirator utilizat este Nitrox 20%? (R: 70msw)

12. Enunț

Pentru o lucrare subacvatică, cu efort minim (normal) din partea scafandrului, se utilizează un amestec Nitrox 60%.

Întrebări

- Până la ce adâncime (presiunea manometrică) se poate lucra, în condițiile recomandate în raport cu oxigenul? (R: 13msw)
- Dar dacă amestecul utilizat la aceeași concentrație este heliox? (R: 11msw)

13. Enunț

Un scafandru are de făcut o lucrare la 80msw, utilizând un amestec respirator heliox.

Întrebare

Care este concentrația de oxigen a amestecului respirator la această adâncime, astfel încât scufundarea să se facă în condiții de siguranță în raport cu oxigenul? (R: 14%)

14. Enunț

Un scafandru execută o scufundare de observare, utilizând un amestec Trimix 30%.

Întrebări

- Până la ce adâncime poate el să facă inspecția subacvatică în condiții de siguranță în raport cu oxigenul? (R: 33m)
- De la ce adâncime se poate începe decompresia? (R: 43m)

15. Enunț / Întrebare

La executarea unei scufundări până la 80msw, în condiții foarte grele de muncă, este recomandată utilizarea unui amestec respirator sintetic 10% ? (R: Da).

16. Enunț/ Întrebare

Care este volumul unei barocamere, dacă pentru presurizarea ei la 75msw se utilizează 120m³ de gaz? (R: V_b=16m³)

CAPITOLUL 2 CLIMATIZAREA INCINTELOR HIPERBARE

Tamara STANCIU

2.1. Considerații teoretice

Climatizarea unei incinte hiperbare este foarte importantă, de ea depinde sănătatea și chiar viața scafandrilor. Climatizarea constă în controlul și menținerea următorilor factori din incintă:

- Temperatură
- Umiditate
- Compoziția gazului respirator

2.1.1 Temperatura

Managementul termic pentru susținerea vieții în timpul scufundărilor profunde are două aspecte importante:

- Controlul temperaturii camerelor hiperbare;
- Controlul pierderilor de temperatură interne (temperatura corpului) ale scafandrilor.

Temperatura de incintă este controlată de senzori de temperatură profesionali, atât pentru atmosfera din camera hiperbară uscată, cât și de senzori imerși, pentru simulatorul umed. Senzorii sunt cuplați la un termometru digital din rack-ul de control de la suprafață. Camerele hiperbare sunt încălzite. La scufundările în saturație cu heliox, temperatura de incintă trebuie menținută în marja 30°C-34°C.

În timpul scufundărilor simulate, la presurizare, temperatura din incintă crește cu o viteză direct proporțională cu viteza de compresie. După atingerea adâncimii dorite, temperatura din incintă scade față de cea atinsă la presurizare. La decompresie temperatura scade.

Variațiile mari de temperatură care se produc în timpul presurizării și decompresiei afectează presiunea din barocameră, conform **Legii lui Charles:**

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} = ct \quad (2.1)$$

$p_1, p_2(\text{bar})$ - **presiunea absolută inițială** și **presiunea absolută după schimbarea temperaturii**

$T_1, T_2(K)$ – **temperatura absolută inițială** și **temperatura absolută finală**

În cazul scufundărilor profunde, pierderile de căldură prin gazul respirator sunt abrupte, și măsurile de protecție sunt vitale. Alt aspect care trebuie să fie subliniat este răcirea mai rapidă a corpului scafandrului la utilizarea amestecului sintetic heliox, din cauza căldurii specifice la presiune constantă a amestecului sintetic de aproape 5 ori mai mare decât a aerului. [Goldman, 1971] Din această cauză la scufundările în saturație, cu heliox, temperatura de confort în mediul hiperbar trebuie să fie menținută la un nivel mai ridicat decât cea de la presiunea atmosferică (28 ÷ 30°C).



2.1.2. Umiditatea

Umiditatea depinde de temperatură și de presiune, parametrii care determină modificarea stării de agregare. Schimbarea de fază este însoțită de un schimb de energie cu mediul ambiant, respectiv căldura latentă L [J]. Cele trei faze: solidă, lichidă și gazoasă coexistă în punctul triplu τ . Procesele de schimbare a stării de agregare sunt evidențiate în Figura 2.1.

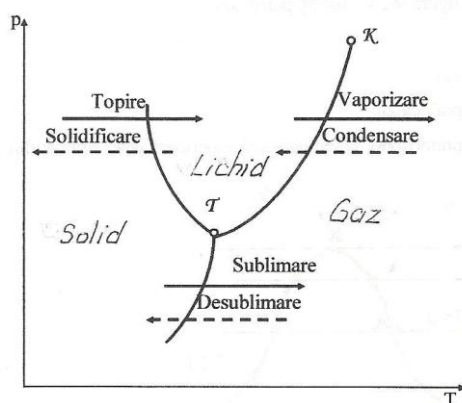


Figura 2.1 Transformări de fază de ordinul 1 [Constantin A., 2002]

← - - - procese însoțite de primirea căldurii latente din mediul exterior

.....→ procese însoțite de cedarea căldurii latente din mediul exterior

Peste punctul critic K , este numai starea gazoasă. Între punctele τ și K (punctul critic) coexistă faza lichidă cu faza gazoasă. Răcirea izobară a aerului umed nesaturat duce la saturarea cu apă a amestecului. Temperatura la care presiunea parțială a vaporilor devine egală cu presiunea de saturație se numește *temperatura punctului de rouă*.

Temperatura punctului de rouă (τ) este temperatura de saturație a aerului umed care se răcește și își păstrează umiditatea absolută x constantă [Leonăchescu N., 1981]. Răcirea sub acest punct de rouă conduce la transformarea vaporilor de apă în fază lichidă.

Pentru fiecare amestec de aer respirabil este important să se determine temperatura punctului de rouă, în vederea evitării condensării vaporilor. Nu este admisă umiditatea în exces în aerul respirator pentru scufundare. Umiditatea crescută îngreunează respirația iar în perioadele reci, poate produce o înghețare a căilor respiratorii, răcirea corpului, iritarea sinusurilor.

Chesoanele sunt dotate cu higrometre. Menținerea umidității gazului respirator este asigurată printr-un climatizor. Umiditatea în exces din cheson, este în permanență captată printr-un sistem cu circuit de apă rece. Condensul este cules pe fundul climatizorului, de unde este deversat, printr-o purjă, la exterior.

2.1.3. Parametrii gazului respirator

Pentru menținerea concentrației de oxigen necesară, se face regenerarea atmosferei, printr-un filtru de calce sodată care absoarbe bioxidul de carbon. Această funcție este îndeplinită de un aparat, numit Scrubber, tipic pentru barocamera și simulatorul de scufundare. Gazul expirat este absorbit de un ventilator foarte puternic și este dirijat către canistrelor de calce sodată.

Aici are loc o reacție chimică prin care este absorbit bioxidul de carbon. Ventilatorul este amplasat la baza ansamblului. Peste el este canistra de calce sodată.

Oxigenul

La scufundările profunde, în saturație, presiunea parțială a oxigenului la nivelul de viață, se stabilește în planul de scufundare.

Presurizarea se face de obicei peste aerul aflat la suprafață ($r_{oxs} = 0.21$ la $p_a = 1\text{bar} \rightarrow pp_{oxs} = 0.21\text{bar}$), la o presiune intermediară, până la presiunea parțială de oxigen dorită. Formula de calcul a presiunii absolute intermediare p_{ai} este:

$$p_{ai} = \frac{pp_{oxf} - pp_{oxs}}{r_{oxam}} \quad (2.2)$$

pp_{oxs} - presiunea parțială de oxigen la suprafață

pp_{oxf} - presiunea parțială de oxigen la final

p_{ai} - presiunea absolută intermediară

p_{af} - presiunea absolută finală

Dacă se presurizează tot cu aer (nitrox 21%), după presurizarea intermediară se adaugă heliu pur (100%) până la atingerea adâncimii dorite și a concentrației stabilite pentru amestecul respirator.

- De exemplu pentru stabilirea presiunii parțiale de oxigen de la final $pp_{oxf} = 440\text{mbar} = 0.44\text{bar}$, la utilizarea de amestec respirator heliox 20/80, presiunea absolută intermediară p_{ai} este:

$$p_{ai} = \frac{pp_{oxf} - pp_{oxs}}{r_{oxam}} = \frac{0.44 - 0.21}{0.2} = 1.15\text{bar}$$

În acest caz presiunea intermediară (presiunea manometrică):

$p_{hi} = (1.15 - 1) \cdot 10 = 1.5\text{msw}$. Se adaugă peste aer 1.5 msw amestec respirator heliox 20/80.

Dacă amestecul respirator impus de condițiile de scufundare are concentrația prea mică pentru ridicarea presiunii parțiale a oxigenului la 480mbar și obținerea unei adâncimi absolute p_{af} , presiunea absolută intermediară p_{ai} se calculează cu formula:

$$p_{ai} = \frac{pp_{oxf} - p_{af} \cdot r_{oxam}}{r_{oxs} - r_{oxam}} \quad (2.3)$$

- De exemplu se dorește presurizarea până la 60msw cu un amestec heliox 3/97.

$$p_{hf} = 60\text{msw} \rightarrow p_{af} = \frac{60}{10} + 1 = 7\text{bar}$$

Presiunea absolută intermediară p_{ai} este:

$$p_{ai} = \frac{pp_{oxf} - p_{af} \cdot r_{oxam}}{r_{oxs} - r_{oxam}}$$

$$pp_{oxf} = 480\text{mbar} = 0.48\text{bar}$$

$$c_{oxam} = 3\% \rightarrow r_{oxam} = 0.03$$

$$p_{ai} = \frac{pp_{oxf} - p_{af} \cdot r_{oxam}}{r_{oxs} - r_{oxam}} = \frac{0.48 - 7 \cdot 0.03}{0.21 - 0.03} = \frac{0.27}{0.18} = 1.5\text{bar}$$

$$p_{hi} = (p_{ai} - 1) \cdot 10 = (1.5 - 1) \cdot 10 = 5\text{msw}.$$



Ca alternativă se poate face presurizarea cu amestecul sărac heliox 3/97 până la adâncimea finală și apoi se injectează oxigen 100% pentru obținerea presiunii parțiale de oxigen dorite. Heliul pur este greu de obținut de aceea se utilizează amestecuri de heliu.

Bioxidul de carbon

În barocameră presiunea parțială a bioxidului de carbon nu trebuie să depășească nici accidental 15 mbar, ea trebuie menținută la valoarea recomandată de 10 mbar.

La utilizarea turelelor în activitățile de scufundare la mare adâncime, Centrul de Scafandri a adoptat limitele stabilite în normele interne (NPPOPMAS), conform Tabelului 2.1.

Turela este în mod normal închisă etanș și presurizată până la o anumită adâncime, împreună cu tot sistemul utilizat la scufundările în saturație. Adâncimea de lucru este în mod obișnuit mai mare decât adâncimea corespunzătoare nivelului de viață în barocamere și turela va trebui presurizată câțiva metri la începutul fiecărei scufundări.

Tabelul 2.1 Limitele presiunilor parțiale ale bioxidului de carbon
[Statul Major al Marinei Militare, 1996]

p_{pCO_2} [mbar]	Timpi de expunere	Observații
50	Maxim 30 min	TURELĂ – expunere în caz de urgență
40	Maxim 2 ore	TURELĂ – expunere accidentală
30	2 – 8 ore	TURELĂ – expunere de scurtă durată
22	8 – 24 ore	SCUFUNDARE – expunere maximă autorizată
10	nelimitat	BAROCAMERĂ - expunere maximă și igienică
6	nelimitat	expunere optimă

Echivalentul procentului la suprafață PSE (“Percentage Surface Equivalent”) sau Procentul echivalent la suprafață SEP (“Surface Equivalent Percentage”), reprezintă de fapt scara de citire. Acesta este doar un alt mod de exprimare a presiunii parțiale pentru CO₂, al cărui procent citit are o valoare maxim admisibilă, într-o turelă, de 2%, adică o presiune parțială de 20 mbar. [IMCA 2004]

Valoarea citită a presiunii parțiale p_{pCO_2citit} [bar] este

$$p_{pCO_2citit} = \frac{PSE}{100} \quad (2.4)$$

Procentul real de CO₂ la suprafață PSE_r % este

$$PSE_r = \frac{PSE}{p_{abs}} \quad (2.5)$$

p_{abs} [bar] - presiunea absolută

Foarte practice și de actualitate sunt seturile de tuburi colorimetrice indicatoare, utilizate pentru determinarea impurităților din aerul respirator comprimat până la o presiune maximă de 300 bar, din butelii sau de la compresoare. Aerul comprimat este direcționat în fiecare tub indicator (vezi Figura 2.2). Completul de testare conține câte un tub pentru fiecare noxă ce

trebuie să fie determinată (respectiv: umiditatea, uleiul, bioxidul de carbon, monoxidul de carbon) iar tuburile sunt așezate într-o cutie ce poate fi transportată cu mâna.

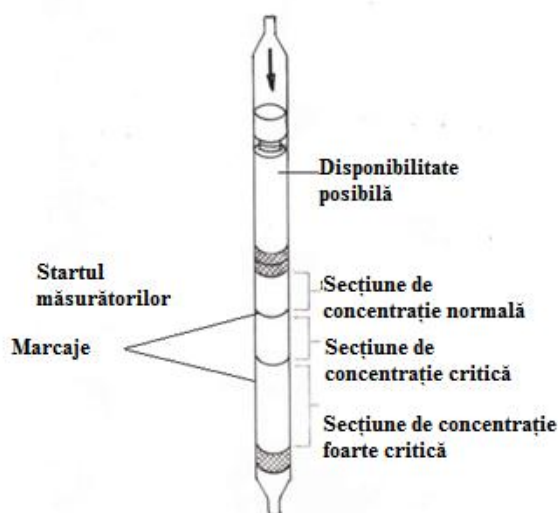


Figura 2.2 - Tub colorimetric indicator pentru determinarea impurităților din aerul respirator comprimat [Draeger, 2017]

Utilizarea varului sodat (calce sodată)

Varul sodat este un complex de hidroxizi, utilizat pentru absorbția CO_2 . Produsele comerciale sunt de obicei un complex de hidroxid de sodiu, potasiu și calciu. Bioxidul de carbon este reținut prin reacție chimică.

În prima parte a procesului, bioxidul de carbon se dizolvă în apă cu formare de acid carbonic. Acidul carbonic reacționează apoi cu hidroxizii, cu formare de carbonați și alte chimicale și cu eliberarea apei. Procesul are loc cu degajare de căldură.

Dacă absorbantul este prea uscat, prima etapă nu va avea loc și procesul de absorbție va fi inefficient. Dacă este prea umed, absorbantul va avea o compoziție păstoasă care va închide porii și va inhiba reacția.

Consumul de var sodat [IMCA 2004]

- 1 kg de var sodat absoarbe 120 litri CO_2 ;
- 1 kg de var sodat ajunge unui scafandru pentru 4 ore → 6 kg ajung unui scafandru 24 ore.

2.2. Probleme rezolvate

1. Enunț

O turelă cu volumul de 30 m^3 de gaz este presurizată la 68 msw. După scufundare turela se răcește de la 31°C la 28°C .

Întrebare

Care va fi noua presiune manometrică din camera presurizată și ce volum de gaz trebuie completat pentru a reveni la presiunea inițială?

**Rezolvare**

$$p_1 = 68\text{msw} = \frac{68}{10} + 1 = 7.8\text{bar}$$

$$T_1 = 31 + 273 = 304\text{K}$$

$$T_2 = 28 + 273 = 301\text{K}$$

Se aplică legea lui Charles

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{7.8 \cdot 301}{304} = 7.7\text{bar} \rightarrow p_{H_2} = (p_2 - 1) \cdot 10 = 6.7 \cdot 10 = 67\text{msw}$$

$$\Delta p = (p_1 - p_2) = (7.8 - 7.7) = 0.1\text{bar}$$

Gazul necesar pentru completare este

$$V_c = V_{in} \cdot \Delta p = 30 \cdot 0.1 = 3\text{m}^3.$$

2. Enunț

O cameră hiperbară cu volumul inundabil de 20m^3 este presurizată rapid la 180 msw. După presurizare, temperatura din barocameră scade de la 35°C la 19°C .

Întrebare

Ce volum de gaz trebuie completat pentru a reveni la presiunea dorită (180 msw)?

Rezolvare

$$p_1 = 180\text{msw} = \frac{180}{10} + 1 = 19\text{bar}$$

p_2 - presiunea după răcire

$$t_1 = 35^\circ\text{C} \rightarrow T_1 = 35 + 273 = 308\text{K}$$

$$t_2 = 19^\circ\text{C} \rightarrow T_2 = 19 + 273 = 292\text{K}$$

Legea lui Charles (2.1):

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{19 \cdot 292}{308} \cong 18\text{bar} \rightarrow \Delta p = (p_1 - p_2) = (19 - 18) = 1\text{bar}$$

Gazul necesar pentru completare este

$$V_c = V_{in} \cdot \Delta p = 20 \cdot 1 = 20\text{m}^3.$$

3. Enunț

Într-o incintă hiperbară după presurizare, temperatura scade de la 30°C la 15°C iar presiunea scade cu 16msw. Pentru revenirea la adâncimea inițială se completează cu 28m^3 de gaz.

Întrebări

- Care este volumul inundabil al camerei hiperbare?
- Care este presiunea manometrică cerută pentru scufundare?

Rezolvări

- Diferența de presiune $\Delta p = 16\text{msw} = 1.6\text{bar}$

Gazul necesar pentru completare este

$$V_c = V_{in} \cdot \Delta p \rightarrow V_{in} = \frac{V_c}{\Delta p} = \frac{28}{1.6} = 17.5\text{m}^3 - \text{volumul inundabil}$$

- Temperaturile înainte și după presurizare sunt:

$$t_1 = 30^\circ\text{C} \rightarrow T_1 = 30 + 273 = 303\text{K}$$

$$t_2 = 15^\circ\text{C} \rightarrow T_2 = 15 + 273 = 288\text{K}$$

Transformarea este izocoră (volumul rămâne constant, respectiv V_{in}). Se aplică Legea lui Charles (2.1) și se calculează presiunea absolută la adâncimea de lucru:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow p_1 = \frac{p_2 \cdot T_1}{T_2} = \frac{(p_1 - \Delta p) \cdot T_1}{T_2}$$

$$p_1 = \frac{(p_1 - 1.6)}{288} \cdot 303 \Leftrightarrow 1.6 \cdot 303 = p_1(303 - 288) \rightarrow p_1 = \frac{484.8}{15} = 32.3 \text{ bar}$$

$$p_1 = 32.3 \text{ bar} \rightarrow p_{h1} = (32.3 - 1) \cdot 10 \text{ msw} = 313 \text{ msw}.$$

4. Enunț

5 scafandri sunt presurizați la 100msw într-o cameră hiperbară cu volumul inundabil de 15 m^3 . Temperatura în incintă a scăzut de la 300K la 17°C .

Întrebări

- Care este presiunea din barocameră după răcire?
- Ce cantitate de var sodat este necesară pentru purificarea atmosferei din incintă, dacă durată totală a scufundării este de 10 ore?

Rezolvare

$$a. \quad p_1 = 100 \text{ msw} = \frac{100}{10} + 1 = 11 \text{ bar}$$

$$T_1 = 300\text{K}$$

$$t_2 = 17^\circ\text{C} \rightarrow T_2 = 17 + 273 = 290\text{K}$$

Se aplică Legea lui Charles (2.1):

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \rightarrow p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{11 \cdot 290}{300} \cong 10.6 \text{ bar} \rightarrow p_{h2} = (10.6 - 1) \cdot 10 = 96 \text{ msw}.$$

b. 1kg de var sodat este necesar pentru 1 scafandru pentru 4 ore.

Pentru 10 ore 1 scafandru consumă:

$$\frac{10}{4} = 2.5 \text{ kg var sodat}$$

6 scafandri au nevoie de:

$$6 \cdot 2.5 = 15 \text{ kg var sodat în 10 ore}.$$

5. Enunț

O cameră hiperbară presurizată la 150msw are o variație de temperatură de la 33°C la 27°C . În cameră nu a mai fost completat gaz respirator.

Întrebare

Care este diferența de presiune din barocameră, după răcirea ei?

Rezolvare

Se calculează presiunea absolută inițială

$$p_{h1} = 150 \text{ msw} \rightarrow p_{a1} = \frac{p_{h1}}{10} + 1 = \frac{150}{10} + 1 = 16 \text{ bar}$$

Temperaturile absolute inițiale și finale sunt

$$t_1 = 33^\circ\text{C} \rightarrow T_1 = 33 + 273 = 306\text{K}$$

$$t_2 = 27^\circ\text{C} \rightarrow T_2 = 27 + 273 = 300\text{K}$$

Se aplică Legea lui Charles (2.1):

$$\frac{p_{a1}}{T_1} = \frac{p_{a2}}{T_2} \rightarrow p_{a2} = p_{a1} \frac{T_2}{T_1} = 16 \frac{300}{306} \cong 15.7 \text{ bar}$$



Presiunea manometrică la adâncimea finală este

$$p_{h2} = (p_{a2} - 1)10 = (15.7 - 1)10 = 147\text{msw}$$

Diferența de presiune după răcirea barocamerei este

$$\Delta p_h = p_{h1} - p_{h2} = 150 - 147 = 3\text{msw}$$

Pentru menținerea adâncimii inițiale, echipa de la suprafață trebuie să adauge 3msw de gaz.

6. Enunț

O turelă este presurizată la suprafață la 328 fsw și temperatura interioară este 35°C . După ce este scufundată în mare la presiunea de 100msw, temperatura gazului din interior scade cu 10°C .

Întrebare

Cu câți fsw scade presiunea din turelă după răcirea ei, dacă nu se completează gaz de presurizare?

Rezolvare

Se calculează presiunea absolută inițială

$$p_{h1} = 328\text{fsw} \cong 100\text{msw} \rightarrow p_{a1} = \frac{100}{10} + 1 = 11\text{bar}$$

Temperatura absolută inițială este

$$t_1 = 35^{\circ}\text{C} \rightarrow T_1 = 35 + 273 = 308\text{K}$$

Temperatura finală este $t_2^{\circ}\text{C}$:

$$t_1 - t_2 = \Delta t \rightarrow t_2 = t_1 - \Delta t = 35 - 10 = 25^{\circ}\text{C}$$

Temperatura absolută finală

$$T_2 = t_2 + 273 = 25 + 273 = 298\text{K}$$

Se aplică Legea lui Charles (2.1):

$$\frac{p_{a1}}{T_1} = \frac{p_{a2}}{T_2} \rightarrow p_{a2} = p_{a1} \frac{T_2}{T_1} = 11 \frac{298}{308} \cong 10.6\text{bar}$$

Presiunea manometrică la adâncimea finală este

$$p_{h2} = (p_{a2} - 1)10 = (10.6 - 1)10 = 96\text{msw}$$

Diferența de presiune este

$$\Delta p_h = p_{h1} - p_{h2} = 100 - 96 = 4\text{msw} = 13\text{fsw}$$

7. Enunț

Pentru stabilirea presiunii parțiale de oxigen la finalul presurizării $p_{poxf} = 400\text{mbar}$, se utilizează un amestec respirator heliox 10/90.

Întrebare

Cât amestec heliox 10/90 este necesar pentru obținerea presiunii parțiale de oxigen dorite?

Rezolvare

Presiunea parțială a amestecului la finalul presurizării este

$$p_{poxf} = 400\text{mbar} = 0.4\text{bar}$$

La amestecul 10/90 heliul are participația volumică $r_{oxam} = \frac{10}{100} = 0.1$. Peste aerul atmosferic cu $p_{poxs} = 0.21\text{bar}$ se adaugă heliox 10/90. Presiunea absolută intermediară p_{ai} (formula 2.4) este:

$$p_{ai} = \frac{p_{poxf} - p_{poxs}}{r_{oxam}} = \frac{0.4 - 0.21}{0.1} = 1.9\text{bar}$$

În acest caz presiunea manometrică la adâncimea intermediară de presurizare este:

$p_{hi} = (1.9 - 1) \cdot 10 = 9\text{msw}$. Se adaugă peste aer 9msw amestec respirator heliox 10/90.

8. Enunț/Întrebare

Cum se face presurizarea unei barocamere la o presiune finală de 50msw, cu un amestec heliox 5/95, astfel încât presiunea parțială a oxigenului să fie 600mbar?

Rezolvare

Presiunea parțială a amestecului la finalul presurizării este

$$p_{poxf} = 600\text{mbar} = 0.6\text{bar}$$

$$p_{hf} = 50\text{msw} \rightarrow p_{af} = \frac{50}{10} + 1 = 6\text{bar}$$

Presiunea absolută intermediară p_{ai} este:

$$p_{ai} = \frac{p_{poxf} - p_{af} \cdot r_{oxam}}{r_{oxs} - r_{oxam}}$$

$$c_{oxam} = 5\% \rightarrow r_{oxam} = 0.05$$

$$p_{ai} = \frac{p_{poxf} - p_{af} \cdot r_{oxam}}{r_{oxs} - r_{oxam}} = \frac{0.6 - 6 \cdot 0.05}{0.21 - 0.05} = \frac{0.3}{0.16} = 1.88\text{bar}$$

$$p_{hi} = (p_{ai} - 1) \cdot 10 = (1.88 - 1) \cdot 10 = 8.8\text{msw} \cong 9\text{msw}.$$

Se adaugă peste aer 9 msw amestec respirator heliox 5/95.

9. Enunț

Un scafandru însoțitor ia o probă de gaz dintr-o turelă, cu un tub chimic pentru bioxidul de carbon (CO_2) și citește 1.5%.

Întrebări

- Dacă turela se află la 100msw, să se determine Procentul real la suprafață de CO_2 ($\text{PSE}_r\%$) și Procentul echivalent la suprafață (SEP).
- Care este valoarea citită a presiunii parțiale a CO_2 ?
- Care este timpul maxim de expunere la scufundare pentru această valoare?

Rezolvări

a. Procentul echivalent la suprafață este:

$$\text{PES} = \text{SEP} = 1.5\% \text{ CO}_2$$

Presiunea absolută la 100msw este:

$$p_{abs} = \frac{H}{10} + 1 = \frac{100}{10} + 1 = 11\text{bar}$$

Se aplică formula 2.6 pentru Procentul real la suprafață:

$$\text{PES}_r = \frac{\text{PES}}{p_{abs}} = \frac{1.5}{11} = 0.136\% \cong 0.14\%$$

b. Se aplică formula 2.5:



$$p_{pCO2citit} = \frac{PES}{100} = \frac{1.5}{100} = 0.015bar = 15mbar$$

c. Pentru $p_{pCO2} = 15mbar$ expunerea la scufundare este maximă.

10. Enunț

Pe un tub chimic relevat din SAS-ul presurizat, se citește $PES=1\%$ CO_2 . Procentul echivalent la suprafață real este $PES_r=0.2\%$ CO_2 .

Întrebări

- Care este presiunea manometrică de la care s-a prelevat proba?
- Care este presiunea parțială de CO_2 la această adâncime?

Rezolvare

$$a. PES_r = \frac{PES}{p_{abs}} \rightarrow p_{abs} = \frac{PES}{PES_r} = \frac{1}{0.2} = 5bar$$

$$p_h = (p_{abs} - 1) \cdot 10 = (5 - 1) \cdot 10 = 40msw$$

$$b. p_{pCO2citit} = \frac{PES}{100} = \frac{1}{100} = 0.01bar = 10mbar.$$

2.3. Probleme propuse

1. Enunț

O barocameră presurizată cu volumul de $20 m^3$ de gaz este presurizată la $50 msw$. După scufundare turela se răcește de la $32^{\circ}C$ la $27^{\circ}C$.

Întrebări

Care va fi noua adâncime din camera presurizată și ce volum de gaz trebuie completat pentru a reveni la presiunea inițială? (R: $49m$; $2m^3$)

2. Enunț

Un ansamblu hiperbar cu volumul total de $50m^3$ este presurizat la $150 msw$. După presurizare, temperatura din barocameră scade de la $33^{\circ}C$ la $29^{\circ}C$.

Întrebări

Care va fi noua presiune manometrică din camera presurizată și ce volum de gaz trebuie completat pentru a reveni la presiunea inițială? (R: $148msw$; $10m^3$)

3. Enunț

Într-o incintă hiperbară după presurizare, temperatura scade de la $34^{\circ}C$ la $26^{\circ}C$ iar presiunea scade cu $10 msw$. Pentru revenirea la presiunea inițială se completează $18 m^3$ de gaz.

Întrebări

- Care este volumul inundabil al camerei hiperbare? (R: $18m^3$)
- Care este presiunea manometrică cerută pentru scufundare? (R: $374msw$)

4. Enunț

4 scafandri sunt în saturație la $90 msw$ într-o cameră hiperbară cu volumul inundabil de $30 m^3$. După presurizare temperatura în incintă a scăzut de la $303K$ la $24^{\circ}C$.

Întrebări

- a. Care este presiunea manometrică din barocameră după răcire? ($R: 88msw$)
- b. Ce cantitate de var sodat este necesară pentru purificarea atmosferei din incintă, dacă durata totală a scufundării este de 5 zile? ($R: 120kg$)

5. Enunț

O cameră hiperbară este presurizată la $60msw$. Temperatura inițială este $33^{\circ}C$. După stabilizarea temperaturii, presiunea scade la $58msw$.

Întrebări

- a. Care este temperatura după răcirea barocamerei? ($R: 24^{\circ}C$)
- b. Care este presiunea gazului pentru completare, ca să revină atmosfera la adâncimea inițială? ($R: 2msw$)

6. Enunț

O turelă presurizată la suprafață la $297fsw$ are temperatura interioară de $30^{\circ}C$. După ce este scufundată în mare, temperatura gazului din interior scade la $25^{\circ}C$.

Întrebări

- a. Cu câți fsw scade presiunea din turelă după răcirea ei, dacă nu se completează gaz de presurizare? ($R: 6.6fsw$)
- b. Care este cantitatea de gaz pentru completare, ca să revină atmosfera la adâncimea inițială, dacă volumul turelei este $15m^3$? ($R: 3m^3$)

7. Enunț

Pentru stabilirea presiunii parțiale de oxigen la finalul presurizării $p_{poxf} = 600mbar$, se utilizează un amestec respirator heliox 5/95.

Întrebare

Cât amestec heliox 5/95 este necesar pentru obținerea presiunii parțiale de oxigen dorite? ($R: 68msw$).

8. Enunț/Întrebare

Cum se face presurizarea unei barocamere la o presiune manometrică finală de $295msw$, cu un amestec heliox 3/97, astfel încât presiunea parțială a oxigenului să fie $500mbar$? ($R: 1msw$).

9. Enunț

Tehnicianul de scufundare ia o probă de gaz din turela presurizată, cu un tub chimic pentru bioxidul de carbon (CO_2) și citește 2%.

**Întrebări**

- a. Dacă turela se află la 60msw, să se determine *Procentul echivalent la suprafață real de CO₂* ($PES_r\%$) și *Procentul echivalent la suprafață* (SEP). (R: $PES=2\%$; $PES_r = 0.29\%$)
- b. Care este valoarea citită a presiunii parțiale a CO₂ ? (R: 20mbar)
- c. Care este timpul maxim de expunere la scufundare pentru această valoare? (R: 24h).

10. Enunț

Pe un tub chimic relevat din SAS-ul presurizat, se citește $PES=1.5\%$ CO₂. Procentul echivalent la suprafață real este $PES_r=0.3\%$ CO₂.

Întrebări

- a. De la ce adâncime s-a prelevat proba? (R: 40m)
- b. Care este presiunea parțială de CO₂ la această adâncime? (R: $p_{pCO_2citit} = 15mbar$)

CAPITOLUL 3

UTILIZAREA TABELELOR DE SCUFUNDARE

LA DECOMPRESIE

Tamara STANCIU, Emil AVRAM

3.1. Considerații teoretice [Degeratu M., 2008]

La decompresie, gazele inerte dizolvate în țesuturile organismului scafandruului se degajă și se elimină prin plămâni. Această degajare poate avea loc în două moduri:

- prin trecerea directă a gazelor inerte din faza dizolvată în faza gazoasă la nivelul frontierelor alveolo-capilare, acest mod corespunde decompresiilor corecte, oferite de tabelele de decompresie;
- prin trecerea gazelor inerte, sub formă de bule, în țesuturi și în sânge; acesta este modul cel mai periculos de transport; totuși, transportul bifazic bine controlat, poate asigura și el revenirea în bune condiții a scafandruului la presiunea atmosferică.

Decompresia în trepte este caracteristică pentru scufundările unitare autonome și de sistem până la adâncimea de 120 m și se realizează în două etape:

- ridicarea la primul palier de decompresie;
- efectuarea palierelor de decompresie propriu-zise.

În general, procedeul de decompresie este dirijat de un singur compartiment de țesuturi despre care se spune că este *compartimentul de țesuturi director al decompresiei*.

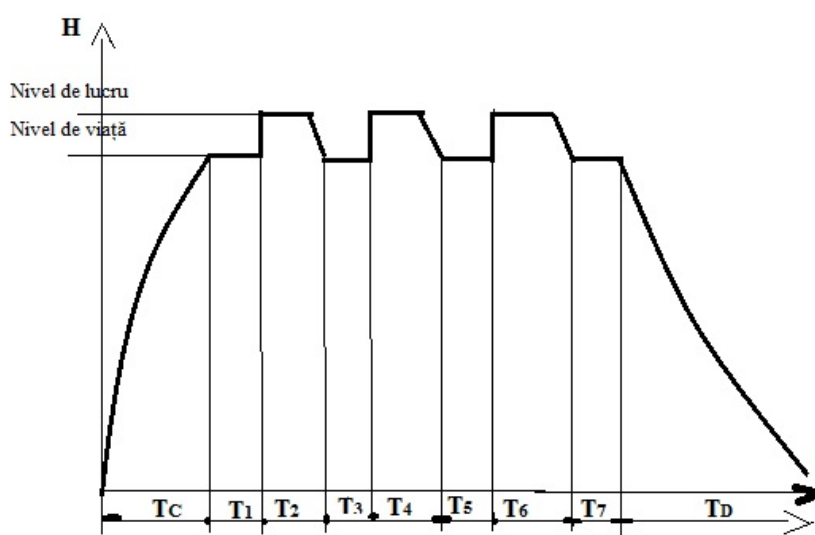


Fig. 3.1 Diagrama scufundării în saturatie [Dinu D., 1982]

Pentru scufundări unitare de sistem la adâncimi de peste 120 m și pentru scufundări în saturatie, decompresia se realizează în mod continuu. (Fig. 3.1) Totuși, aceasta nu este o regulă generală pentru că sunt unele școli de scufundare (școala britanică) care conduc decompresii în



trepte după scufundări în saturație (întrerup decompresia pe timpul nopții). Această creștere a precauțiilor pentru reducerea eventualelor accidente de decompresie, din experiența autorilor, nu se justifică.

Decompresia se face după tabele de decompresie care stabilesc exact palierele (opririle) de adâncime și durata lor, pentru întoarcerea scafandrului la suprafață, funcție de adâncimea și de durata scufundării. Aceste opriri sunt necesare pentru a permite diferitelor țesuturi umane să elimine gazele inerte absorbite lent, fără să se producă leziuni.

Expunerea la presiune se face în două perioade:

- compresia până la adâncimea de lucru;
- staționarea sub apă.

Prin cumularea celor două perioade rezultă timpul de expunere la presiune luat în calcul pentru tabelele de decompresie. În funcție de acest timp de expunere avem:

- scufundări unitare autonome cu timp scurt de expunere;
- scufundări unitare profunde de sistem cu timp mediu de expunere;
- scufundări în saturație cu timp mare de expunere.

Timpul de expunere la presiune afectează diversele țesuturi componente ale organismului uman.

Scufundările autonome se desfășoară la adâncimi de până la 60 - 80m, timpul de decompresie se adaugă timpilor de coborâre și timpilor de staționare pe fund, de aceea viteza de coborâre este mare: 20 – 30m/min. Peste 80m, până la 150m adâncime, în cazul scufundărilor unitare de sistem, viteza de compresie se reduce la 15 – 20m/min. Atât în cazul scufundărilor unitare cât și în cazul celor în saturație, după 150 m adâncime, se reduce viteza de compresie la 1 – 10 m/min, din cauza fenomenului SNIP (Sindrom Nervos al Înalțelor Presiuni).

Pentru a înțelege modul de utilizare a tabelelor de scufundare, sunt utile câteva definiții:

- durata scufundării reprezintă timpul cuprins între momentul începerii scufundării și momentul începerii ridicării spre suprafață sau spre primul palier de decompresie; timpul de coborâre face parte din durata scufundării;
- adâncimea scufundării este adâncimea maximă atinsă în timpul scufundării, rotunjită la un multiplu de 3, imediat superior;
- palierul este treapta de staționare la un anumit nivel stabilit în tabelul de scufundare ales;
- decompresia este procesul de depresurizare la revenirea la suprafață, după o scufundare și se face controlat, după tabele de decompresie;
- scufundarea sub curba de securitate reprezintă scufundarea a cărei durată este suficient de scurtă, încât revenirea la presiunea atmosferică nu necesită paliere de decompresie;
- coeficientul C este raportul: tensiunea gazului dizolvat în țesut la presiunea scufundării/tensiunea gazului dizolvat la presiunea normală.
- raportul critic de suprasaturație reprezintă o valoare critică specifică fiecărui gaz inert, valoare care nu trebuie să fie depășită în timpul decompresiei de raportul presiune parțială gaz inert dizolvat / presiune parțială gaz inert inspirat.

- tabelele de scufundare sunt tabele profesionale, care stabilesc parametrii exacți ai unei scufundări (adâncimea, durata scufundării, palierele cu timpii de staționare, durata ridicării și coeficientul C pentru scufundări succesive), în vederea prevenirii accidentelor de decompresie;
- intervalul la suprafață este timpul cuprins între ora de ieșire dintr-o scufundare și ora de lansare în următoarea scufundare;
- scufundarea succesivă este scufundarea executată la un interval mai mic de 8 ore față de scufundarea precedentă;
- timpul de majorare este timpul calculat cu un coeficient C corespunzător timpului de la suprafață dintre 2 scufundări succesive.
- durata fictivă se obține din însumarea duratei scufundării succesive cu timpul de majorare.

Raportul critic de suprasaturație este foarte important la decompresie, deoarece prin depășirea lui degajarea gazelor inerte din țesuturi se face cu bule, bule care odată ajunse în sânge provoacă grave accidente de decompresie (benduri, accidente neurologice, tulburări respiratorii). [Bennet P. B., 2003]

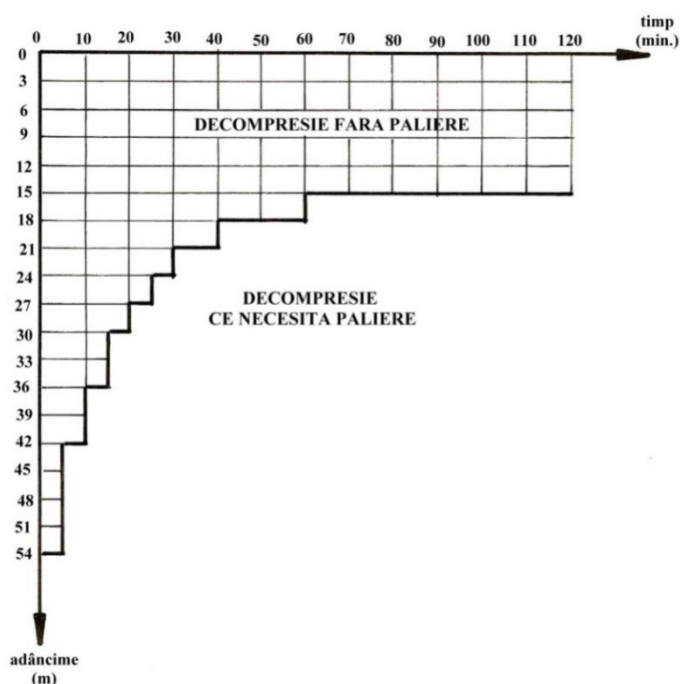


Fig. 3.2. Curba de securitate corespunzătoare tabelului cu aer LH-82 [Petru A., 1992]

Pentru exemplificare este figurat tabelul de scufundare cu aer LH – 82 care a fost elaborat în cadrul Laboratorului hiperbar al Centrului de Scafandri în anul 1982.

După cum se observă pe diagramă, în funcție de adâncimea și de durata scufundării, sunt sau nu sunt necesare paliere de decompresie.

Tabelele de decompresie se diferențiază după gazul respirator utilizat, după modul de executare a palierele (la adâncime sau la suprafață în barocamere), după expuneri excepționale (adâncimi >60m) la scufundările cu aer sau la scufundările la altitudine, etc.



Cărțile de specialitate în domeniu, US Navy Diving Manual, Ghidul scafandrului autonom, etc., explică foarte bine care sunt criteriile de alegere a tabelelor iar diferitele centre hiperbare au dezvoltat tabele proprii:

- Tabele de decompresie cu aer, LH – România;
- Tabele de decompresie cu Nitrox – România;
- Tabele de decompresie cu aer – Comex, Franța;
- Tabele de decompresie cu amestecuri supraoxigenate – Comex, Franța;
- Tabele de decompresie pentru scufundări profunde cu heliox - Comex, Franța;
- Tabele de scufundare cu decompresie la suprafață cu heliox - Comex, Franța;
- Tabele terapeutice - Comex, Franța;
- Tabele de scufundare U.S.Navy 70 pt. expuneri excepționale;
- Tabele U.S.Navy pt. scufundări cu aer;
- Tabele U.S.Navy pt. scufundări cu Heliox;
- Tabele U.S.Navy pentru scufundări cu Nitrox, etc.

Care sunt tabelele de decompresie, criteriile de alegere a lor în funcție de tipul scufundării, nu fac obiectul acestei lucrări.

Graficul decompresiei depinde de timpul de fund și de presiunea parțială a gazului inert din barocameră. Dacă le aveți la dispoziție, tabelele US Navy bazate pe presiunea heliului sunt cel mai ușor de folosit. Presiunea heliului în barocameră este calculată (în fsw) și se folosește tabela corespunzătoare.

Pentru exemplificarea modului de utilizare a tabelelor de decompresie, găsiți în ANEXE Tabelul 1 decompresia cu aer (LH – 82). În prima coloană este trecută adâncimea din 3 în 3 m. Dacă adâncimea efectivă nu este multiplu de 3, se alege valoarea imediat superioară din tabel. În coloana a doua este trecută durata scufundării și apoi durata de staționare a palierelor recomandate, tot multiplu de 3 m. Ultimul minut al palierului reprezintă timpul de urcare la palierul superior. Următoarea coloană, care conține valoarea însumată a duratei ridicării $\tau(min)$, nu este cuprinsă în acest tabel, pentru a da posibilitatea utilizatorilor culegerii să facă singuri acest calcul, pentru o mai bună înțelegere a utilizării tabelelor. Pe ultima coloană este coeficientul C pentru scufundări succesive. În cazul scufundărilor cu aer, viteza de ridicare de la adâncimea de lucru la primul palier este $v = 15m/min$, de unde rezultă timpul [Petru A., 1992]:

$$\tau_0 = \frac{(H_0 - H_{p1})}{v} \quad (3.1)$$

$\tau_0(min)$ – timpul de ridicare la primul palier

$H_0(m)$ - adâncimea de lucru

$H_{pi}(m)$ – adâncimea la palierul i

$\tau_{pi}(min)$ - timpul de staționare la palierul i

Durata ridicării $\tau(min)$ este:

$$\tau = \tau_0 + \sum_{i=1}^n \tau_{pi} \quad (3.2)$$

3.2. Probleme rezolvate

1. Enunț

Un scafandru autonom execută o scufundare la 28 m, Coborârea a durat 5 minute și timpul de fund a fost 25 min.

Întrebări

- Verificați durata totală a scufundării.
- Cum se face revenirea la suprafață?

Rezolvare

- Adâncimea de 28m nu este multiplu de 3, se caută valoarea imediat superioară, multiplu de 3, aceasta este $H_0 = 30\text{m}$. Durata scufundării este: $5 + 25 = 30\text{min}$.

Se urmărește Tabelul 1 LH 82 din Anexe: pentru 30m și timp de scufundare 30min, primul și singurul palier este $H_{p1} = 3\text{m}$. Între adâncimea de fund și palier, scafandru a urcat: $30 - 3 = 27\text{m}$, cu viteza $v = 15\text{m/min}$. Se calculează timpul de urcare până la primul palier (3.1)

$$\tau_0 = \frac{(H_0 - H_{p1})}{v} = \frac{(30 - 3)}{15} = \frac{27}{15} = 1.8\text{min}$$

Durata totală a ridicării este (3.2)

$$\tau = \tau_0 + \sum_1^n \tau_{pi} = 1.8 + 7 = 8.8\text{min} = 8\text{min} \frac{8}{10} \cdot 60\text{s} = 8\text{min}48\text{s}.$$

- Scafandru urcă de la 28m la 3m în aproximativ 2 min, staționează aici 6min și apoi urcă la suprafață într-un minut.

2. Enunț

O echipă de scafandri face o scufundare de antrenament în cheson cu amestec aer, la 50m. Presurizarea a durat 7 minute și timpul de fund a fost 30 min.

Întrebări

- Verificați durata totală a scufundării.
- Cum se face revenirea la suprafață?

Rezolvare

- Adâncimea de 50m nu este multiplu de 3, se caută valoarea imediat superioară, multiplu de 3, aceasta este $H_0 = 51\text{m}$. Durata scufundării este: $7 + 30 = 37\text{min}$. Se alege valoarea imediat superioară din Tabelul 1, respectiv 40min.

Se urmărește Tabelul 1 LH 82 din Anexe: pentru 51m și timp de scufundare 40min, primul palier este $H_{p1} = 12\text{m}$. Între adâncimea de fund și palier, scafandru a urcat:

$51 - 12 = 39\text{m}$, cu viteza $v = 15\text{m/min}$. Se calculează timpul de urcare până la primul palier (3.1)

$$\tau_0 = \frac{(H_0 - H_{p1})}{v} = \frac{(51 - 12)}{15} = \frac{39}{15} = 2.6\text{min}$$

Durata totală a ridicării este (3.2)

$$\tau = \tau_0 + \sum_1^n \tau_{pi} = 2.6 + 5 + 11 + 23 + 36 = 77.6\text{min} = 77\text{min} \frac{6}{10} \cdot 60\text{s} = 77\text{min}36\text{s}.$$

- Revenirea la suprafață:

- se face decompresie de la 50m la 12m în 2 min36s, și se staționează aici 4min;
- decompresie de la 12m la 9m într-un minut și 10min palier la 9m;



- decompresie de la 9m la 6m într-un minut și staționare 22min la 6m;
- decompresie de la 6m la 3m într-un minut și palier 35min la 3m;
- decompresie de la 3m la suprafață într-un minut.

3. Enunț/ Întrebare

Care sunt caracteristicile decompresiei pentru o scufundare cu aer, succesivă, la un interval la suprafață de 2h și 30min de la prima scufundare, la o adâncime de 35m, cu durată de 30min, dacă prima scufundare s-a făcut la 38m, timp de 20min?

Rezolvare

Metoda I

Scufundarea anterioară: 38m $\rightarrow H_0 = 39m$ - multiplu de 3 imediat superior,

În Tabelul 1 LH 82 din Anexe, pentru 20min de scufundare corespunde $C=1.4$.

Timpul de la suprafață: $2h30min = 2 \cdot 60 + 30 = 150min \rightarrow$ coeficientul real C_r se ia din Tabelul 2 –Anexe, $C_r = 1.2$. Dacă nu se regăsește intervalul de timp în tabel, se ia intervalul imediat **inferior**. Pentru noul $C_r = 1.2$, timpul de majorare corespunzător $t_m = 11min$, se găsește în ANEXE Tabelul 3, pentru adâncimea succesivă $H_{0s} = 36m$. Se determină noul timp de lucru majorat, pentru scufundarea succesivă.

$t_s = 30 + 11 = 41min \rightarrow$ durată ridicării $t_c = 50min$ (ANEXE)

Revenim la Anexe Tabelul 1, pentru $H_{0s} = 36m$ și $t_c = 50min$ avem timpul de urcare la primul palier (3.1):

$$\tau_0 = \frac{(H_{0s} - H_{p1})}{v} = \frac{(36-9)}{15} = \frac{27}{15} = 1.8min$$

Durata totală a ridicării este (3.2):

$$\tau = \tau_0 + \sum_{i=1}^n \tau_{pi} = 1.8 + 2 + 18 + 28 = 49.8min = 49min(0.8 \cdot 60) = 49min48s.$$

Palierele se fac la: 9m –2min, 6m – 18min și 3 m - 28, conform Tabelului 1.

Metoda II

Decompresia se face normal după tabelul LH82 cu aer, Tabelul 1 din ANEXE dar se consideră:

- adâncimea de scufundare $H_s = \max(H_1, H_2) = \max(39m, 36m) = 39m$;
- durată scufundării $t_s = t_1 + t_2 = 20 + 30 = 50min$

Rezultă o decompresie cu:

$$\tau_0 = \frac{(H_0 - H_{p1})}{v} = \frac{(39-9)}{15} = \frac{30}{15} = 2min$$

$$\tau = \tau_0 + \sum_{i=1}^n \tau_{pi} = 2 + 4 + 23 + 28 = 57min$$

Aceasta este o metodă mai simplă, cu paliere la aceleași adâncimi (9m- 4min, 6m – 23min și 3m – 28min), dar cu prelungirea timpului total de decompresie, ceea ce este un dezavantaj.

4. Enunț/ Întrebare

Care sunt caracteristicile decompresiei pentru o scufundare cu aer succesivă, cele două scufundări având aceleași caracteristici ca în problema anterioară, dacă la intervalul de la suprafață se respiră oxigen între cele două scufundări?

Rezolvare

Prima scufundare: $38m \rightarrow H_0 = 39m$ - multiplu de 3 imediat superior,

În Tabelul 1 LH 82 din ANEXE, pentru 20min de scufundare corespunde $C=1.4$.

Timpul de la suprafață: $2h30min = 2 \cdot 60 + 30 = 150min \rightarrow$ coeficientul real C_r se ia din ANEXE Tabelul 4 pentru respiraie oxigen. Pentru $C=1.4$ la începutul respirației de oxigen, după 60min $C_r = 1$. În acest caz decompresia la scufundarea succesivă se va executa fără timp de majorare, după LH 82 cu aer. Revenim la Tabelul 1, pentru $H_{0s} = 36m$ și $t_s = 30min$ avem timpul de urcare la primul palier (3.1):

$$\tau_0 = \frac{(H_{0s} - H_{p1})}{v} = \frac{(36 - 6)}{15} = \frac{30}{15} = 2min$$

Durata totală a ridicării este (3.2):

$$\tau = \tau_0 + \sum_1^n \tau_{pi} = 2 + 1 + 18 = 21min.$$

Se observă reducerea semnificativă a timpului de decompresie la respiraia de oxigen între cele 2 scufundări succesive.

5. Enunț/ Întrebare

Cum se face decompresia pentru o scufundare cu aer efectuată într-un lac de munte aflat la 1500m altitudine, cunoscând adâncimea 20m și durata scufundării 45min?

Rezolvare

Pentru scufundările la altitudine se ține seama că la suprafață presiunea atmosferică este mai mică decât cea de la nivelul mării și în consecință se utilizează tabele de decompresie pentru scufundări la altitudine. Centrul de Scafandri din Constanța utilizează tabelele Buhlmann. În ANEXE găsiți Tabelul 5 pentru altitudini de 701 – 1500m, care cuprinde și adâncimea de 20m. În acest tabel se pot citi direct toți timpii care alcătuiesc durata totală a ridicării. Tabelul mai cuprinde și grupa pentru scufundările succesive. Cu aceste grupe se lucrează similar cu scufundările succesive normale, ce utilizează coeficienții C din Anexa Tabelele 2 și 3.

Adâncimea scufundării $H_0 = 21m$ (multiplu de 3 $\geq 20m$)

Durata scufundării

$t_s = 50min$ (valoarea imediat superioară dacă nu se regăsește în tabel).

Scafandrul urcă în $\tau_0 = 1.8min$ până la primul palier de 2m, unde staționează 10min, după care într-un minut străbate ultimii 2m. Durata totală a ridicării:

$$\tau = \tau_0 + \sum_1^n \tau_{pi} = 1.8 + 10 + 1 = 12.8min = 12min + (0.8 \cdot 60)s = 12min48s.$$

6. Enunț

O scufundare este planificată la 290 fsw utilizând un amestec de 15%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie US Navy în funcție de presiunea parțială a heliului va fi utilizată? (Tabelele merg pentru $p_{pHe} = 60fsw$ până la $p_{pHe} = 360fsw$ în pași de 10 fsw).

Rezolvare

Amestecul heliox 15% este compus din: 15% oxigen și 85% heliu. Participația volumică

$$\text{a heliului: } r_{He} = \frac{CHe}{100} = \frac{85}{100} = 0.85.$$



Presiunea absolută la $p_H=290\text{fsw}$ este:

$$p_a = \frac{p_H}{33} + 1 = \frac{290}{33} + 1 = 8.8 + 1 = 9.8\text{bar}$$

Presiunea parțială a heliului din amestec este:

$$p_{pHe} = r_{He} \cdot p_a = 0.85 \cdot 9.8 = 8.3\text{bar} = 8.3 \cdot 33 \cong 274\text{fsw}$$

Se va alege din tabelul US Navy (US Navy Diving Manual, pag. 12-37) profilul decompresiei corespunzător $p_{pHe} = 280\text{fsw}$.

7. Enunț

O scufundare este planificată la 155 fsw utilizând un amestec de 18%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie US Navy în funcție de presiunea parțială a heliului va fi utilizată?

Rezolvare

Amestecul heliox 18% este compus din: 18% oxigen și 82% heliu. Participația volumică a heliului: $r_{He} = \frac{CHe}{100} = \frac{82}{100} = 0.82$.

Presiunea absolută la $p_H=155\text{fsw}$ este:

$$p_a = \frac{p_H}{33} + 1 = \frac{155}{33} + 1 = 4.7 + 1 = 5.7\text{bar}$$

Presiunea parțială a heliului din amestec este:

$$p_{pHe} = r_{He} \cdot p_a = 0.82 \cdot 5.7 = 4.67\text{bar} = 4.67 \cdot 33 \cong 154\text{fsw}$$

Se va alege din tabelul US Navy (US Navy Diving Manual, pag. 12-33) profilul decompresiei corespunzător $p_{pHe} = 160\text{fsw}$.

8. Enunț

O scufundare este planificată la 50 msw utilizând un amestec de 10%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie US Navy în funcție de presiunea parțială a heliului va fi utilizată?

Rezolvare

Amestecul heliox 10% este compus din: 10% oxigen și 90% heliu. Participația volumică a heliului: $r_{He} = \frac{CHe}{100} = \frac{90}{100} = 0.9$.

Presiunea absolută la $p_H=50\text{msw}$ este:

$$p_a = \frac{p_H}{10} + 1 = \frac{50}{10} + 1 = 5 + 1 = 6\text{bar}$$

Presiunea parțială a heliului din amestec este:

$$p_{pHe} = r_{He} \cdot p_a = 0.9 \cdot 6 = 5.4\text{bar} = 5.4 \cdot 10 = 54\text{msw} = 54 \cdot 3.28083 \cong 177\text{fsw}$$

Se va alege din tabelul US Navy profilul decompresiei corespunzător $p_{pHe} = 180\text{fsw}$.

9. Enunț

O scufundare este planificată la 100 msw utilizând un amestec de 15%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie USNavy, în funcție de presiunea parțială a heliului, va fi utilizată?

Rezolvare

Amestecul heliox 15% este compus din: 15% oxigen și 85% heliu. Participația volumică

$$a \text{ heliului: } r_{He} = \frac{CHe}{100} = \frac{85}{100} = 0.85$$

Presiunea absolută la $p_H=100\text{msw}$ este:

$$p_a = \frac{p_H}{10} + 1 = \frac{100}{10} + 1 = 10 + 1 = 11\text{bar}$$

Presiunea parțială a heliului din amestec este:

$$p_{pHe} = r_{He} \cdot p_a = 0.85 \cdot 11 = 9.35\text{bar} = 9.35 \cdot 10 = 93.5\text{msw} = 93.5 \cdot 3.28083 \cong 307\text{fsw}$$

Se va alege din tabelul US Navy profilul decompresiei corespunzător $p_{pHe} = 310\text{fsw}$.

10. Enunț

O presurizare pentru scufundare în saturație este abandonată la 70 msw, când p_{pox} este de 400 mbar. Aveți la dispoziție următoarele tabele pentru scufundări unitare la:

- 78 msw utilizând un amestec de 18%;
- 80 msw utilizând un amestec de 16%;
- 82 msw utilizând un amestec de 16%.

Întrebare

Care este tabelul adecvat pentru decompresia scafandrilor?

Rezolvare

Presurizarea pentru saturația întreruptă la 70msw s-a făcut cu $v=10\text{m/min}$ [Degeratu M., 1998]. În acest caz timpul de coborâre este:

$$\tau_c = \frac{H_0}{v} = \frac{70}{10} = 7\text{min}$$

În tabelele US Navy [US Navy, 2017], viteza de coborâre este

$$v = 23\text{m/min} \rightarrow \tau_c = \frac{H_0}{v} = \frac{70}{23} = 3\text{min}.$$

Deoarece nu s-a ajuns la saturație, poate fi considerată o scufundare unitară cu expunere excepțională ($H_0 > 60\text{m}$) și cu durata scufundării 10min sau 5min, în funcție de rata coborârii. Dintre tabelele puse la dispoziție tabelul **a** are adâncimea de scufundare cea mai apropiată de cea reală. În același timp este foarte importantă presiunea parțială a oxigenului care nu trebuie să depășească $p_{pox} \leq 1600\text{mbar}$, pentru a nu intra în hiperoxie. Se cunoaște presiunea parțială de oxigen la momentul întreruperii saturației:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_a = 400\text{mbar} = 0.4\text{bar}$$

$$\text{Pentru } p_H = 70\text{msw} \rightarrow p_a = \frac{p_H}{10} + 1 = 7 + 1 = 8\text{bar}$$

Se calculează participația volumică a oxigenului r_{ox} :

$$0.4\text{bar} = r_{ox} \cdot 8 \rightarrow r_{ox} = \frac{0.4}{8} = 0.05 \rightarrow C_{ox} = 5\%$$

Calculăm presiunile parțiale de oxigen pentru toate cele trei tabele puse la dispoziție.



$$a. \quad p_H = 78\text{msw} \rightarrow p_a = \frac{p_H}{10} + 1 = 7.8 + 1 = 8.8\text{bar} \text{ și } C_{ox} = 18\% \rightarrow r_{ox} = 0.18$$

Presiunea parțială de oxigen este:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_a = 0.18 \cdot 8.8 = 1584\text{mbar} < 1600\text{mbar} .$$

$$b. \quad p_H = 80\text{msw} \rightarrow p_a = \frac{p_H}{10} + 1 = 8 + 1 = 9\text{bar} \text{ și } C_{ox} = 16\% \rightarrow r_{ox} = 0.16$$

Presiunea parțială de oxigen este:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_a = 0.16 \cdot 9 = 1440\text{mbar} < 1600\text{mbar} .$$

$$c. \quad p_H = 82\text{msw} \rightarrow p_a = \frac{p_H}{10} + 1 = 8.2 + 1 = 9.2\text{bar} \text{ și } C_{ox} = 16\% \rightarrow r_{ox} = 0.16$$

Presiunea parțială de oxigen este:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_a = 0.16 \cdot 9.2 = 1472\text{mbar} < 1600\text{mbar} .$$

Tabelul adecvat pentru decompresie este tabelul a, deoarece are adâncimea cea mai apropiată de cea reală, presiunea parțială de oxigen este cea mai mare dar nu depășește valoarea critică de hiperoxie. Se alege concentrația cea mai mare de oxigen admisibilă, astfel încât participația gazului inert fiind mai mică, acesta se elimină mai repede și se scurtează decompresia.

11. Enunț

Un scafandru face o scufundare cu aer, cu alimentare de la suprafață la adâncimea de 46m. Timpul de lucru planificat era de 25min, dar a fost depășit cu 10 min. Echipa de suprafață dispune de 2 tabele de decompresie:

- Tabel pentru aer cu adâncimea de 45m și durata scufundării de 30min.
- Tabel pentru aer cu adâncimea de 48m și durata scufundării de 30min.

Întrebare

Care este tabelul adecvat pentru decompresia scafandrului? Explicați procedura.

Rezolvare

Scufundarea executată la 46m are timpul de coborâre

$$\tau_c = \frac{H}{v} = \frac{46}{10} = 4.6\text{min}$$

Durata reală a scufundării este

$$\tau_s = \tau_c + 25 + 10 = 39.6\text{min} = 39\text{min}36\text{s} > 30\text{min}$$

Decompresia se va face cu tabelul b, deoarece adâncimea reală majorată la multiplul de 3 este 48m. Durata scufundării este mai mare decât cea din tabel, de aceea scafandrul va fi transferat în chesonul de tratament, imediat după ieșirea la suprafață.

3.3. Probleme propuse

1. Enunț

Un scafandru autonom execută o scufundare la 32 m, Coborârea a durat 4 minute și timpul de fund a fost 30 min.

Întrebări

- Verificați durata totală a scufundării. (R: 29min48s)
- Cum se face revenirea la suprafață?

2. Enunț

O echipă de scafandri face o scufundare de antrenament în cheson cu amestec aer, la 40m. Presurizarea a durat 5 minute și timpul de fund a fost 1 oră.

Întrebări

- a. Verificați durata totală a scufundării. (R: 116min)
- b. Cum se face revenirea la suprafață?

3. Enunț/ Întrebare

Care sunt caracteristicile decompresiei pentru o scufundare cu aer succesivă, cu timpul de suprafață 3h de la prima scufundare, la o adâncime de 25m și durata de 50min, dacă prima scufundare s-a făcut la 35m, timp de 30min? (R: 42min24s)

4. Enunț/ Întrebare

Care sunt caracteristicile decompresiei pentru o scufundare cu aer, succesivă, cu timpul de suprafață 2h și 30min de la prima scufundare, la o adâncime de 35m, cu durata de 30min, dacă prima scufundare s-a făcut la 38m, timp de 20min și dacă se respiră oxigen între cele două scufundări? (R: 21min).

5. Enunț/ Întrebare

Cât durează și cum se face decompresia pentru o scufundare cu aer efectuată într-un lac de munte aflat la 800m altitudine, cunoscând adâncimea 25m și durata scufundării 1h30min? (R: 1h23min48s).

6. Enunț

O scufundare este planificată la presiunea manometrică 180 fsw, utilizând un amestec de 10%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie USNavy în funcție de presiunea parțială a heliului va fi utilizată? (Tabelele merg pentru $p_{pHe} = 60fsw$ până la $p_{pHe} = 360fsw$ în pași de 10 fsw).

(R: Tabela US Navy pentru $p_{pHe} = 200fsw$).

7. Enunț

O scufundare este planificată la 200 fsw, utilizând un amestec de 5%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie US Navy în funcție de presiunea parțială a heliului va fi utilizată? (R: Tabela US Navy pentru $p_{pHe} = 220fsw$).

8. Enunț

O scufundare este planificată la presiunea manometrică de 90 msw, utilizând un amestec de 10%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie USNavy în funcție de presiunea parțială a heliului va fi utilizată? (R: Tabela US Navy pentru $p_{pHe} = 300fsw$).

**9. Enunț**

O scufundare este planificată la presiunea manometrică de 70 msw, utilizând un amestec de 15%.

Întrebare

Care tabelă de decompresie USNavy în funcție de presiunea parțială a heliului va fi utilizată? (R: Tabela US Navy pentru $p_{pHe} = 230 fsw$).

10. Enunț

O presurizare pentru scufundare în saturație este abandonată la presiunea manometrică de 90 msw, când p_{pox} este de 450 mbar. Aveți la dispoziție următoarele tabele pentru scufundări unitare la:

- 90 msw utilizând un amestec de 17%;
- 93 msw utilizând un amestec de 15%;
- 90 msw utilizând un amestec de 20%.

Întrebare

Care este tabelul adecvat pentru decompresia scafandrilor? (R: tabelul b)

11. Enunț

Un scafandru face o scufundare cu alimentare de la suprafață la presiunea manometrică de 40msw. Timpul de lucru planificat era de 20min, dar a fost depășit cu 10min. Echipa de suprafață dispune de 2 tabele de decompresie:

- Tabel pentru aer cu adâncimea de 39m și durata scufundării de 30min.
- Tabel pentru aer cu adâncimea de 42m și durata scufundării de 30min.

Întrebare

Care este tabelul adecvat pentru decompresia scafandrului? Explicați procedura.

(R: tabelul b)

Utile

„Ghidul scafandrului autonom”, A. Petru, M. Degeratu, S. Ioniță, Olimp-Press, București, 1992

Link-uri cu tabele:

- [www.navesea.navy.mil/Documents/U.S. NavyDiving Manual REVISION 7](http://www.navesea.navy.mil/Documents/U.S.%20NavyDiving%20Manual%20REVISION%207)
- [www.centruldescafandri.ro/biblioteca/Manualul scafandrului](http://www.centruldescafandri.ro/biblioteca/Manualul%20scafandrului)

CAPITOLUL 4 TRANSFERUL TERMIC

Anca CONSTANTIN

4.1. Căldura

4.1.1. Căldura sensibilă și căldura latentă

Căldura este o formă de energie transferată, deci ea este întotdeauna asociată unui proces. În mod natural, transferul de căldură apare între două corpuri sau între două zone ale aceluiași corp aflate la temperaturi diferite. Transferul continuă până când temperaturile devin egale.

Între un scafandru și mediul ambiant (apa, aerul) se poate realiza un schimb de căldură, pus în evidență prin modificarea temperaturii corpului uman, temperatura mediului fiind considerată constantă. În acest caz, valorile până la care poate ajunge temperatura corpului uman sunt limitate, pentru a evita hipotermia sau, după caz, hipertermia. În mod natural, căldura se transferă de la corpul cu temperatura mai mare la corpul cu temperatura mai scăzută.

Căldura se va nota cu Q și se măsoară în Joule, [J], în Sistemul Internațional de Mărimi și Unități de Măsură (SI).

Experimental s-a constatat că energia termică schimbată este proporțională cu masa sistemului și cu variația temperaturii sale:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad [J] \quad (4.1)$$

unde : m – masa corpului, [Kg];

$\Delta t = t_f - t_i$ – diferența între temperatura finală și cea inițială a corpului [K sau °C]

c – căldura specifică (căldura masică), [$J/kg \cdot ^\circ C$].

Căldura schimbată între un corp și mediul exterior, într-un proces termodinamic în cursul căruia temperatura corpului se modifică, fără să se schimbe starea de agregare a corpului, se numește **căldură sensibilă** și se exprimă cu relația (4.1).

Prin convenție, căldura primită de un corp, în cursul unui proces termodinamic, este considerată pozitivă (conduce la creșterea temperaturii corpului, $t_f > t_i$ deci $\Delta t > 0$). Căldura cedată este considerată negativă.

Căldura specifică reprezintă cantitatea de căldură necesară unității de masă dintr-o substanță pentru a-și varia temperatura cu $1^\circ C$. Se notează cu c și se măsoară în [$J/kg \cdot ^\circ C$]. Dacă pentru solide și pentru lichide fiecare substanță are o singură valoare a căldurii specifice, pentru gaze este important și procesul prin care se realizează schimbul de căldură între acea substanță și mediu. Gazele prezintă două valori ale căldurii specifice:

- c_p - căldură specifică izobară, [$J/kg \cdot ^\circ C$];
- c_v - căldură specifică izocoră, [$J/kg \cdot ^\circ C$].



În anumite condiții de presiune și temperatură, căldura absorbită/evacuată de către un corp poate conduce la schimbarea stării lui de agregare. În acest caz, ea se numește **căldură latentă**.

Vaporizarea apei, spre exemplu, se petrece prin absorbția căldurii latente din mediul înconjurător și ea se produce izobar. Vaporizarea este un fenomen reversibil, astfel că fenomenul invers, cel de condensare, are loc tot izobar, prin evacuarea căldurii latente, către mediul înconjurător. Căldura latentă de vaporizare este egală cu cea de condensare, la o presiune dată.

Dacă se notează cu l_v [J/kg] căldura latentă specifică de vaporizare, atunci fluxul termic necesar pentru vaporizarea unui debit masic $\dot{m}$ [kg/s] de apă va fi:

$$Q = \dot{m} \cdot l_v \quad [J] \quad (4.2)$$

Vaporizarea are loc la o anumită temperatură, numită temperatură de saturație, t_s , care depinde de presiunea la care are loc fenomenul, numită presiune de saturație p_s . Valorile acestor perechi (p_s ; t_s) sunt date tabelar în literatura tehnică.

4.1.2. Fluxul termic

Deseori, interesează nu numai cantitatea de căldură transferată, ci și timpul în care are loc acest transfer.

Fluxul termic (debitul de căldură) se notează $\dot{Q}$ și se măsoară în [W].

Fluxul termic reprezintă cantitatea de căldură transferată în unitatea de timp, printr-o suprafață oarecare. Valoarea medie a fluxului este:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{\tau}, [W] \quad (4.3)$$

τ [s] - timpul

Dacă fluxul termic se propagă printr-o suprafață, A , se utilizează și noțiunea de **flux termic unitar**, adică acea cantitate de căldură transferată în unitatea de timp, printr-o suprafață unitară:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}, [W/m^2] \quad (4.4)$$

Fluxul de căldură transportat de un agent termic care nu-și schimbă starea de agregare

Considerând ecuația calorică, în care ambii membri se raportează la timp, se obține debitul de căldură transportat de un fluid în mișcare:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t \quad (4.5)$$

$\dot{m}$ - debitul masic al fluidului, [kg/s];

c - căldura specifică a fluidului, [$kJ/(kg \cdot grad)$];

$\Delta t = t_f - t_i$ variația temperaturii, t_i temperatura inițială și t_f temperatura finală a fluidului, [$^{\circ}C$].

Fluxul de căldură transportat de un agent termic care își schimbă starea de agregare

Fluxul termic necesar unui debit de fluid $\dot{m}$ [kg/s] pentru a vaporiza este egal cu:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot l_v \quad (4.6)$$

Același flux termic trebuie eliminat, în cazul condensării, deci va fi un flux negativ.

4.1.3. Aerul umed

Aerul umed este un amestec format din aer uscat și vaporii de apă, amestec în care componentii nu interacționează chimic și sunt considerați gaze perfecte. Presiunea p_{am} a aerului umed este dată de relația:

$$p_{am} = p_a + p_v \quad (4.7)$$

p_a – presiunea parțială a aerului,

p_v – presiunea parțială a vaporilor.

Presiunea parțială a unui gaz i , dintr-un amestec, este presiunea pe care ar avea-o acest gaz dacă ar ocupa singur incinta în care se află amestecul, la aceeași temperatură.

În cazul amestecurilor de gaze, **legea lui Dalton** spune că: *presiunea amestecului este egală cu suma presiunilor parțiale ale gazelor componente, la aceeași temperatură.*

Având în vedere faptul că presiunea parțială a vaporilor de apă conținuți în mod uzual în aerul atmosferic este foarte scăzută, vaporii de apă din aer sunt *supraîncălziți*.

Umiditatea absolută, x reprezintă masa de vaporii de apă dintr-un kilogram de aer uscat :

$$x = \frac{m_v}{m_a}, \left[\frac{kg_{vaporii \ H_2O}}{kg_{aer \ uscat}} \right] \quad (4.8)$$

m_v - masa de vaporii de apă, $[kg_{vaporii \ H_2O}]$,

m_a - masa de aer uscat, $[kg_{aer \ uscat}]$

Conform legii lui Dalton rezultă:

$$x = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \frac{p_v}{p_{am} - p_v} \quad (4.9)$$

Umidificarea aerului umed, la o anumită valoare a temperaturii, poate continua până când presiunea parțială a vaporilor atinge valoarea presiunii de saturație corespunzătoare acelei temperaturi. Atunci **aerul este saturat**. Aerul saturat conține cantitatea maximă de vaporii de apă, pe care o poate conține fără să apară condensarea, la temperatura dată.

Exemplu: aerul umed dintr-o incintă, aflat la temperatura de $22^\circ C$, conține vaporii de apă cu presiunea parțială de $21mbar$. Aerul umed nu este saturat, deoarece presiunea de saturație corespunzătoare temperaturii de $22^\circ C$ este $p_s = 26,42mbar$. Asta înseamnă că putem introduce în incintă vaporii de apă până când presiunea parțială a vaporilor devine $26,42mbar$ și în acest moment aerul umed cu temperatura de $22^\circ C$ este **saturat**. Un aport ulterior de vaporii determină condensarea vaporilor în exces.

Căldura specifică izobară a aerului umed, c_p , este cantitatea de căldură necesară unui kilogram de aer umed pentru a-și varia temperatura cu $1^\circ C$. Ea se calculează ca valoare medie ponderată a căldurilor specifice pentru aer uscat și pentru vaporii de apă. Se cunoaște că pentru domeniul de temperatură: $-20^\circ C \div 80^\circ C$, se pot considera următoarele valori medii:

$c_{p \ a} = 1 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$, căldura specifică a aerului uscat din **ANEXE Tabelul 6**;

$c_{p \ v} = 1,86 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$, căldura specifică a vaporilor de apă din **ANEXE Tabelul 6**.



4.2. Modurile elementare de transfer de căldură

Se disting trei moduri elementare de transfer de căldură: conducția, convecția și radiația. În practică, aceste moduri pot apărea separat sau combinate în procese complexe. Cunoașterea acestora ne permite să intervenim pentru intensificarea sau diminuarea cantitativă a transferului.

4.2.1. Conducția termică

Conducția reprezintă fenomenul de transfer de căldură efectuat între două corpuri diferite aflate în **contact fizic direct** (două zone ale aceluiași corp) și între care există o diferență de temperatură. Fenomenul nu implică transport de masă, de aceea conducția este caracteristică pentru corpurile solide. Conducția apare și în corpuri fluide aflate în repaus, dar imobilitatea acestora în prezența unei diferențe de temperatură este mai puțin probabilă. De aceea, transferul conductiv în corpuri fluide este însoțit de convecție și radiație.

Fluxul termic transferat prin conducție, printr-un perete solid, ale cărui fețe sunt plane și au temperaturi diferite este dat de relația:

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{t_o - t_1}{\frac{\delta}{\lambda}} \quad [W] \quad (4.10)$$

$\dot{Q}$ – debitul de căldură transferat prin conducție [W];

λ – coeficient de conductivitate termică al materialului peretelui [$W/m \cdot ^\circ C$];

δ - grosimea peretelui, [m];

A – aria suprafeței prin care se realizează transferul de căldură, [m^2];

$\Delta t = t_o - t_1$ - diferența de temperatură dintre fața caldă și cea rece a peretelui, [$^\circ C$];

$R = \frac{\delta}{\lambda}$ [$^\circ C \cdot m^2/W$]. – rezistența termică conductivă a peretelui.

S-a considerat că fluxul de căldură se propagă numai în lungul axei Ox și peretele nu are surse interioare de căldură.

Fluxul termic transmis prin conducție între două suprafețe paralele ale unui solid, sau fluid în repaus, este direct proporțional cu aria suprafețelor, cu Δt și cu λ . Fluxul termic scade cu cât corpul are o rezistență termică mai mare. Rezistența conductivă este cu atât mai mare cu cât grosimea peretelui este mai mare și coeficientul de conductivitate termică λ , este mai redus.

Relația (4.10) devine:

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{t_o - t_1}{R} \quad [W] \quad (4.11)$$

4.2.2. Convecția termică

Convecția este fenomenul de transfer termic realizat prin transfer de masă, între zone cu temperaturi diferite. Fenomenul presupune mișcarea mediului fluid. Fenomenul se manifestă la suprafața de separație a fazelor (solid – lichid; solid – gaz; lichid – gaz).

Convecția poate fi de două feluri:

a) **Convecție naturală sau liberă** în care deplasarea fluidului este provocată de o diferență mică de presiune/ de densitate, care, la rândul ei, este produsă de o diferență de temperatură.

b) **Convecția forțată**, în care deplasarea fluidului este produsă de o diferență mare de presiune generată de echipamente ca: pompe, ventilatoare și compresoare.

Expresia matematică a debitului de căldură transmis prin convecție, printr-o suprafață de separație care are coeficientul de convecție termică α , este stabilită de Newton:

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{t_s - t_f}{\frac{1}{\alpha}} \quad (4.12)$$

$\dot{Q}$ - debitul de căldură transferat prin convecție [W];

A - aria suprafeței prin care se realizează transferul de căldură [m^2];

$\Delta t = t_s - t_f$ - diferența de temperatură dintre faze [$^{\circ}C$];

α - coeficientul de transfer de căldură prin convecție [$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$].

$R = \frac{1}{\alpha}$, [$^{\circ}C \cdot m^2/W$] - rezistența termică convectivă a suprafeței.

α este influențat de proprietățile fluidului (densitate, căldură specifică), de regimul de curgere a acestuia și de natura și orientarea suprafeței peretelui față de direcția de curgere. În regimul laminar de curgere, deci la viteze reduse ale fluidului, coeficientul de convecție termică este redus. Coeficientul de convecție crește pe măsură ce regimul de curgere devine turbulent.

4.2.3. Radiația termică

Radiația este procesul prin care căldura este transferată de la un corp cu temperatura ridicată la un corp cu temperatura coborâtă, ele fiind separate în spațiu printr-un mediu transparent la radiații termice. Ea are drept suport radiațiile electromagnetice de tip infraroșu. În activitatea în imersiune corpurile au temperaturi scăzute, de aceea radiația poate fi neglijată.

4.3. Procese complexe de transfer de căldură

Procesele de transfer de căldură în activitatea de scufundare sunt procese complexe, în care, de obicei, apar simultan conducția și convecția.

Dacă transferul de căldură se realizează printr-o suprafață, se utilizează *coeficientul global de transfer termic*, U , [$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$], cel care ia în considerare ambele moduri elementare de căldură. Spre exemplificare, să considerăm că transferul are loc între două medii fluide, separate prin suprafața A . Dacă sarcina este $\dot{Q}$, avem relația:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta t_m \quad (4.13)$$

Δt_m - diferența medie de temperatură dintre cele două medii fluide.

Teste

T1. Care este modul de transfer de căldură care implică transfer de masă? (*R: convecția*)

T2. Când este mai intens transferul convectiv la suprafața exterioară a costumului de protecție termică a unui scafandru aflat în imersiune: atunci când este în repaus sau atunci când înoată? De ce? (*R: Atunci când înoată. Fluxul termic convectiv la suprafața de separație dintre costum și apa de mare este mai mare din cauza vitezei relative a apei față de suprafața costumului.*)

T3. O bună izolație termică, în cazul proceselor de conducție și convecție, va avea:

a) λ mic și α mic;



- b) λ mic și α mare;
 c) λ mare și α mare.

(R: a)

4.4. Încălzirea și răcirea unui corp cu temperatură uniformă

Un corp cu temperatură uniformă (aceeași temperatură în toată masa corpului), poate fi considerat ca model termodinamic.

Se consideră un astfel de corp cu temperatura uniformă t și volumul V , amplasat într-un mediu exterior, cu temperatură constantă t_e . Coeficientul de transfer termic prin suprafață este presupus constant și de egală valoare în toate punctele suprafeței A . Atât densitatea, ρ , cât și căldura specifică la presiune constantă, c_p , sunt funcții continue și uniforme. Corpul considerat nu are surse interioare de căldură. În aceste condiții, bilanțul termic exprimă faptul că variația căldurii acumulate în corp este egală cu fluxul termic ce străbate suprafața A :

$$dQ = -U \cdot A \cdot (t - t_e) dt \quad (4.14)$$

$$d(m \cdot c_p \cdot t) = -U \cdot A \cdot (t - t_e) dt$$

$$d(\rho \cdot V \cdot c_p \cdot t) = -U \cdot A \cdot (t - t_e) dt$$

m -masa corpului, $m = \rho \cdot V$, [kg],

V -volumul corpului, [m^3],

ρ -densitatea corpului, [kg/m^3],

t -temperatura corpului, [$^{\circ}C$],

t_e -temperatura exterioară, [$^{\circ}C$],

τ -timpul, [s],

U -coeficientul global de transfer termic prin suprafața A , [$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$]

Cu notația:

$$K = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p}{U \cdot A} \quad (4.15)$$

Soluția ecuației este:

$$t - t_e = (t_0 - t_e) \exp\left(-\frac{\tau}{K}\right) \quad (4.16)$$

Egalitatea este valabilă atât pentru încălzire, cât și pentru răcire.

Expresia permite calculul duratei de timp, τ , necesară pentru ca acel corp să atingă temperatura finală, t_f .

$$\tau = K \cdot \ln \frac{t_0 - t_e}{t_f - t_e} \quad (4.17)$$

Variația în timp a temperaturii este reprezentată grafic în Fig.4.1, atât pentru cazul încălzirii, cât și pentru cazul răcirii unui corp cu temperatură uniformă.

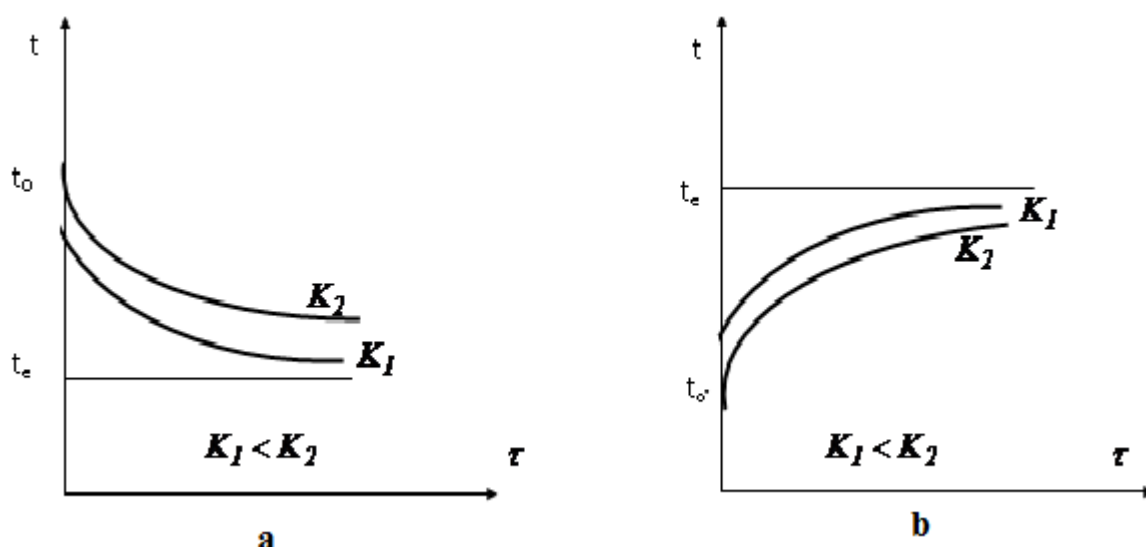


Fig. 4.1 Răcirea (a) și încălzirea (b) corpurilor cu temperatură uniformă, la două valori diferite ale factorului de timp, K

4.5. Securitatea și confortul termic al scafandrilor

În imersiune, un scafandru pierde mai multă căldură decât în timpul petrecut în atmosferă uscată, deoarece apa are capacitate calorică mult mai mare decât aerul. În pregătirea unei intervenții sub apă, trebuie avută în vedere protecția termică necesară, în funcție de temperatura apei mării, durata estimată a scufundării, adâncimea de scufundare, amestecul respirator care urmează să fie folosit. În această etapă pregătitoare trebuie ales costumul de scufundare cel mai potrivit și trebuie verificat dacă durata de scufundare, în condițiile specificate, asigură securitatea și confortul termic al scafandrilor.

Variația temperaturii corpului uman, în funcție de durata imersiunii, poate fi estimată în procedura de pregătire a scufundării, pornind de la ecuația de bilanț termic al unui scafandru aflat în repaus (4.18).

$$mc_b \frac{dt}{dt} = \dot{Q}_m - \dot{Q}_c - \dot{Q}_r \quad (4.18)$$

m [kg] - masa scafandrilor

$c_b = 3470 J / (kg \cdot K)$ - căldura specifică a corpului

τ [s] - timpul

$\dot{Q}_m$ [W] - fluxul de căldură metabolic produs de organism

t [°C] - temperatura internă a corpului

$\dot{Q}_c$ [W] - fluxul de căldură pierdut cutanat

$\dot{Q}_r$ [W] - fluxul de căldură pierdut la nivel respirator

Din ecuația (4.18) se observă că, temperatura corpului uman scade atunci când fluxul termic evacuat la nivelul pielii, $\dot{Q}_c$ și cel evacuat la nivelul sistemului respirator, $\dot{Q}_r$, însumate, depășesc fluxul de căldură produs prin metabolismul bazal, $\dot{Q}_m$.



Cunoscând particularitățile fizice și fiziologice ale unui scafandru: înălțimea, vârsta, greutatea, debitul ventilator, precum și caracteristicile fizice ale apei de mare în care urmează a se scufunda, toți termenii din ecuația de bilanț termic (4.18) se pot determina, deci se poate estima temperatura corpului după un anumit timp de scufundare, τ .

Pentru rezolvarea ecuației, se calculează fiecare termen al bilanțului energetic.

Fluxul metabolic termic de bază BMR[kcal] a fost determinat cunoscând faptul că un om sănătos produce în 24 de ore o cantitate de căldură dată de relația Harris-Benedict [Shepard Roy J., 2015].

$$BMR = 66 + 13.7m + 5L - 6.8 \cdot a \quad (4.19)$$

L-înălțimea scafandrului, [cm]

a-vârsta scafandrului, [ani] .

$$\dot{Q}_m = \frac{BMR \cdot 4.18 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} [W] \quad (4.20)$$

Fluxul de căldură conductiv și convectiv la nivelul pielii

$$\dot{Q}_c = \frac{t - t_a}{R} \cdot A \quad (4.21)$$

R- rezistența termică a straturilor exterioare ale corpului uman, [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$];

A- suprafața corpului uman, [m^2];

t_a -temperatura apei mării, [$^{\circ}\text{C}$];

t –temperatura internă a corpului uman, [$^{\circ}\text{C}$];

Rezistența termică R se poate calcula în funcție de numărul, grosimea și natura straturilor. care protejează termic corpul uman.

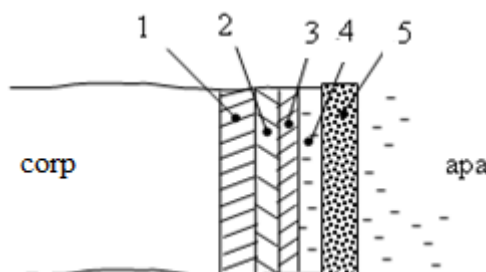


Fig. 4.2 Straturile izolatoare ale corpului uman [Constantin A., Stanciu T., 2013].

1. grăsime subcutanată; 2. dermă; 3. epidermă; 4. film de apă staționar; 5. Neopren

În Fig. 4.2 este prezentat un model de calcul în care corpul uman este protejat de cinci straturi, între care ultimele două sunt reprezentate de filmul subțire de apă de mare (situat între piele și costum) și costumul umed din neopren.

Fluxul termic pierdut de scafandru la nivelul sistemului respirator, $\dot{Q}_r$

La nivelul sistemului respirator, se disting două moduri de pierdere a căldurii:

$$\dot{Q}_r = \dot{Q}_x + \dot{Q}_s \quad (4.22)$$

$\dot{Q}_x$ - fluxul termic pentru umidificarea gazului respirat. Se consideră că scafandrul primește din butelie gaz uscat. Căldura corespunzătoare acestui flux este o căldură latentă.

$\dot{Q}_s$ - fluxul termic sensibil pentru încălzirea gazului inhalat la temperatura corpului. Căldura corespunzătoare acestui flux este o căldură sensibilă.

Considerând că, în timpul unui inspir, gazul respirator înglobează cantitatea x de vapori de apă, se poate scrie relația care dă fluxul termic pierdut prin umidificarea gazului respirator, relație dependentă de presiune.

$$\dot{Q}_x = l_{(p)} \rho_{(p)} x_{(p)} \dot{V}_{(p)} \quad (4.23)$$

$l_{(p)} [J / kg]$ - căldura specifică latentă de vaporizare

$\rho_{(p)} [kg / m^3]$ - densitatea gazului

$x_{(p)} [kg / kg]$ - umiditatea absolută a amestecului respirator

$\dot{V}_{(p)} [m^3 / s]$ - debitul volumic respirator

Fluxul termic pierdut prin încălzirea gazului respirator, $\dot{Q}_s$, se poate exprima ca funcție de presiune, folosind ecuația calorică.

$$\dot{Q}_s = \rho_{(p)} c \dot{V}_{(p)} (t - t_a) \quad (4.24)$$

$c [J / kgK]$ - căldura specifică a gazului la presiune constantă

Ecuația (4.18) se scrie explicit

$$mc_b \frac{dt}{dt} = \dot{Q}_m - \dot{Q}_c - \dot{Q}_r$$

$$mc_b \frac{dt}{dt} = \dot{Q}_m - \frac{t - t_a}{R} \cdot A - l_{(p)} \rho_{(p)} x_{(p)} \dot{V}_{(p)} - \rho_{(p)} c \dot{V}_{(p)} (t - t_a) \quad (4.25)$$

Utilizând notațiile:

$$a = \frac{\dot{Q}_m - l_{(p)} \rho_{(p)} x_{(p)} \dot{V}_{(p)}}{mc_b} \quad (4.26)$$

$$b = \frac{\frac{A}{R_{(p)}} + \rho_{(p)} c \dot{V}_{(p)}}{m \cdot c_b} \quad (4.27)$$

Cu condiția inițială ca la $\tau_0 = 0$ să avem $t_{(0)} = 37^\circ C$, rezultă soluția ecuației de bilanț termic al scafandruului [Constantin A, Stanciu T., 2013]:

$$t_{(\tau)} = t_a + \frac{a}{b} + \left(t_0 - t_a - \frac{a}{b} \right) e^{-b \cdot \tau} \quad (4.28)$$

În urma validării experimentale a ecuației pentru scufundări până la 60m adâncime, în mediu hiperbar umed, atât în cazul scufundărilor unitare cu amestec respirator aer, cât și în cazul scufundărilor în saturație, cu amestec respirator heliox 5/95, pentru scafandrii în staționare, a rezultat un factor de corecție $C [^\circ C]$ care se scade din temperatura teoretică. Factorii de corecție recomandați sunt: [Stanciu T., 2018]

- $c_{aer} = 0,5 [^\circ C]$
- $c_{heliox} = 1 [^\circ C]$

Ecuația (4.28) devine:



$$t_{(\tau)} = t_a + \frac{a}{b} + \left(t_0 - t_a - \frac{a}{b}\right) e^{-b\tau} - C \quad (4.29)$$

Determinarea aproximativă a temperaturii la care poate ajunge scafandrul este foarte importantă pentru a putea planifica scufundările și a adopta o strategie de protecție termică corespunzătoare, pasivă sau activă.

4.6. Probleme rezolvate

1. Enunț

Prin furtunul de alimentare cu apă caldă a unui costum de scufundare trece un debit masic $\dot{m} = 14 \text{ kg/min}$. Apa intră în furtun cu temperatura $t_i = 44^\circ\text{C}$ și iese din furtun (intră în costum) cu temperatura $t_f = 38^\circ\text{C}$. Căldura specifică a apei este $c = 4182 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Întrebare

Care este valoarea fluxului termic cedat de către apa din furtun?

Rezolvare

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t = \frac{14 \cdot 10^{-3}}{60} 4182 \cdot (38 - 44) = -5.85 \text{ W}$$

Observație: Semnul minus înseamnă cedarea căldurii!

2. Enunț

Un scafandru, aflat în imersiune la 10m adâncime, respiră aer uscat, livrat la presiunea mediului ambiant. Debitul respirator volumic este $\dot{V} = 1 \text{ l/s}$. Se consideră că, în timpul inspirului, aerul se saturează la temperatura corpului uman, 37°C , pentru care presiunea de saturație este $p_s = 0,0628 \text{ bar}$, iar căldura latentă specifică de vaporizare este $l_v = 2385 \text{ J/kg}$.

Întrebare

Să se estimeze fluxul termic necesar pentru aducerea aerului uscat la starea de aer saturat la temperatura corpului uman.

Rezolvare

Presiunea absolută la care se află scafandrul este $p_{am} = 2 \text{ bar}$, deci aceasta este presiunea aerului umed. Umiditatea absolută va fi:

$$x = 0,622 \frac{p_s}{p_{am} - p_s} = 0,622 \frac{0,0628}{2 - 0,0628} = 0.02 \text{ kg/kg}$$

Densitatea aerului la 37°C , la presiune normală este $\rho_N = 1,14 \text{ kg/m}^3$. La presiunea $p_{am} = 2 \text{ bar}$, la aceeași temperatură, densitatea devine:

$$\frac{\rho_0}{p_N} = \frac{\rho_2}{p_{am}}$$

$$\rho_2 = \frac{p_{am}}{p_N} \rho_0 = \frac{2}{1} 1,14 = 2.28 \text{ kg/m}^3$$

Debitul masic de aer uscat este:

$$\dot{m}_a = \rho_2 \cdot \dot{V}$$

Deci, debitul masic de vapori de apă va fi:

$$\dot{m} = \rho_2 \cdot \dot{V} \cdot x$$

Rezultă fluxul de căldură latentă:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot l_v = \rho_2 \cdot \dot{V} \cdot x \cdot l_v$$

$$\dot{Q} = 2.28 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.02 \cdot 2\,385\,000 = 109\,W$$

3. Enunț/Întrebare

Să se calculeze căldura specifică a aerului umed, la presiune normală și temperatura de 20°C. Umiditatea absolută a aerului umed este: $x = 0.005$ [$kg_{vapori\ H_2O}/kg_{aer\ uscat}$]

Rezolvare

Pentru amestec (aer umed), căldura specifică se obține cu relația mediei ponderate cu masa:

$$c_{p\ am} = \frac{c_{p\ a} + x \cdot c_{p\ v}}{1+x} \quad kJ/kg \cdot ^\circ C$$

$$c_{p\ am} = \frac{1 + 0.005 \cdot 1.84}{1 + 0.005} = 1.004 \quad kJ/kg \cdot ^\circ C$$

4. Enunț

Un scafandru, aflat la adâncimea de 12m, respiră aer cu debitul $\dot{V} = 0,5$ l/s. Densitatea aerului respirator, la această adâncime și temperatura corpului uman $t = 37^\circ C$, densitatea este $\rho = 2.46$ kg/m³. Temperatura apei mării este $t_a = 21^\circ C$.

Întrebare

Ce flux termic este necesar pentru a încălzi aerul inspirat, dacă se consideră că aerul se încălzește de la temperatura mediului (apei de mare) până la cea a corpului uman?

Rezolvare

Fluxul termic pentru încălzirea aerului:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_{p\ am} \cdot (t - t_a) = \rho \cdot \dot{V} \cdot c_{p\ am} \cdot (t - t_a)$$

Căldura specifică a aerului saturat este dată de relația:

$$c_{p\ am} = \frac{c_{p\ a} + x \cdot c_{p\ v}}{1+x}$$

Se află conținutul de umiditate al aerului saturat la $t = 37^\circ C$, considerând presiunea vaporilor saturați $p_s = 0.0627$ bar, așa cum este dată în ANEXE, Tabelul 7.

$$x = 0.622 \frac{p_s}{p_{am} - p_s} = 0.622 \frac{0.0627}{2.2 - 0.0594} = 0.01825 \quad kg/kg$$

$$c_{p\ am} = \frac{1 + 0.01825 \cdot 1.86}{1 + 0.01825} = 1.015 \quad kJ/kg \cdot ^\circ C$$

$$\dot{Q} = 2.46 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 1015 \cdot (37 - 21) = 19.98\,W$$

5. Enunț

Prin suprafața exterioară a costumului unui scafandru, cu aria de $2m^2$, se transferă un flux termic conductiv de $\dot{Q} = 210W$. Acest flux este preluat integral, prin convecție, de apa care



curge pe această suprafață, în timp ce scafandrul înoată. Coeficientul de convecție termică corespunzător acestei suprafețe este $\alpha = 30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Întrebare

Care este temperatura apei, dacă temperatura suprafeței este de 22°C ?

Rezolvare

Dacă fluxul termic este preluat numai prin convecție, se aplică relația:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta t = \alpha \cdot A \cdot (t_s - t_{ap\tilde{a}})$$

$$t_{ap\tilde{a}} = t_s - \frac{\dot{Q}}{\alpha A} = 22 - \frac{210}{30 \cdot 2} = 18.5^\circ\text{C}$$

6. Enunț/ Întrebare

Care este coeficientul global de transfer termic, U , pentru un perete plan-paralel, dacă temperatura fluidului de la interior este $t_i = 40^\circ\text{C}$ și cea a fluidului de la exterior este $t_e = 22^\circ\text{C}$. Ambele temperaturi se consideră constante. Aria peretelui este de 1.2 m^2 , iar fluxul termic transferat este de 600 W ? Care este rezistența termică a peretelui, luând în considerare atât conducția, cât și convecția?

Rezolvare

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta t$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta t} = \frac{600}{1.2(40-22)} = 27.78 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Relația dintre coeficientul global de transfer termic și rezistența termică se observă din egalitatea:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta t = A \frac{\Delta t}{R}$$

Rezultă:

$$U = \frac{1}{R}$$

Rezistența termică va fi:

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{27.78} = 0.036 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$$

7. Enunț

O butelie de aer are perețele alcătuit din oțel cu grosimea de $\delta = 10 \text{ mm}$ și coeficientul de convecție termică $\lambda = 44 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Temperatura suprafeței interioare a peretelui buteliei este, imediat după intrarea în imersiune, $t_0 = 24^\circ\text{C}$. Temperatura apei mării este $t_e = 18^\circ\text{C}$. Peretele se consideră plan. Suprafața exterioară a peretelui are coeficientul de convecție termică $\alpha_e = 20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Întrebare

Care este valoarea fluxului termic unitar, $\dot{q}$, la începutul imersiunii?

Rezolvare

Transferul de căldură are loc sub acțiunea diferenței de temperatură între aerul din butelie și mediul exterior, pe direcția axei Ox din Fig.4.3. Deosebim:

- Transfer conductiv prin peretele solid al buteliei;
- Transfer convectiv la suprafața exterioară a buteliei, care separă peretele solid de mediul lichid (apa mării).

Energia termică se conservă, deci fluxul conductiv este egal cu cel preluat prin convecție.

$$\dot{q} = \frac{t_o - t_1}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{t_1 - t_e}{\frac{1}{\alpha_e}}$$

Pentru a elimina necunoscuta t_1 , temperatura feței exterioare a peretelui, se adună numărătorii și respectiv, numitorii.

$$\dot{q} = \frac{t_o - t_e}{\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

$$\dot{q} = \frac{24 - 18}{\frac{0.01}{44} + \frac{1}{20}} = 119.5W$$

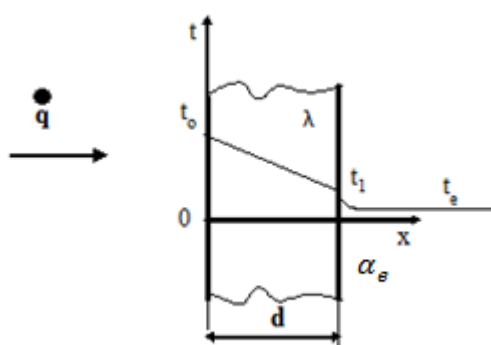


Fig. 4.3 Transferul de căldură de la butelie la apa mării [Constantin A., 2002]

8. Enunț

Se consideră că peretele buteliei din problema anterioară are deasupra un strat de piatră la interior, cu $\lambda_p = 0.8 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ și grosimea $\delta_p = 2 \text{ mm}$, așa cum e ilustrat în Fig. 4.4.

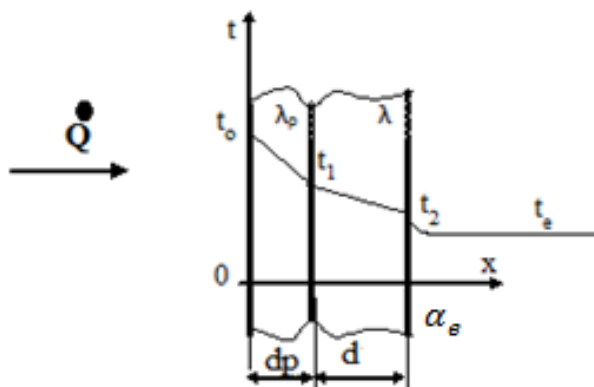


Fig. 4.4 Transferul de căldură Constantin A., 2002]

**Întrebare**

Care va fi valoarea fluxului termic unitar în acest caz, dacă celelalte mărimi rămân nemodificate?

Rezolvare

Stratul solid care se adaugă va introduce o rezistență termică suplimentară. Conservarea energiei termice ne permite să scriem egalitatea fluxurilor termice conductive, prin fiecare dintre straturile solide, cu fluxul termic convectiv:

$$\dot{q} = \frac{t_o - t_1}{\frac{\delta_p}{\lambda_p}} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{t_2 - t_s}{\frac{1}{\alpha_s}}$$

$$\dot{q} = \frac{t_o - t_s}{\frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_s}}$$

Deci, în acest caz, rezistența termică este:

$$R = \sum_{k=1}^2 \frac{\delta_k}{\lambda_k}$$

$$q = \frac{24-18}{\frac{0.01}{44} + \frac{0.002}{0.8} + \frac{1}{20}} = 113.8W$$

Observație! Relația rezistenței termice se poate generaliza pentru un perete infinit, cu n straturi paralele, scaldat de fluide pe ambele fețe. Notând cu α_i coeficientul de convecție termică la suprafața caldă a peretelui, avem:

$$R = \frac{1}{\alpha_i} + \sum_{k=1}^n \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_e} \quad (4.30)$$

9. Enunț

O conductă circulară din oțel, având diametrul exterior $d_e = 114.3 \text{ mm}$, grosimea peretelui $e = 4.5 \text{ mm}$ și lungimea $L = 2 \text{ m}$ are, la suprafață, temperatura aerului atmosferic $t_o = 22^\circ\text{C}$. Se cunosc: densitatea oțelului $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$, căldura specifică $c_p = 0.63 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, coeficientul de conducție termică $\lambda = 14.4 \text{ J/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Conducta este scufundată în apă cu temperatura $t_s = 10^\circ\text{C}$.

Întrebare

Estimați timpul în care se răcește conducta la temperatura $t_f = 11^\circ\text{C}$. Se neglijează contracția tronsonului de conductă ca urmare a scăderii temperaturii. Se va considera coeficientul global de transfer termic $U = 14.93 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, pe toată aria tronsonului cilindric.

Rezolvare

Se calculează mărimile geometrice ale tronsonului de conductă:

- *Diametrul interior:*

$$d_i = d_e - 2 \cdot e = 0.1143 - 2 \cdot 0.0045 = 0.1053 \text{ mm}$$

- *Aria totală, ca sumă a ariei laterale exterioare, cu cea interioară și cu ariile bazelor:*

$$A = A_e + A_i + 2 \cdot A_b = \pi d_e L + \pi d_i L + 2 \frac{\pi(d_e^2 - d_i^2)}{4} = 0.718 + 0.661 + 0.003$$

$$A = 1.382 \text{ m}^2$$

- *Volumul:*

$$V = A_b \cdot L = 0.0015 \cdot 2 = 0.003 \text{ m}^3$$

Se calculează exponentul K:

$$K = \frac{\rho \cdot V \cdot c_p}{U \cdot A} = \frac{7860 \cdot 0.003 \cdot 0.63}{14.93 \cdot 1.382} = 0.745 \text{ s}$$

Timpul de răcire până la temperatura finală va fi:

$$\tau = K \cdot \ln \frac{t_0 - t_e}{t_f - t_e} = 0.745 \cdot \ln \frac{(22-10)}{(11-10)} = 1.85 \text{ s}$$

10. Enunț

Se consideră modelul corpului uman alcătuit dintr-un miez de temperatură constantă, $t = 37^\circ\text{C}$ și un înveliș cutanat, cu rezistența cutanată $R_p = 0,105 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$. Se consideră rezistența

cutanată conform modelului din Fig. 4.2, adică $R_p = \sum_{k=1}^3 \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{1}{\alpha_e}$ (deci nu există straturile exterioare: film de apă și costum). Scafandru nu poartă costum de protecție. El are vârsta de 27 de ani, masa de 100 kg și înălțimea de 1,74 m.

Temperatura apei mării este $t_e = 22^\circ\text{C}$.

Întrebări

- Care este valoarea fluxului termic corespunzător metabolismului bazal, $\dot{Q}_m$?
- Care va fi valoarea fluxului termic pierdut la nivelul pielii, imediat după intrarea în imersiune, $\dot{Q}_c$?
- Cum se modifică acest flux, la intrarea în imersiune, dacă scafandru poartă un costum din neopren de grosime $\lambda_c = 5 \text{ mm}$ și coeficient de conducție termică $\lambda_c = 0,127 \text{ W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$? Celelalte mărimi rămân nemodificate. Se consideră că grosimea filmului de apă dintre piele și costum are grosimea $\delta_a = 1 \text{ mm}$.

Rezolvare

- Conform nomogramei **DUNN** din **ANEXE**, aria suprafeței corpului este $A = 2.15 \text{ m}^2$

Cantitatea de căldură, Q_m , produsă în timp de 24 de ore:

$$Q_m = 66.473 + 13.7516 \cdot 100 + 5.0033 \cdot 174 - 6.755 \cdot 27 = 2129.82 \text{ kcal}$$

Fluxul termic corespunzător metabolismului bazal, $\dot{Q}_m$:

$$\dot{Q}_m = \frac{Q_m \cdot 4.18 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} = 103 \text{ W}$$



$$b. \dot{Q}_c = \frac{t-t_e}{R_p} A = \frac{37-22}{0.105} 2.15 = 307.14W$$

c. Rezistența termică va crește prin adăugarea celor două straturi:

$$R_{pf} = R_p + \frac{\delta_a}{\lambda_a} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} = 0.105 + \frac{0.001}{0.61} + \frac{0.005}{0.127} = 0.146 m^2 \cdot ^\circ C / W$$

$$\lambda_a = 0,61 W / m \cdot ^\circ C \text{ din , ANEXE Tabelul 8}$$

Rezultă noul flux termic:

$$\dot{Q}_{cf} = \frac{t-t_e}{R_{pf}} A = \frac{37-22}{0.146} 2.15 = 220.88W$$

11. Enunț

Un scafandru autonom stă în repaus, în imersiune, la 30msw. Gazul respirator este aer uscat, livrat de detentor la presiunea mediului ambiant.. Scafandru poartă costum de neopren, astfel că rezistența termică la nivel cutanat (inclusiv filmul de apă și stratul de neopren) este $R_p = 0.15 m^2 \cdot ^\circ C / W$. El are vârsta de 27 de ani, masa de 100 kg și înălțimea de 1.74 m.

Căldura specifică a corpului uman se consideră $c_b = 3470 J / kg \cdot ^\circ C$. Caracteristicile fizice, la presiunea absolută de 4 bar sunt:

- Căldura specifică latentă a apei este $l_v = 2346000 J / kg$;
- Căldura specifică izobară a aerului este $c_p = 1008 J / kg \cdot ^\circ C$;
- Conținutul de umiditate al aerului saturat, la $37^\circ C$, este $x = 0.0099 kg / kg$;
- Densitatea aerului, la adâncimea considerată, este $\rho = 4.56 kg / m^3$;
- Debitul respirator, $\dot{V} = 0.8 l / s$.

Temperatura apei mării este $t_e = 12^\circ C$, iar temperatura inițială a scafandrului este $t_o = 37^\circ C$

Se consideră că aerul respirator ajunge la saturație și se încălzește la $37^\circ C$, în timpul unei inspirații.

Întrebare

La ce valoare ajunge temperatura internă a scafandrului după $\tau = 20min$, dacă el rămâne în repaus, în mare, la adâncimea de 30m?

Rezolvare

Se aplică relația (4.28), soluția ecuației de bilanț termic, care dă variația în timp a temperaturii interne a scafandrului. Se calculează termenii care apar în soluția ecuației.

$$Q_m = 66.473 + 13.7516 \cdot 100 + 5.0033 \cdot 174 - 6.755 \cdot 27 = 2129.82 kcal$$

Fluxul termic corespunzător metabolismului bazal, $\dot{Q}_m$:

$$\dot{Q}_m = \frac{Q_m \cdot 4.18 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} = 103W$$

Conform nomogramei **DUNN din ANEXE** aria suprafeței corpului $A=2.15m^2$.

Coefficienții:

$$a = \frac{\dot{Q}_m - l_{(p)}\rho_{(p)}x_{(p)}\dot{V}_{(p)}}{mc_b} = \frac{103 - 2346000 \cdot 4.56 \cdot 0.0099 \cdot 0.0008}{100 \cdot 3470} = 2.7 \cdot 10^{-4} [^{\circ}C/s]$$

$$b = \frac{\frac{A}{R_{(p)}} + \rho_{(p)}c\dot{V}_{(p)}}{mc_b} = \frac{\frac{2.15}{0.15} + 4.56 \cdot 1008 \cdot 0.0008}{100 \cdot 3470} = 4.2 \cdot 10^{-5} [1/s]$$

Funcția devine:

$$t_{(\tau)} = t_a + \frac{a}{b} + \left(t_0 - t_a - \frac{a}{b}\right) e^{-b \cdot \tau}$$

$$t_{(\tau)} = 12 + \frac{2.7 \cdot 10^{-4}}{4.2 \cdot 10^{-5}} + \left(37 - 12 - \frac{2.7 \cdot 10^{-4}}{4.2 \cdot 10^{-5}}\right) e^{-(4.2 \cdot 10^{-5}) \cdot 1200} = 36.08^{\circ}C$$

$$\tau = 20min = 1200s$$

Scafandru staționează, se aplică factorul de corecție C :

$$t_{(\tau)} = 35.1 - 0.5 = 34.6^{\circ}C$$

La momentul $\tau = 20min$, temperatura interioară scade la valoarea $t = 34.6^{\circ}C$.

Observații!

În calculele prezentate, scafandru a fost considerat în repaus. Atunci când el desfășoară o activitate fizică, așa cum se întâmplă în imersiune, metabolismul se intensifică și fluxul metabolic crește mult peste valoarea bazală, astfel încât timpul în care temperatura corpului scade până la o anumită valoare, se prelungește peste cea obținută pentru repaus. Temperatura corpului uman este mult influențată de caracteristicile fiziologice ale scafandrului și de efortul depus de acesta în activitatea desfășurată în imersiune.

Timpii obținuți în aceste calcule sunt estimativi și țin cont numai de temperatura corpului ca factor limitativ al duratei de scufundare.

Rezistența conductivă termică a costumului se stabilește în funcție de natura materialului din care este confecționat. Grosimea materialelor compresibile variază cu adâncimea de scufundare, deci variază și rezistența termică.



4.7. Probleme propuse

1. Enunț/Întrebare

Ce debit masic de apă este necesar pentru a ceda unui costum cu apă caldă o cantitate de căldură de 900 kJ în timp de 2 minute, astfel încât temperatura apei să scadă cu 6°C ?

(R: 0.298 kg/s)

2. Enunț

Un debit masic de apă de 13 kg/min , având temperatura inițială $t_0 = 42^\circ\text{C}$, cedează un flux termic de 4800 W .

Întrebări

- Care este temperatura finală a apei? ($t_{f1} = 36.7^\circ\text{C}$)
- Cum se modifică temperatura finală dacă debitul masic scade la jumătate, în condițiile în care nici fluxul termic și nici temperatura inițială nu se modifică? ($t_{f2} = 31.4^\circ\text{C}$)

3. Enunț/Întrebare

Să se calculeze căldura specifică a aerului umed saturat, la presiune normală și temperatura de 20°C . Conținutul de umiditate al aerului umed este $x = 0.016 \left[\frac{\text{kg}_{\text{vapori H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{aer uscat}}} \right]$. (R: $c_{p \text{ am}} = 1.013 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

4. Enunț

Un scafandru aflat la 24 msw respiră aer, consumând un flux termic $\dot{Q} = 28 \text{ W}$ pentru a încălzi aerul inspirat, dacă se consideră că aerul se încălzește de la temperatura mediului (apei de mare) până la cea a corpului uman. Densitatea aerului respirator, la această adâncime și la temperatura corpului uman $t = 37^\circ\text{C}$, este $\rho = 3.81 \text{ kg/m}^3$. Temperatura apei mării este $t_a = 19^\circ\text{C}$.

Întrebare

Cu ce debit ventilator mediu inspiră scafandru? (R: $\dot{V} = 0.4 \text{ l/s}$)

5. Enunț

Prin suprafața exterioară a costumului unui scafandru, cu aria de 2.05 m^2 , se transferă un flux termic conductiv de $\dot{Q} = 0.5 \text{ kW}$. Acest flux este preluat integral, prin convecție, de apa care curge pe această suprafață. Coeficientul de convecție termică corespunzător acestei suprafețe este $\alpha = 20 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$.

Întrebare

Care este temperatura suprafeței, dacă temperatura apei este de 16°C ? (R: $t_s = 28.2^\circ\text{C}$)

6. Enunț

O bară de secțiune circulară din oțel, având raza $r = 4 \text{ cm}$, și lungimea $L = 1.2 \text{ m}$ are, la suprafață, temperatura aerului atmosferic $t_o = 22.5^\circ\text{C}$. Se cunosc: densitatea oțelului $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$, căldura specifică $c_p = 0.63 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ și coeficientul de conducție termică $\lambda = 14.4 \text{ J/m} \cdot ^\circ\text{C}$. Conducta este scufundată în apă cu temperatura $t_e = 18^\circ\text{C}$.

Întrebare

Estimați timpul în care se răcește conducta la temperatura $t_f = 19^\circ\text{C}$?

Se neglijează contracția barei ca urmare a scăderii temperaturii. Se va considera coeficientul global de transfer termic $U = 15 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, pe toată aria barei, neglijând modificarea câmpului termic la capetele barei. (R: 9.6s)

7. Enunț

Se consideră modelul corpului uman alcătuit dintr-un miez de temperatură constantă $t = 37^\circ\text{C}$ și un înveliș cutanat, cu rezistența cutanată $R_p = 0.044 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$. Scafandru nu poartă costum de protecție. El are vârsta de 31 de ani, masa de 78 kg și înălțimea de 1,78 m. Temperatura apei mării este $t_e = 20^\circ\text{C}$.

Întrebări

- Care este valoarea fluxului termic corespunzător metabolismului bazal, $\dot{Q}_m$?
(R: $\dot{Q}_m = 88 \text{ W}$)
- Care va fi valoarea fluxului termic pierdut la nivelul pielii, imediat după intrarea în imersiune, $\dot{Q}_c$, dacă scafandru nu poartă costum? (R: $\dot{Q}_c = 772.73 \text{ W}$)
- Cum se modifică acest flux, la intrarea în imersiune, dacă scafandru poartă un costum din neopren de grosime $\delta_c = 7 \text{ mm}$ și coeficient de conducție termică $\lambda_c = 0.21 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$? Celelalte mărimi rămân nemodificate. Se consideră că grosimea filmului de apă dintre piele și costum are grosimea $\delta_a = 0.8 \text{ mm}$. (R: $\dot{Q}_c = 432.32 \text{ W}$)

8. Enunț

Un scafandru autonom stă în repaus, în imersiune, la adâncimea de 21m. Gazul respirator este aer uscat, livrat de detentor la presiunea mediului ambiant. Scafandru poartă costum de neopren, astfel că rezistența termică la nivel cutanat (inclusiv filmul de apă și stratul de neopren) este $R_p = 0.091 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$. El are vârsta de 29 de ani, masa de 80 kg și înălțimea de 1,8 m.

Căldura specifică a corpului uman se consideră $c_b = 3470 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$. Temperatura apei mării este $t_e = 19^\circ\text{C}$, iar temperatura internă, inițială, a scafandrului este $t_o = 37^\circ\text{C}$.

Se consideră că aerul respirator ajunge la saturație și se încălzește la 37°C , în timpul unei inspirații.



Caracteristicile fizice, la presiunea absolută de 3.1 bar , sunt:

- Căldura specifică latentă a apei este $l_v = 2363000\text{ J/kg}$; (**Tabelul 9 ANEXE**)
- Căldura specifică izobară a aerului este $c_p = 1008\text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$;
- Conținutul de umiditate al aerului saturat, la 37°C , este $x = 0.0133\text{ kg/kg}$;
- Debitul respirator, $\dot{V}_p = 0.12\text{ l/s}$

Întrebare

La ce valoare ajunge temperatura internă a scafandrului după $\tau = 10\text{ min}$, dacă el rămâne în repaus, în mare, la adâncimea de 21 m ? ($R: 36.3^\circ\text{C}$)

CAPITOLUL 5 INSTALAȚII ȘI ECHIPAMENTE HIPERBARE

Emil AVRAM

5.1. Principalele instalații și echipamente hiperbare

În funcție de destinația lor (alimentare cu gaz respirator, destindere, transfer, recuperare, distribuție gaze), tablourile din cadrul ansamblurilor de scufundare pot fi:

- Tablouri de ambarcare/debarcare cu heliu, azot și oxigen;
- Tablouri de transfer;
- Tablouri de detentă;
- Tablouri de decompresie și recuperare gaze;
- Tablouri de predistribuție;
- Tablouri de control și distribuție presiune hidrostatică;
- Tablouri de alimentare a barocamerelor.

Tabloul de alimentare cu heliu și oxigen (Fig. 5.1) este destinat transferului oxigenului și heliului din buteliile de capacitate mică (50l) în recipientele proprii de stocare, de capacitate mai mare.

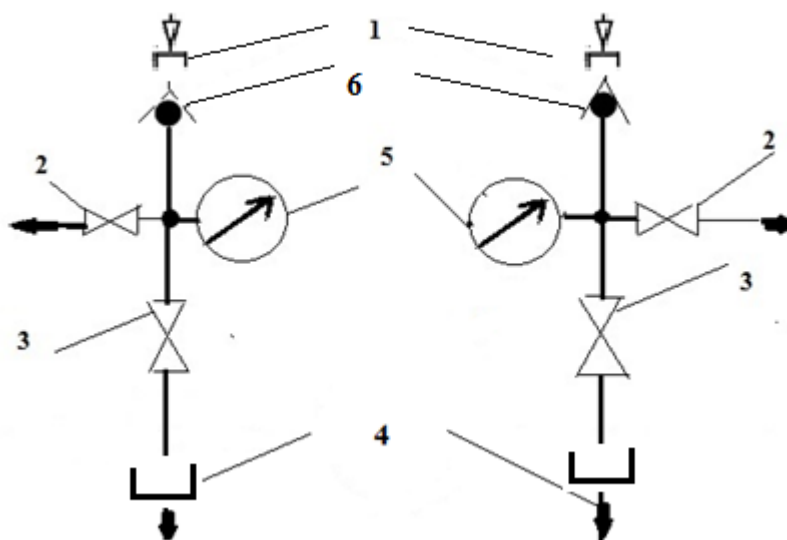


Fig. 5.1 Tabloul de alimentare cu heliu și oxigen

1. Cuplă rapidă de intrare 2. Vană de purjare 3. Vană de izolare 4. cuplă rapidă de ieșire
5. Manometru de presiune 0-300bar 6. Supapă de sens

Amestecul respirator, livrat la presiunea ambientală de la tabloul de distribuție gaze, trece printr-o supapă nonretur către distribuitor, de la care printr-o cuplă rapidă se poate alimenta detentorul măștii oronazale. Se utilizează cuplele rapide pentru a putea livra la nevoie oxigen pur sau amestec supraoxigenat pentru tratament. Gazul expirat prin masca oronazală trece prin deversor (reduce presiunea expirului).



În timpul funcționării, deversorul nu poate suporta decât o diferență de presiune $\Delta p = 1 \div 5 \text{ bar}$, pentru reducerea presiunii până la cea atmosferică. La ieșirea din cheson amestecul expirat trece prin limitatorul de presiune.

Ansamblul hiperbar cuprinde mai multe instalații exterioare:

- Instalația de presurizare cu amestecuri respiratorii sau cu gaze pure;
- Instalația de presurizare rapidă;
- Instalația de recuperare a gazelor;
- Instalația de regenerare externă a amestecurilor respiratorii.

Instalația de presurizare cu gaze

Este o instalație complexă, cu circuite presurizate, robinete, manometre, manodetentoare. Înainte de a intra în cheson, gazele colectate din recipiente trec printr-un tablou de distribuție.

Instalația de presurizare rapidă este separată de instalațiile care alimentează barocamera și simulatorul cu apă. Ea este acționată de la panoul de control. Acest panou controlează toate instalațiile, inclusiv comunicațiile audio și video.



Fig. 5.2 Tabloul de control și distribuție gaze - Laboratorul Hiperbar al Centrului de Scafandri (Arhiva foto a Centrului de Scafandri)

Instalația de recuperare a gazelor

Aceasta se utilizează pentru a recupera gazele din amestecurile respiratorii, de obicei heliul, cel mai des utilizat în amestecurile respiratorii pentru scufundări profunde. Heliul din amestecuri este un gaz cu densitate foarte mică ($0,1785 \text{ kg/m}^3$), din această cauză difuzează ușor și este greu de recuperat. Principalele elemente ale unei instalații de recuperare sunt:

- bașa suplă (rezervor elastic) de stocare;
- compresorul de gaze pure;
- buteliile de stocare.

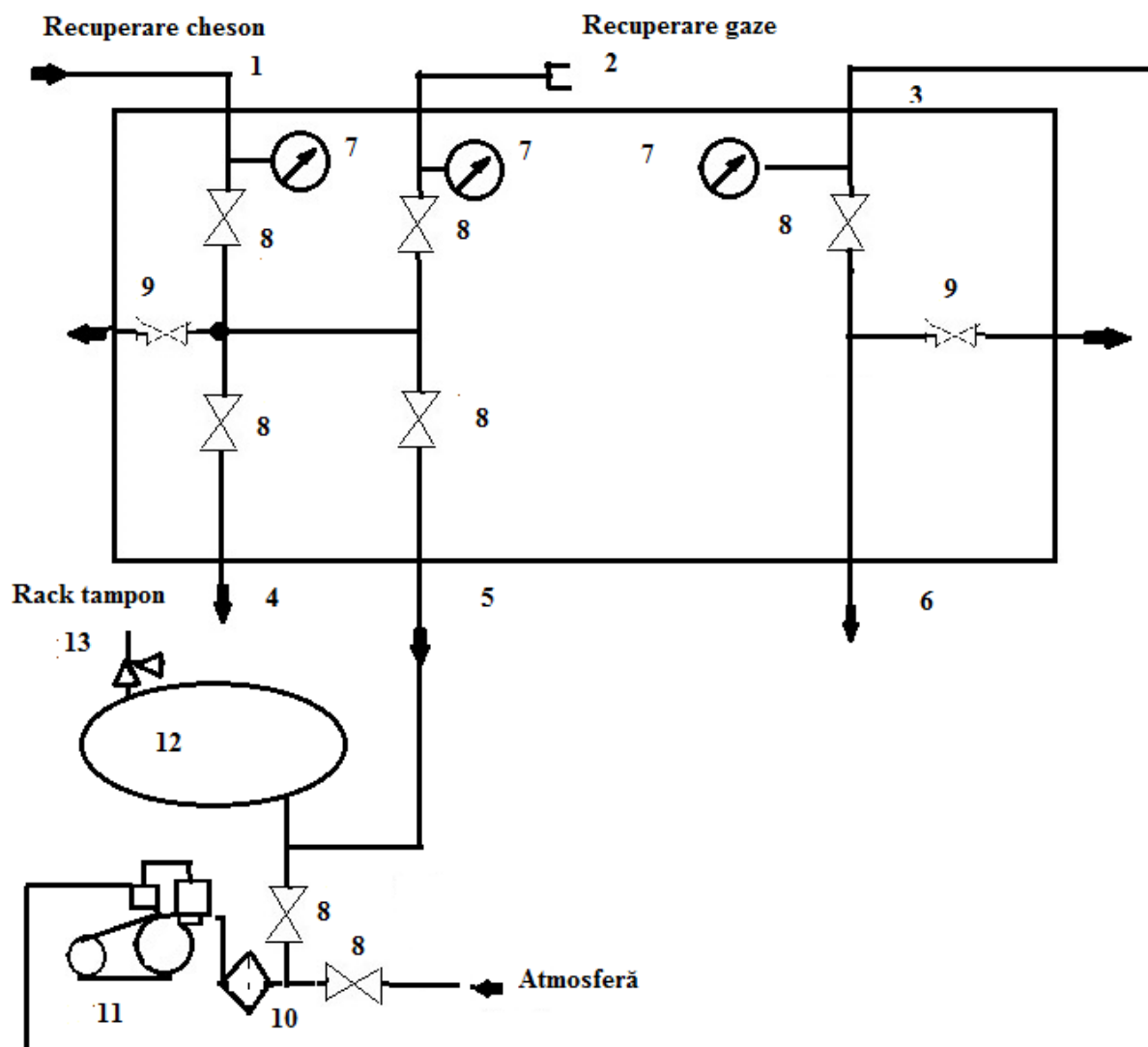


Fig. 5.3 Tabloul de recuperare gaze

1,2,3,4,5,6 Circuite pneumatice 7 Manometru 8 Vană de izolare 9 Vană de purjare
10 Filtru 11 Compresor 12 Bașă suplă 13 Supapă de siguranță

Circuite:

1-4 Circuitul de recuperare gaze din cheson

2-5 Circuitul de recuperare gaze reziduale din sfere către compresor

3-6 Circuitul de dirijare a gazului prin circuitul de refulare compresor către rack-ul de stocare

Instalația de regenerare externă a amestecurilor respiratorii

Instalația de regenerare asigură menținerea calității atmosferei din camera hiperbară prin:

- reținerea bioxidului de carbon cu filtrele de calce sodată,
- reținerea mercaptanilor de către cărbunele activ;
- reținerea umidității de către silicagelul din filtrele instalației;
- reglarea temperaturii amestecului de gaze;
- injecția de oxigen controlată de tabloul de analiză a gazelor.

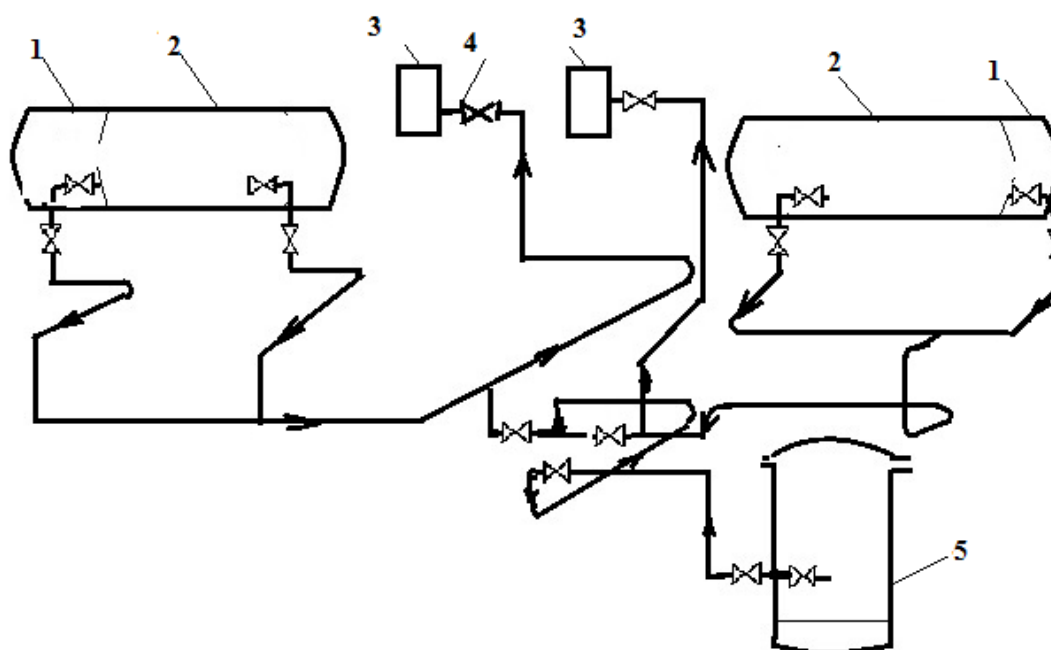


Fig. 5.4 Instalația de regenerare externă - Centrul de Scafandri Constanța
1 Sas 2 Cameră 3 Regenerator 4 Robinet 5 Simulator

Cele mai importante elemente ale sistemului de regenerare sunt:

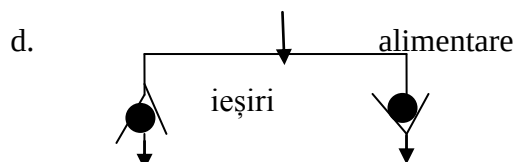
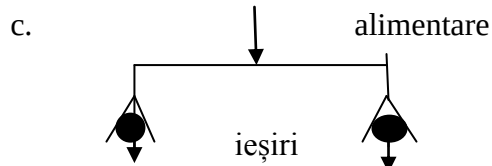
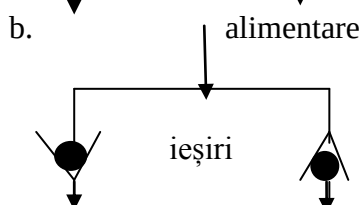
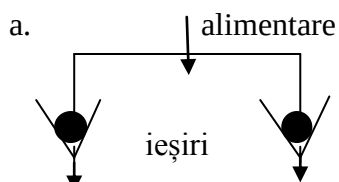
- pompa de circulație tip ROOTS (culobi);
- elementele filtrante ale bioxidului de carbon cu calce sodată și cărbune activ;
- filtrele de silicagel;
- instalația de regenerare silicagel cu aer cald;
- instalația de încălzire gaze cu termostat;
- circuitul de injecție oxigen din tabloul de analiză a gazelor.

Pentru alimentarea cu gaz respirator se utilizează circuite care includ robineti, furtune de presiune, supape non-retur. Este foarte importantă realizarea unui circuit logic corect. Sunt exemplificate astfel de cazuri la punctul 5.2.

5.2. Probleme rezolvate

1. Enunț/Întrebare

Care dintre următoarele circuite de alimentare sunt corecte?

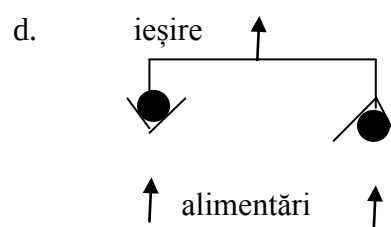
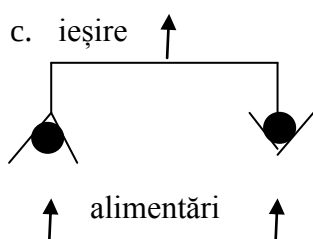
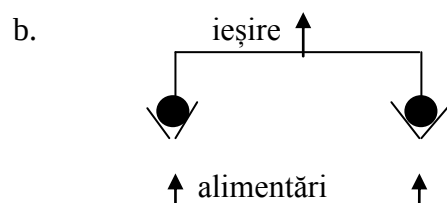
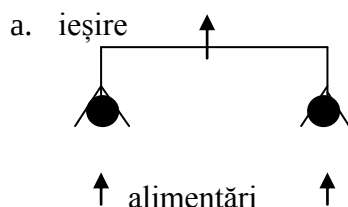


Rezolvare

Varianta c este corectă deoarece gazul distribuit de la sursa de alimentare poate curge prin cele două ieșiri în direcțiile indicate, supapele de sens de la ieșiri permit acest lucru.

2. Enunț/Întrebare

Indicați circuitul corect dintre variantele propuse mai jos.

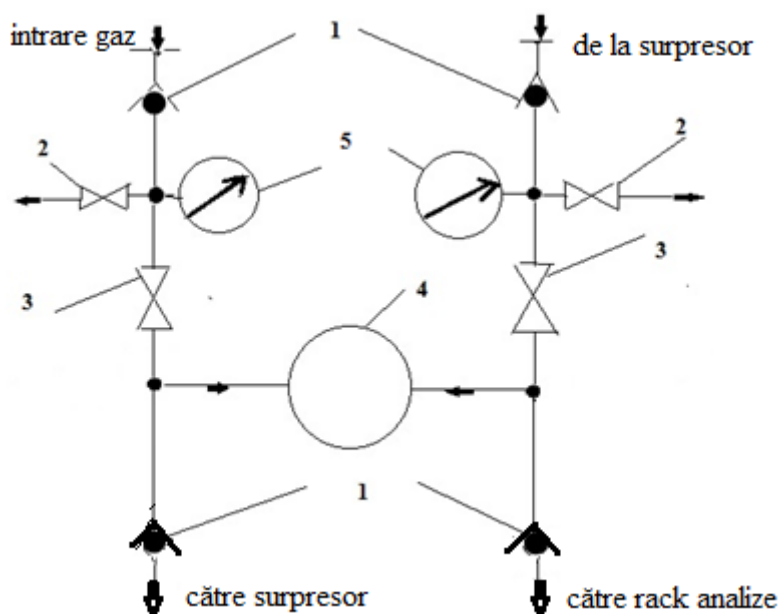


Rezolvare

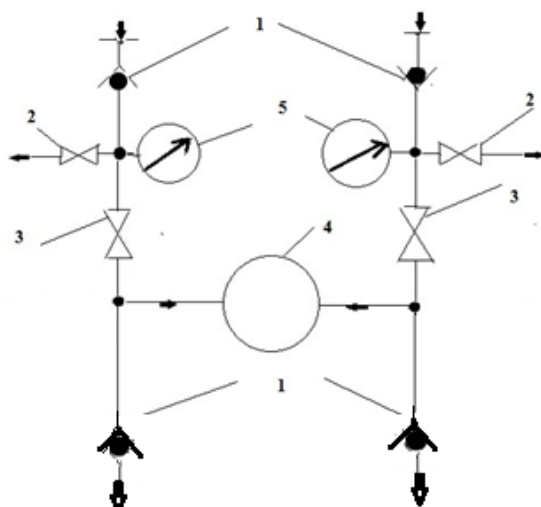
Varianta b este corectă deoarece gazul distribuit de la cele două surse de alimentare poate curge prin ieșire, în direcția indicată, supapele de sens de la intrări permit acest lucru.

3. Enunț/Întrebare

Care dintre variantele propuse pentru fabricarea amestecurilor gazoase binare este corectă?



Varianta a: 1. Supapă de sens 2. Ventil de purjare 3. Robinet de admisie
4. Rezervor de amestec 5. Manometru

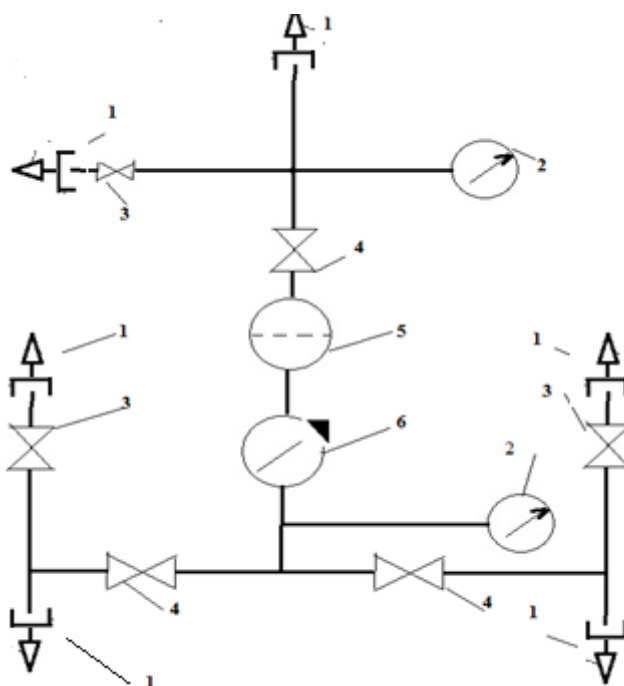


Varianta b: 1. Supapă de sens 2. Ventil de purjare 3. Robinet de admisie
4. Rezervor de amestec 5. Manometru

Rezolvare

Varianta a este corectă deoarece gazul distribuit de la cele două surse de alimentare poate curge prin supapele de sens, de la intrări, în direcția indicată, supapele permit acest lucru. La varianta b admisia gazului din dreapta prin supapă nu se poate face, supapa blochează trecerea, sensul este de ieșire nu de intrare.

4. Enunț/Întrebare



Tablou de destindere amestec gazos 1 Cuplă rapidă de ieșire 2 Manometru 3 Vană de purjare 4 Vană de presiune 5 Filtru 6 Manodetentor

Circuitul pneumatic pentru destinderea amestecului gazos de mai sus este corect?

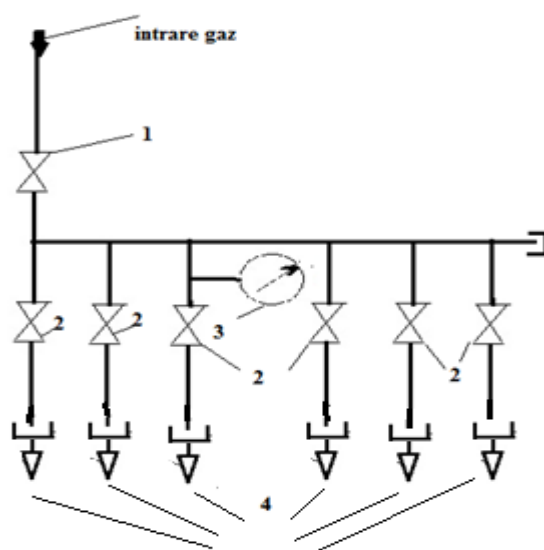
Rezolvare

Circuitul de admisie al amestecului gasos se face pe sus. Cupla rapidă 1 este de ieșire, trebuie schimbată cu o cuplă de intrare. Circuitul nu este corect. Se va schimba cupla de

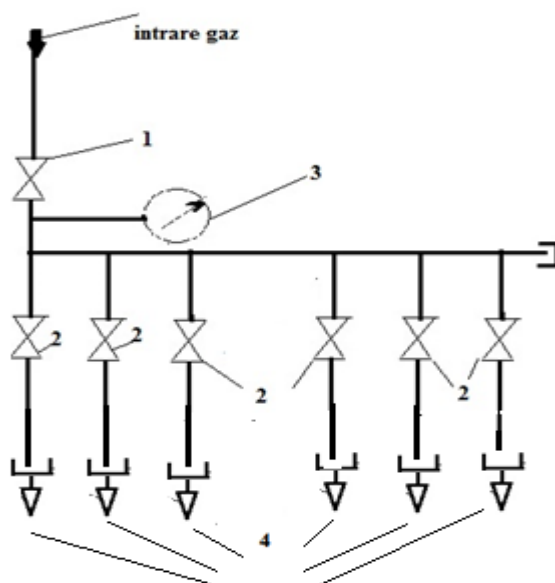
sus cu o **cuplă rapidă de intrare**:

5. Enunț/Întrebare

Care dintre cele două variante a sau b, pentru un tablou distribuție amestecuri este corect și de ce?



**Varianta a: 1 Vană de ajustare 2 Vană de distribuție 3 Manometru
4 Cuplă rapidă de ieșire**



**Varianta b: 1 Vană de ajustare 2 Vană de distribuție 3 Manometru
4 Cuplă rapidă de ieșire**

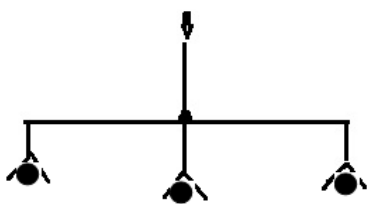
**Rezolvare**

Manometrul de presiune înaltă trebuie să fie amplasat pe circuit, imediat după admisie, înaintea vanelor de distribuție, condiție îndeplinită de **varianta b**.

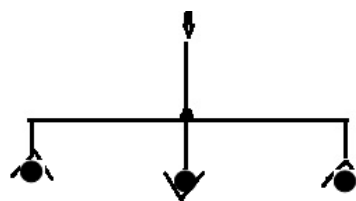
5.3. Probleme propuse**1. Enunț/Întrebare**

Care dintre cele 4 variante este corectă și de ce? (R: **a**)

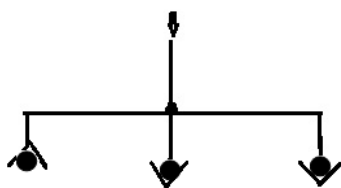
a



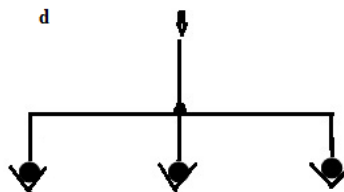
c



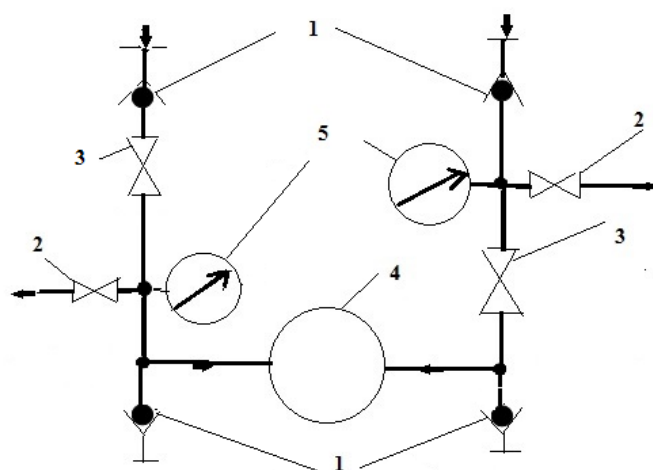
b



d

**2. Enunț/Întrebare**

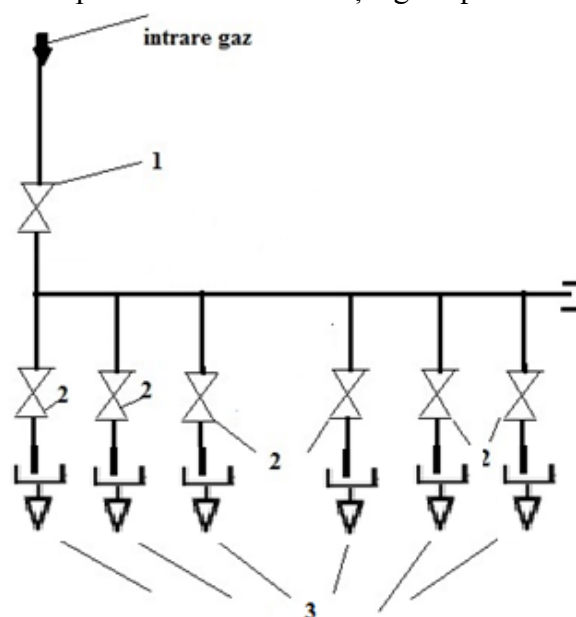
Este corect circuitul pneumatic de mai jos?



1. Supapă de sens 2. Ventil de purjare 3. Robinet de admisie
4. Rezervor de amestec 5. Manometru

3. Enunț/Întrebare

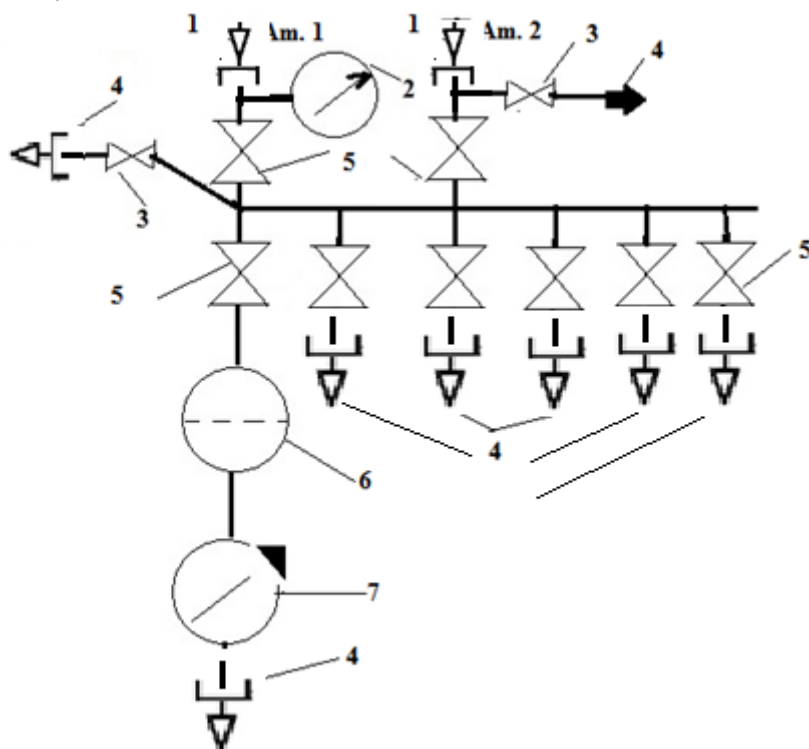
Ce lipsește din circuitul pneumatic de distribuție gaze prezentat mai jos?



1 Vană de ajustare 2 Vană de distribuție 3 Cuplă rapidă de ieșire

4. Enunț/Întrebare

Unde este greșeala la acest circuit de predistribuție amestecuri gazoase?



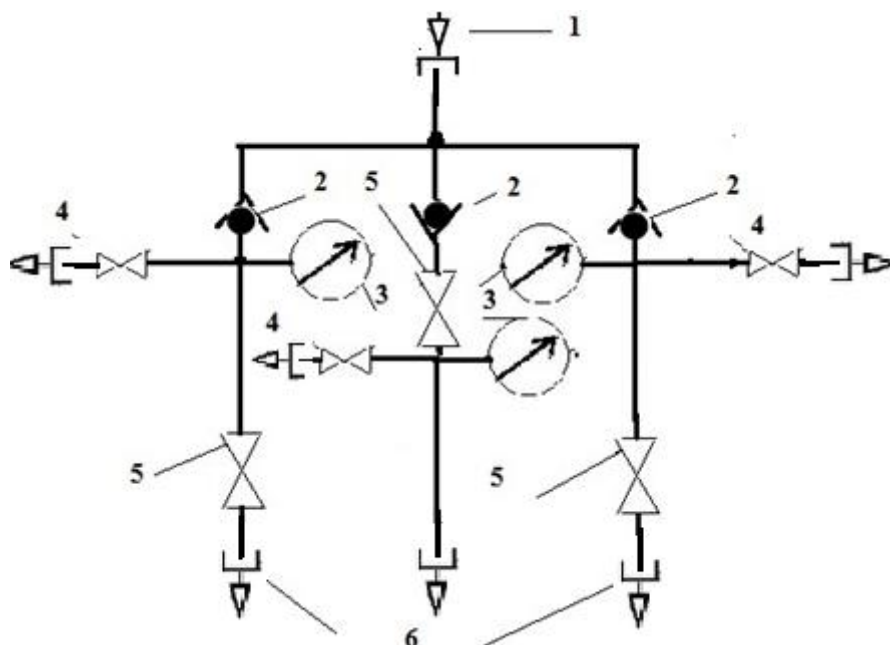
1 cuplă rapidă de intrare 2 Manometru de presiune 3 Vană de purjare
4 Cuplă rapidă de ieșire 5 Vană de presiune înaltă 6 Filtru 7 Manodetentor



5. Enunț/Întrebare

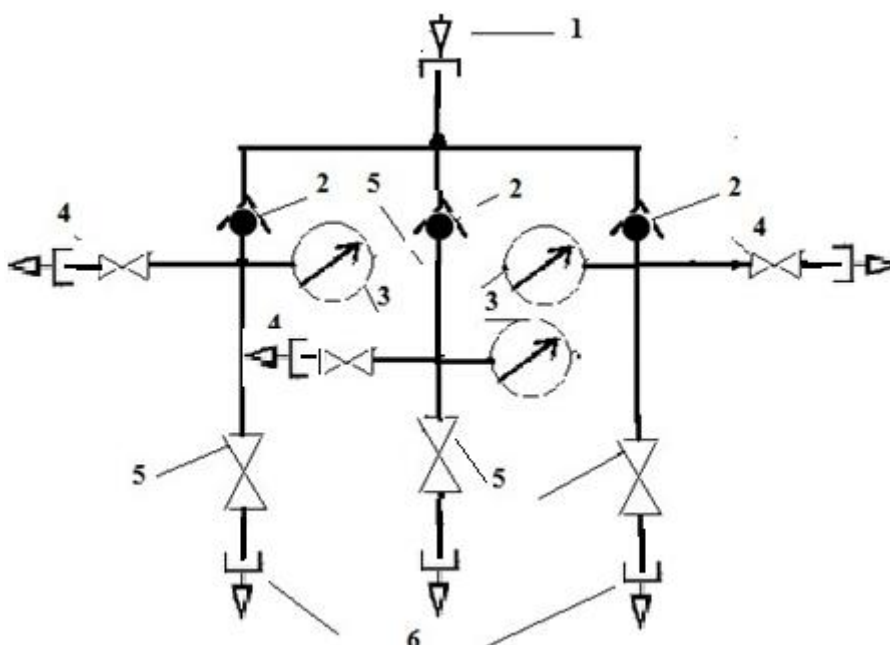
Care dintre cele două circuite pneumatice este corect?

a.



1 cuplă rapidă de intrare 2 Supapă de sens 3 Manometru de presiune 4 Vană de purjare
5 Vană de presiune înaltă 6 Cuplă rapidă de ieșire

b.



1 cuplă rapidă de intrare 2 Supapă de sens 3 Manometru de presiune 4 Vană de purjare
5 Vană de presiune înaltă 6 Cuplă rapidă de ieșire

CAPITOLUL 6

PROBLEME RECAPITULATIVE

Tamara STANCIU

6.1. Probleme rezolvate

1. Enunț/Întrebare

2bar sunt echivalenți cu:

- a. 1.974 atm
- b. 1600mmHg
- c. 32.81fsw
- d. 20msw

Rezolvare

Vezi Tabelul 1.1. pag. 8 și Tabelul 1.3, pag 9, Culegere de exerciții și probleme pentru pregătirea scafandrilor – volumul 1.

- a. $2\text{bar} = 2 \cdot 0.9869 \cong 1.974\text{atm}$
- b. $2\text{bar} = 2 \cdot 750.1 = 1500.2\text{mmHg}$
- c. $2\text{bar} = 2 \cdot 10\text{msw} = 20\text{msw} = 20 \cdot 3.280829 \cong 65.62\text{fsw}$
- d. $2\text{bar} = 2 \cdot 10\text{msw} = 20\text{msw}$

Răspunsul corect: a și d.

2. Enunț

Un balon este scufundat în apă și volumul lui se reduce cu 2/3 din valoarea inițială. Temperatura apei este aproximativ constantă în primii 20m adâncime.

Întrebări

- a. Ce lege a fizicii se aplică?
- b. La ce adâncime a fost scufundat balonul?

Rezolvare

a. Dacă $T = \text{ct.} \rightarrow p \cdot V = \text{ct.}$ - Legea Boyle – Mariotte

b. $p_0 = 1\text{bar}$ (la suprafață)

V_0 - volumul la suprafață

$V_h = V_0 - \frac{2}{3}V_0 = \frac{V_0}{3}$ - volumul la adâncime

p_{ab} - presiunea absolută la adâncimea h.

Legea Boyle – Mariotte:

$$p_0 \cdot V_0 = p_{ab} \cdot V_h \rightarrow p_{ab} = \frac{p_0 \cdot V_0}{V_h} = \frac{p_0 \cdot V_0}{V_0/3} = \frac{1 \cdot V_0 \cdot 3}{V_0} = 3\text{bar}$$

$$p_{ab} = 3\text{bar} \rightarrow p_h = (p_{ab} - p_0) \cdot 10 = (3 - 1) \cdot 10 = 20\text{msw}$$

Balonul a fost scufundat la 20m adâncime.



3. Enunț

O scufundare este planificată la 100msw. Presiunea parțială a oxigenului trebuie să fie menținută în limitele (700 – 800)mbar.

Întrebare

Care amestec respirator va fi ales, dacă avem la dispoziție amestecurile:

- 5%
- 7%
- 8%
- 10%.

Rezolvare

Participația volumică a oxigenului este

$$r_{ox} = \frac{c_{ox} \%}{100} \rightarrow c_{ox} \% = r_{ox} \cdot 100$$

Presiunea parțială de oxigen, la presiunea absolută $p_{ab} = \frac{p_h}{10} + 1 = \frac{100}{10} + 1 = 11\text{bar}$, este:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab}$$

$$\text{Pentru } p_{poxmin} = 700\text{mbar} = 0.7\text{bar} \rightarrow r_{oxmin} = \frac{p_{poxmin}}{p_{ab}} = \frac{0.7}{11} \cong 0.06$$

$$c_{oxmin} = r_{oxmin} \cdot 100 = 0.06 \cdot 100 = 6\%$$

$$\text{Pentru } p_{poxmax} = 800\text{mbar} = 0.8\text{bar} \rightarrow r_{oxmax} = \frac{p_{poxmax}}{p_{ab}} = \frac{0.8}{11} \cong 0.07$$

$$c_{oxmax} = r_{oxmax} \cdot 100 = 0.07 \cdot 100 = 7\%$$

Concentrația amestecului ales trebuie să fie cuprinsă între 6 ÷ 7%. Alegem varianta b, respectiv 7%.

4. Enunț

O cameră hiperbară este presurizată la 90msw. Concentrația oxigenului din amestec este 5%. Camera este ventilată și se face o decompresie până la 75msw.

Întrebări

- Se modifică concentrația oxigenului și presiunea lui parțială după decompresie? Ce lege a fizicii se aplică?
- Care sunt aceste valori?

Rezolvare

$$\text{a. Se aplică Legea lui Dalton: } p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab}$$

Concentrația oxigenului nu se modifică cu presiunea absolută, doar presiunile parțiale ale gazelor componente se modifică.

$$\text{b. Concentrația } c_{ox} = 5\% \rightarrow c_{ox} = 5\% \rightarrow r_{ox} = \frac{5}{100} = 0.05$$

Presiunea absolută la $p_H = 75\text{msw}$ este:

$$p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = \frac{75}{10} + 1 = 8.5\text{bar}$$

Presiunea parțială a oxigenului va fi:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab} = 0.05 \cdot 8.5 = 0.425\text{bar} = 425\text{mbar}$$

5. Enunț/Întrebare

Câți m^3 de gaz sunt necesari pentru presurizarea la 60msw a unei barocamere, cu volumul inundabil de $1236ft^3$?

Rezolvare

Volumul inundabil al barocamerei este (vezi tabelul 1.6 vol. 1):

$$V_b = 1236ft^3 = 1236 \cdot \frac{1}{35.31} = 35m^3$$

Presiunea manometrică din barocameră este $p_h = 60msw$.

Pentru presurizarea barocamerei se adaugă gaz, la p_h , peste aerul atmosferic cu presiune normobară (1bar). În acest caz volumul de gaz liber necesar pentru presurizarea barocamerei este:

$$VGL = V_b \frac{p_h}{10} = 35 \frac{60}{10} = 210m^3.$$

6. Enunț

Doi scafandri fac un tratament pentru accident de decompresie, la 50msw, tratament care constă în 5 cicluri de câte 30 minute de gaz terapeutic. Rata de consum la masca de tratament este de 25l/min.

Întrebare

Cât gaz terapeutic este necesar pentru tratarea celor 2 pacienți?

Rezolvare

Volumul de gaz liber necesar pentru tratamentul scafandrilor este:

$$VGL = n \cdot p_{ab} \cdot c \cdot \tau \cdot Q$$

$n=2$ – numărul de scafandri

$$p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = \frac{50}{10} + 1 = 6bar$$

$c=5$ – numărul de cicluri

$\tau = 30min$ - durata unui ciclu

$Q = 25l/min$ - rata de consum la masca de tratament

$$VGL = n \cdot p_{ab} \cdot c \cdot \tau \cdot Q = 2 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 30 \cdot 25 = 45000l = 45m^3$$

7. Enunț

5 scafandri se află în saturație la 90msw pentru 3 zile.

Întrebare

Cât oxigen este necesar pentru completarea consumului metabolic?

Rezolvare

Consumul mediu de oxigen metabolic pentru un scafandru nu depinde de presiune și este $C_{ox} = 0.5l/min$, considerat acoperitor, deoarece scafandrii nu stau în permanență în incintă, ies și la punctul de lucru în apă. Timpul total este:

$$\tau = 3zile = 3 \cdot 24h = 3 \cdot 24 \cdot 60min = 4320min$$

Numărul de scafandri $n=5$

Consumul total de oxigen este:

$$C_{ox\text{tot}} = n \cdot C_{ox} \cdot \tau = 5 \cdot 0.5 \cdot 4320 = 10800l = 10.8m^3.$$



8. Enunț

Amestecul terapeutic recomandat pentru alimentarea măștilor de palier pe intervalul 0 – 80msw este 16%. Rata de consum la masca de palier (BIBS – built-in breathing system), în saturație, este $Q=20l/min$.

Întrebare

Dacă rezerva de amestec terapeutic se calculează pentru 4ore/scafandru, la adâncimea maximă, conform politicii companiei, care este volumul de gaz liber necesar pentru o saturație la care participă 6 scafandri?

Rezolvare

Indiferent de durata saturației, rezerva de amestec de urgență este prevăzută pentru 4 ore, pentru fiecare scafandru. Volumul de gaz liber de rezervă este:

$$VGL_{rez} = p_{ab} \cdot n \cdot Q \cdot \tau$$

$$p_{abmax} = \frac{pH_{max}}{10} + 1 = \frac{80}{10} + 1 = 9bar - presiunea absolută la adâncimea maximă$$

$n=6$ – numărul de scafandri

$\tau = 4h = 4 \cdot 60 = 240min$ - timpul asigurat pentru ieșirea de urgență a unui scafandru

$$VGL_{rez} = p_{ab} \cdot n \cdot Q \cdot \tau = 9 \cdot 6 \cdot 20 \cdot 240 = 259200l = 259.2m^3$$

9. Enunț

O scufundare de saturație este planificată să atingă nivelul de viață de 60msw și presurizarea se face peste aerul existent în turelă, cu amestec heliox 2/98.

Întrebare

Cum se ating adâncimea planificată și presiunea parțială a oxigenului de 450mbar?

Rezolvare

Presiunea absolută la nivelul de viață este:

$$p_{ab} = \frac{pH}{10} + 1 = \frac{60}{10} + 1 = 7bar$$

Pentru a avea presiunea parțială de oxigen finală $p_{pO_{xf}} = 450mbar = 0.45bar$, se aplică Legea lui Dalton pentru adâncimea intermediară:

$$p_{pO_{xf}} = 0.21 \cdot p_i + p_{pO_{xc}}$$

$$0.45 = 0.21 \cdot p_i + r_{O_{xc}} \cdot (p_{ab} - p_i)$$

$$r_{O_{xc}} = \frac{2}{100} = 0.02 - participația volumică a amestecului care se completează$$

$$0.45 = 0.21 \cdot p_i + 0.02 \cdot (7 - p_i) \rightarrow p_i = \frac{0.45 - 0.14}{0.21 - 0.02} = \frac{0.31}{0.19} \cong 1.63bar$$

$$p_i = \frac{pH_i}{10} + 1 \rightarrow pH_i = (p_i - 1) \cdot 10 = (1.63 - 1) \cdot 10 = 0.63 \cdot 10 = 6.3msw$$

Se presurizează cu aer atmosferic ($r_{ox} = 0.21$) până la adâncimea intermediară, la pH_i . De la 6.3msw până la nivelul de viață (60msw), se completează cu amestecul heliox 2/98.

10. Enunț

O cameră hiperbară este presurizată peste aerul atmosferic la 200msw cu heliox. Concentrația de oxigen a amestecului din ambient este 3%.

Întrebare

Care este compoziția amestecului de presurizare?

Rezolvare

Presiunea absolută la 200msw este:

$$p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = \frac{200}{10} + 1 = 21\text{bar}$$

$$c_{ox} = 3\% \rightarrow r_{ox} = 0.03 \rightarrow p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab} = 0.03 \cdot 21 = 0.63\text{bar}$$

La suprafață, la $p_{ab} = 1\text{bar}$, înainte de presurizare, concentrația azotului din aerul atmosferic a fost $c_{N_2} = 79\% \rightarrow r_{N_2} = 0.79 \rightarrow p_{pN_2} = 0.79 \cdot 1 = 0.79\text{ bar}$

Cantitatea de azot nu se modifică la presurizare, deci presiunea parțială rămâne constantă, $p_{pN_2} = 0.79\text{bar}$. La 200msw presiunea totală este

$$p_{ab} = p_{pox} + p_{pN_2} + p_{pHe} \rightarrow p_{pHe} = p_{ab} - p_{pox} - p_{pN_2} = 21 - 0.63 - 0.79 = 19.58\text{bar}$$

Presiunea parțială a heliului se calculează cu formula:

$$p_{pHe} = r_{He} \cdot p_{ab} \rightarrow r_{He} = \frac{p_{pHe}}{p_{ab}} = \frac{19.58}{21} \cong 0.93$$

$$c_{He} = r_{He} \cdot 100 = 0.93 \cdot 100 = 93\% .$$

Amestecul respirator utilizat la această scufundare este heliox 7/93.

11. Enunț

Un complex hiperbar este alcătuit din: 2 camere uscate de câte 40m^3 , 2 SAS-uri de transfer de 15m^3 fiecare, SAS-ul de serviciu de 40l și 1 cameră umedă de 29.96 m^3 . Sistemul trebuie să fie presurizat pentru saturație la 60msw, utilizând 2 amestecuri heliox: 4/96 și 14/86.

Întrebări

- Care este volumul de gaz liber care trebuie utilizat?
- Cum se face amestecul final, astfel încât presiunea parțială a oxigenului să fie 500mbar?
- Care este cantitatea de oxigen metabolic care trebuie asigurată pentru cei 4 scafandri participanți la saturația de 7 zile?
- Ce volum de amestec respirator de urgență trebuie asigurat pentru măștile de palier (BIBS - built-in breathing system)?

Rezolvare

a. Se calculează volumul inundabil total

$$\text{SAS serviciu} - 40\text{l} = 0.04\text{m}^3$$

$$V_t = 2 \cdot 40 + 2 \cdot 15 + 0.04 + 29.96 = 140\text{m}^3$$

Volumul total de gaz liber necesar pentru presurizare este:

$$VGL_t = p_h \cdot V_t = \frac{p_H}{10} \cdot 140 = \frac{60}{10} \cdot 140 = 840\text{m}^3.$$

b. În barocamere este aer cu presiunea parțială de oxigen $p_{pox} = 210\text{mb}$.

$$p_{pOxf} = 210 + p_{pOxc} \rightarrow p_{pOxc} = 500 - 210 = 290\text{mb} - \text{pres. care trebuie completată}$$

Se aplică formula (7.1) din volumul 1:

$$pH_b = \frac{p_{O_2c} - p_H \cdot C_s\%}{(C_b\% - C_s\%)} = \frac{(290 - 60 \cdot 4)}{(14 - 4)}$$

$$pH_b = \frac{50}{10} = 5\text{msw} - \text{presiunea manometrică a amestecului bogat.}$$

Se utilizează 5msw amestec bogat 14%. Presiunea manometrică de fund este:

$$pH_f = pH_b + pH_s \leftrightarrow 60 = 5 + pH_s \rightarrow pH_s = 60 - 5 = 55\text{msw}.$$



Peste 5msw de amestec 14% se adaugă 55msw amestec 4% și se face presurizarea la 60msw.

Cantitățile de amestecuri utilizate:

$$\text{Am. bogat 14\%: } p_b \cdot V_t = \frac{5}{10} \cdot 140 = 70\text{m}^3.$$

$$\text{Am. sărac 4\%: } p_s \cdot V_t = \frac{55}{10} \cdot 140 = 770\text{m}^3.$$

c. Oxigenul metabolic necesar este:

$$V_{ox} = n \cdot 0.5 \cdot 60 \cdot 24 \cdot z = 4 \cdot 0.5 \cdot 60 \cdot 24 \cdot 7 = 20160\text{l} = 20.16\text{m}^3$$

$n=4$ scafandri și 1 scafandru are nevoie de 0.5l/min

$z=7$ zile

$Izi=24\text{h}$ și $1\text{h}=60\text{min}$.

d. Până la 80msw, măștile de palier se alimentează cu amestec 16%, indiferent de presiune și asigură 20l/min, timp de 4h pentru fiecare scafandru. Volumul total de gaz liber pentru urgență (BIBS) este:

$$VLG_{BIBS} = p_{ab} \cdot Q \cdot \tau \cdot n$$

$$p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = \frac{60}{10} + 1 = 7\text{bar}$$

$$Q = 20\text{l/min}$$

$$\tau = 4\text{h} = 4 \cdot 60 = 240\text{min}$$

$n = 4$ - numărul de scafandri

$$VLG_{BIBS} = p_{ab} \cdot Q \cdot \tau \cdot n = 7 \cdot 20 \cdot 240 \cdot 4 = 134400\text{l} = 134.4\text{m}^3 \quad - \quad \text{amestec } 16\% \text{ pentru urgențe.}$$

12. Enunț

În timpul unei scufundări se pierde presiune până la 50msw. Presiunea parțială de oxigen la această adâncime intermediară este $p_{pOxi} = 180\text{mbar}$. Se revine la adâncimea inițială, respectiv la presiunea manometrică 115msw, prin presurizarea cu un amestec heliox 5/95.

Întrebări

- Este presiunea parțială a oxigenului normală pentru scufundarea în saturație?
- Dacă avem la dispoziție doar tabele de decompresie US Navy, ce tabel vom utiliza?

Rezolvare

a. Presiunea parțială de oxigen la adâncimea intermediară este

$$p_{pOxi} = 180\text{mbar} = 0.18\text{bar}$$

Presiunea absolută la adâncimea intermediară:

$$p_{abi} = \frac{p_{Hi}}{10} + 1 = \frac{50}{10} + 1 = 6\text{bar}$$

Presiunea absolută la adâncimea finală este:

$$p_{abf} = \frac{p_{Hf}}{10} + 1 = \frac{115}{10} + 1 = 12.5\text{bar}$$

Se aplică Legea lui Dalton pentru presiunea oxigenului la adâncimea finală:

$$p_{pOxf} = r_{Oxi} \cdot p_{Hi} + r_{Oxf} \cdot (p_{Hf} - p_{Hi})$$

$$p_{pOxi} = r_{Oxi} \cdot p_{Hi} \rightarrow r_{Oxi} = \frac{p_{pOxi}}{p_{Hi}} = \frac{0.18}{6} = 0.03$$

$$\text{Amestecul final } 5/95 \rightarrow r_{oxf} = \frac{5}{100} = 0.05$$

$$p_{poxf} = 0.03 \cdot 6 + 0.05(12.5 - 6) = 0.505\text{bar} = 505\text{mbar}$$

Presiunea parțială de oxigen recomandată la saturație pentru nivelul de viață este cuprinsă între 400 – 600mbar. 505mbar se încadrează în valorile normale.

b. Adâncimea de scufundare este $H_f = 115\text{m} \rightarrow p_H \cong 380\text{fsw}$. Se va utiliza pentru decompresie Tabelul US Navy heliox pentru $p_H = 380\text{fsw}$. La durata scufundării se va adăuga timpul pentru revenirea la adâncimea inițială.

13. Enunț

O presurizare pentru scufundare în saturație la 72msw, este abandonată la 65 msw, când p_{pox} este de 500 mbar. Aveți la dispoziție următoarele tabele pentru scufundări unitare la:

- 66 m utilizând un amestec de 5%;
- 75 m utilizând un amestec de 16%;
- 72 m utilizând un amestec de 20%.

Întrebare

Care este tabelul adecvat pentru decompresia scafandrilor?

Rezolvare

Presurizarea pentru saturația întreruptă la 65msw s-a făcut cu $v=10\text{m/min}$ [Degeratu M., 1998]. În acest caz timpul de coborâre este:

$$\tau_c = \frac{H_0}{v} = \frac{65}{10} = 6.5\text{min} = 6\text{min}30\text{s}$$

*Dintre tabelele puse la dispoziție tabelul **a** are adâncimea de scufundare cea mai apropiată de cea reală. În același timp este foarte importantă presiunea parțială a oxigenului care nu trebuie să depășească $p_{pox} \leq 1600\text{mbar}$, pentru a nu intra în hiperoxie. Se cunoaște presiunea parțială de oxigen la momentul întreruperii saturației:*

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab} = 500\text{mbar} = 0.5\text{bar}$$

$$\text{Pentru } p_H = 65\text{msw} \rightarrow p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = 6.5 + 1 = 7.5\text{bar}$$

Se calculează participația volumică a oxigenului r_{ox} :

$$0.5\text{bar} = r_{ox} \cdot 7.5 \rightarrow r_{ox} = \frac{0.5}{7.5} \cong 0.067 \rightarrow C_{ox} = 6.7\%$$

Calculăm presiunile parțiale de oxigen pentru toate cele trei tabele puse la dispoziție.

$$\text{a. } p_H = 66\text{msw} \rightarrow p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = 6.6 + 1 = 7.6\text{bar} \text{ și } C_{ox} = 5\% \rightarrow r_{ox} = 0.05$$

Presiunea parțială de oxigen este:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab} = 0.05 \cdot 7.6 = 0.38\text{bar} = 380\text{mbar} < 400\text{mbar}.$$

Tabelul a nu este adecvat deoarece p_{pox} trebuie să fie $p_{pox} > 400\text{mbar}$.

$$\text{b. } p_H = 75\text{msw} \rightarrow p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = 7.5 + 1 = 8.5\text{bar} \text{ și } C_{ox} = 16\% \rightarrow r_{ox} = 0.16$$

Presiunea parțială de oxigen este:

$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab} = 0.16 \cdot 8.5 = 1.36\text{bar} = 1360\text{mbar}$$

$$400\text{mbar} < 1360\text{mbar} < 1600\text{mbar}$$

$$\text{c. } p_H = 72\text{msw} \rightarrow p_{ab} = \frac{p_H}{10} + 1 = 7.2 + 1 = 8.2\text{bar} \text{ și } C_{ox} = 20\% \rightarrow r_{ox} = 0.2$$

Presiunea parțială de oxigen este:



$$p_{pox} = r_{ox} \cdot p_{ab} = 0.2 \cdot 8.2 = 1.64\text{bar} = 1640\text{mbar} > 1600\text{mbar} - \text{limita de hiperoxie.}$$

Tabelul adecvat pentru decompresie este **tabelul b**, deoarece are adâncimea cea mai apropiată de cea la care s-a oprit presurizarea, presiunea parțială de oxigen este cea mai mare dar nu depășește valoarea critică de hiperoxie. Se alege concentrația cea mai mare de oxigen admisibilă, astfel încât participația gazului inert fiind mai mică, acesta se elimină mai repede și se scurtează decompresia.

14. Enunț

O presurizare pentru scufundare în saturație este abandonată la 95msw presiune manometrică, când presiunea parțială a oxigenului este de 450 mbar. Aveți tabele pentru scufundări unitare în pași de 3m de la 99 m la 111 m, toate utilizând un amestec de 12%.

Întrebare

Alegeți tabelul adecvat pentru decompresia scafandrilor.

Rezolvare

$$\text{La } p_H = 95\text{msw} \rightarrow p_{ab} = \frac{95}{10} + 1 = 9.5 + 1 = 10.5\text{bar}$$

$$p_{pOx} = 450\text{mbar} = 0.45\text{bar}$$

$$p_{pOx} = r_{Ox} \cdot p_{ab} \rightarrow r_{Ox} = \frac{p_{pOx}}{p_{ab}} = \frac{0.45}{10.5} = 0.043 \rightarrow C_{ox} = 4.3\%$$

$$\text{La } 99\text{msw și } C_{ox} = 12\% \rightarrow r_{Ox} = 0.12$$

$$p_{ab} = \frac{99}{10} + 1 = 9.9 + 1 = 10.9\text{bar} \rightarrow p_{pOx} = r_{Ox} \cdot p_{ab} = 0.12 \cdot 10.9 = \mathbf{1.308\text{bar}}$$

$$\text{La } 102\text{msw și } C_{ox} = 12\% \rightarrow r_{Ox} = 0.12$$

$$p_{ab} = \frac{102}{10} + 1 = 10.2 + 1 = 11.2\text{bar} \rightarrow p_{pOx} = r_{Ox} \cdot p_{ab} = 0.12 \cdot 11.2 = \mathbf{1.344\text{bar}}$$

$$\text{La } 105\text{msw și } C_{ox} = 12\% \rightarrow r_{Ox} = 0.12$$

$$p_{ab} = \frac{105}{10} + 1 = 10.5 + 1 = 11.5\text{bar} \rightarrow p_{pOx} = r_{Ox} \cdot p_{ab} = 0.12 \cdot 11.5 = \mathbf{1.38\text{bar}}$$

$$\text{La } 108\text{msw și } C_{ox} = 12\% \rightarrow r_{Ox} = 0.12$$

$$p_{ab} = \frac{108}{10} + 1 = 10.8 + 1 = 11.8\text{bar} \rightarrow p_{pOx} = r_{Ox} \cdot p_{ab} = 0.12 \cdot 11.8 = \mathbf{1.416\text{bar}}$$

$$\text{La } 111\text{msw și } C_{ox} = 12\% \rightarrow r_{Ox} = 0.12$$

$$p_{ab} = \frac{111}{10} + 1 = 11.1 + 1 = 12.1\text{bar} \rightarrow p_{pOx} = r_{Ox} \cdot p_{ab} = 0.12 \cdot 12.1 = \mathbf{1.452\text{bar}}$$

Se alege tabelul de 99m, deoarece adâncimea este cea mai apropiată de cea la care s-a oprit presurizarea iar presiunea parțială a oxigenului este $p_{pOx} = 1.308\text{bar}$

1308mbar < 1600mbar - pragul de hiperoxie.

15. Enunț

Un scafandru, aflat în imersiune la 20m adâncime, respiră aer uscat, livrat la presiunea mediului ambiant. Debitul respirator volumic este $\dot{V} = 60 \text{ l/min}$. Se consideră că, în timpul inspirului, aerul se saturează la temperatura corpului uman, 37°C, pentru care presiunea de saturație este $p_s = 0,0628 \text{ bar}$ (ANEXE Tabelul 7) iar căldura latentă specifică de vaporizare este $l_v = 2363000 \text{ J/kg}$ (ANEXE Tabelul 9)

Întrebare

Să se estimeze fluxul termic necesar pentru aducerea aerului uscat la starea de aer saturat, la temperatura corpului uman.

Rezolvare

Presiunea absolută la care se află scafandrul este $p_{am} = 3 \text{ bar}$, deci aceasta este presiunea aerului umed. Umiditatea absolută va fi:

$$x = 0.622 \frac{p_s}{p_{am} - p_s} = 0.622 \frac{0.0628}{3 - 0.0628} = 0.01 \text{ kg/kg}$$

Densitatea aerului la 37°C , la presiune normală este $\rho_N = 1.14 \text{ kg/m}^3$. La presiunea $p_{am} = 3 \text{ bar}$, la aceeași temperatură, densitatea devine ρ_2 .

$$\frac{\rho_0}{p_N} = \frac{\rho_2}{p_{am}}$$

$$\rho_2 = \frac{p_{am}}{p_N} \rho_0 = \frac{3}{1} 1.14 = 3.42 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V} = 60 \text{ l/min} = 60/60 = 1 \text{ l/s} = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Debitul masic de aer uscat este:

$$\dot{m}_a = \rho_2 \cdot \dot{V}$$

Deci, debitul masic de vapori de apă va fi:

$$\dot{m} = \rho_2 \cdot \dot{V} \cdot x$$

Rezultă fluxul de căldură latentă:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot l_v = \rho_2 \cdot \dot{V} \cdot x \cdot l_v$$

$$\dot{Q} = 3.42 \cdot 10^{-3} \cdot 0.01 \cdot 2363 \cdot 10^3 = 80.815 \text{ W} \cong 81 \text{ W}$$

16. Enunț

Un container scufundat, cu peretele plan-paralel, are temperatura atmosferei de la interior $t_i = 30^\circ\text{C}$ și temperatura apei de la exterior este $t_e = 20^\circ\text{C}$. Ambele temperaturi se consideră constante. Aria peretelui este de 10 m^2 , iar fluxul termic transferat este de 2000 W .

Întrebare

- Care este coeficientul global de transfer termic, U ?
- Care este rezistența termică a peretelui, luând în considerare atât conducția, cât și convecția?

Rezolvare

a. Fluxul termic este:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta t$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta t} = \frac{2000}{10 \cdot (30 - 20)} = 20 \text{ W/m}^2\text{C}$$

b. Relația dintre coeficientul global de transfer termic și rezistența termică se observă din egalitatea:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta t = A \frac{t_i - t_e}{R} \rightarrow U = \frac{1}{R}$$

Rezistența termică va fi:

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{20} = 0.05 \text{ m}^2\text{C/W}$$



17. Enunț

Un scafandru autonom se mișcă, în imersiune, la adâncimea de 10m, timp de 15min. Gazul respirator este aer uscat, livrat de detentor la presiunea mediului ambiant. Scafandru poartă costum de neopren de 5mm, astfel că rezistența termică la nivel cutanat (inclusiv filmul de apă și stratul de neopren) este $R_p = 0.105 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$. El are vârsta de 30 de ani, masa de 90 kg

și înălțimea de 180 cm. Căldura specifică a corpului uman se consideră $c_b = 3470 \text{ J} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Scafandru respiră aer de la detentor, cu debitul respirator $\dot{V}_{(p)} = 20 \text{ l} / \text{min}$. Temperatura apei mării este $t_e = 15^\circ\text{C}$, iar temperatura inițială a scafandrului este $t_0 = 37^\circ\text{C}$

Întrebare

Care va fi temperatura finală a scafandrului după cele 15min de scufundare?

Rezolvare

Caracteristicile fizice, la presiunea absolută de 2 bar (10msw) sunt:

- Căldura specifică latentă a apei este $l_v = 2385000 \text{ J} / \text{kg}$ (ANEXE Tabelul 9)
- Căldura specifică izobară a aerului uscat $c_p = 1004 \text{ J} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (ANEXE Tabelul 6);
- Conținutul de umiditate al aerului saturat, la temperatura internă a corpului scafandrului 37°C , este $x = 0.032418 \text{ kg} / \text{kg}$ (ANEXE Tabelul 9)
- Densitatea aerului, la adâncimea considerată, este $\rho_2 = \frac{p_{am}}{p_N} \rho_0 = 2.28 \text{ kg} / \text{m}^3$;
- Debitul respirator, $\dot{V}_{(p)} = 20 \text{ l} / \text{min} = 0.33 \text{ l} / \text{s} = 0.00033 \text{ m}^3 / \text{s}$
- Aria corporală a scafandrului este $A = 2.3 \text{ m}^2$ (vezi ANEXE diagrama DUNN)
- $\tau = 15 \text{ min} = 15 \cdot 60 = 900 \text{ s}$

Se consideră că aerul respirator ajunge la saturație și se încălzește la 37°C , în timpul unei inspirații. Se aplică relația (4.28), soluția ecuației de bilanț termic, care dă variația în timp a temperaturii interne a scafandrului. Se calculează termenii care apar în (4.28).

$$Q_m = 66.473 + 13.7516 \cdot 90 + 5.0033 \cdot 180 - 6.755 \cdot 30 = 2002.06 \text{ kcal}$$

Fluxul termic corespunzător metabolismului bazal al scafandrului este:

$$\dot{Q}_m = Q_m \cdot \frac{4.18 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} = 2002.06 \cdot \frac{4.18 \cdot 1000}{24 \cdot 3600} \cong 97 \text{ W}$$

Se calculează coeficienții a și b pentru soluția ecuației de bilanț termic:

$$a = \frac{\dot{Q}_m - l_v \rho_2 x_{(p)} \dot{V}_{(p)}}{m c_b} = \frac{97 - 2385000 \cdot 2.28 \cdot 0.032418 \cdot 0.00033}{90 \cdot 3470} = 1.24 \cdot 10^{-4} [^\circ\text{C} / \text{s}]$$

$$b = \frac{\frac{A}{R_{(p)}} + \rho_{(p)} c \dot{V}_{(p)}}{m c_b} = \frac{\frac{2.3}{0.105} + 2.28 \cdot 1004 \cdot 0.00033}{90 \cdot 3470} = 0.7256 \cdot 10^{-4} [1 / \text{s}]$$

Scafandru se mișcă, nu se aplică factor de corecție:

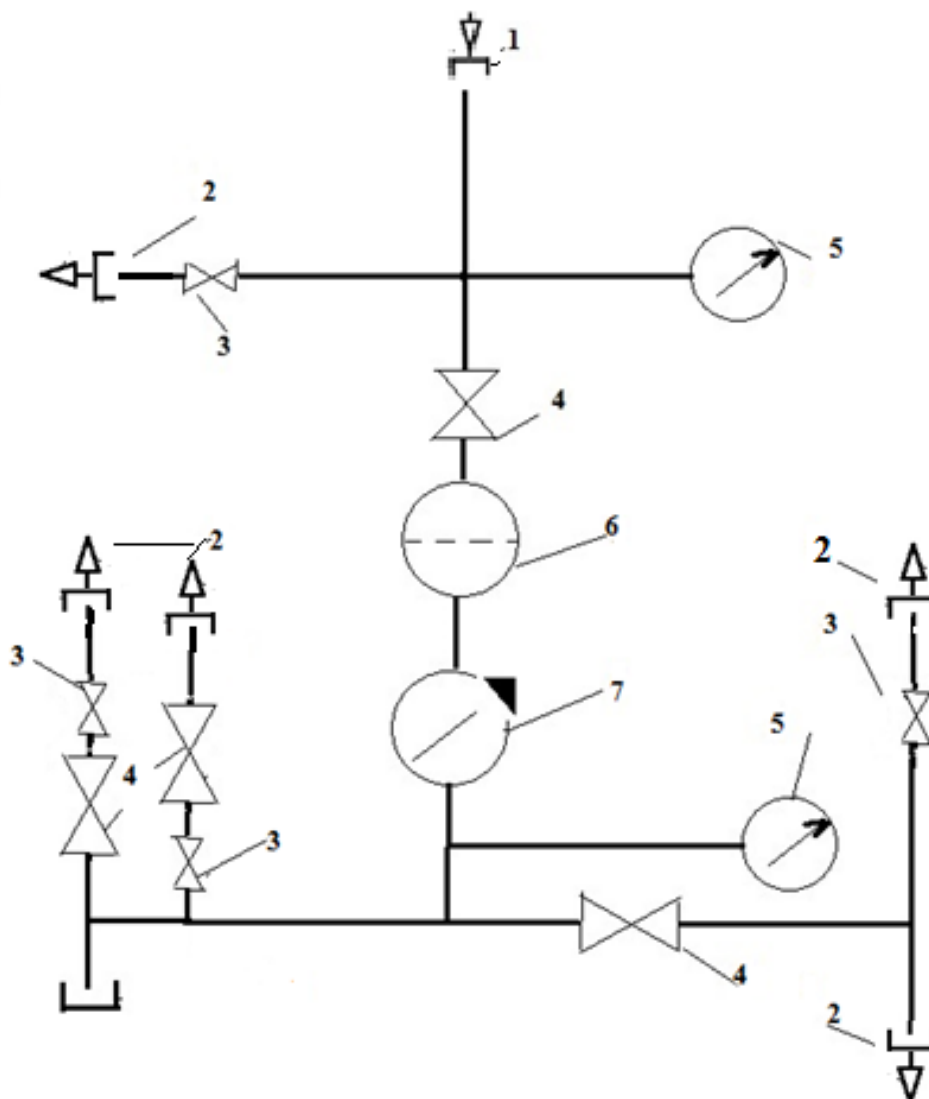
$$t_{(\tau)} = t_a + \frac{a}{b} + \left(t_0 - t_a - \frac{a}{b} \right) e^{-b \cdot \tau}$$

$$t_{(\tau)} = 15 + \frac{1.24 \cdot 10^{-4}}{0.7256 \cdot 10^{-4}} + \left(37 - 15 - \frac{1.24 \cdot 10^{-4}}{0.7256 \cdot 10^{-4}} \right) e^{-(0.7256 \cdot 10^{-4}) \cdot 900} = 35.7^{\circ}\text{C}$$

La momentul $\tau = 15\text{min}$, temperatura interioară scade la valoarea $t = 35.7^{\circ}\text{C}$.

18. Enunț/Întrebare

Este corect circuitul de detentă gaze de mai jos? Justificați.



Tabloul de detentă gaze

1 Cuplă rapidă de intrare 2 Cuplă rapidă de ieșire 3 Vană de purjare
4 Vană de presiune înaltă 5 Manometru 6 Filtru 7 Manodetentor

Rezolvare

Vana de purjare trebuie să fie amplasată întotdeauna înainte de vana de presiune înaltă.
Pe două brațe verticale vanele de purjare sunt amplasate greșit. Circuitul nu este corect.



6.2. Probleme propuse

1. Enunț/Întrebare

Cât timp vor avea la dispoziție aer 3 scafandri, care sunt alimentați de la suprafață, dintr-un rack de 8 de butelii de câte 50l, presurizate la 200bar, când efectuează o scufundare la 50msw? (R: 1h41min).

2. Enunț

Presiunea parțială a oxigenului dintr-o cameră hiperbară presurizată la 80msw trebuie să fie $p_{pO_x} = 800\text{mbar}$.

Întrebări

Care va fi amestecul final și cum se face presurizarea, utilizând două amestecuri 10/90 și de 5/95? ($C_{oxf} = 9\%$, $pH_b = 38\text{msw}$, $pH_s = 42\text{msw}$).

3. Enunț

O bilă metalică plină ($\rho_{otel} = 7860\text{kg/m}^3$), cu raza de 20cm, trebuie să fie ridicată la suprafață cu ajutorul unor parașute subacvatice de 1tf.

Întrebare

Câte parașute sunt necesare pentru desfășurarea operațiunii? (1 parașută)

4. Enunț

O baliză sferică de plastic este scufundată în lac (apă dulce) cu 1/4 din volumul său. Raza balizei este 0,3 m. Baliza cântărește în aer 100 kg.

Întrebare

Cât cântărește ea în apă? (R: 72kg).

5. Enunț

Un scafandru cu alimentare de la suprafață are o butelie de rezervă de 5l presurizată cu aer la 200bar și lucrează la 40msw.

Întrebare

Cât timp are scafandrul la dispoziție pentru revenirea la suprafață, dacă la urgență are un consum mediu de 40l/min? (R: 4min37s)

6. Enunț

O barocameră cu $V_{in} = 30\text{m}^3$ este presurizată la 100msw cu amestec heliox 5/95 peste aerul atmosferic din incintă.

Întrebări

- Ce cantitate de gaz este necesară pentru atingerea adâncimii planificate? (R: 300m³)
- Ce valori vor avea presiunea parțială a oxigenului și concentrația lui? (R: 710mbar; 6%)

7. Enunț

Un rezervor de 523l care este presurizat cu 90msw amestec, este cuplat la alt rezervor sferic, cu raza $R = 75\text{cm}$ și care este presurizat cu 75msw amestec.

Întrebare

Care va fi presiunea manometrică după echilibrarea celor două rezervoare?

(R: 78.42msw)

8. Enunț

O turelă este presurizată, peste aerul atmosferic, la 70msw cu amestecul 1 de 5% oxigen.

Presurizarea se continuă cu amestecul 2 de 3% oxigen, până la 100msw.

Întrebare

Ce presiune parțială și ce concentrație are oxigenul la finalul presurizării?

(R: 650mbar; 6%)

9. Enunț

Pentru planificarea unei scufundări la 70msw se calculează rezervele de gaz. Turela are volumul inundabil $V_t = 30m^3$. La scufundarea în saturatie participă 3 scafandri.

Întrebări

- a. Care este volumul de gaz liber care trebuie utilizat pentru presurizare? (R: $210m^3$)
- b. Ce amestec de presurizare se utilizează, astfel încât presiunea parțială finală a oxigenului să fie 450mbar? (R: 3.4%)
- c. Care este cantitatea de oxigen metabolic care trebuie asigurată pentru cei 3 scafandri participanți la saturația de 5 zile? (R: $10.8m^3$)
- d. Ce volum de amestec respirator de urgență trebuie asigurat pentru măștile de palier (BIBS - built-in breathing system)? (R: $14.4m^3$ am. 16%)

10. Enunț

La finalul presurizării unei barocamere la 75msw, temperatura a crescut la $36^{\circ}C$. După un timp temperatura s-a stabilizat la $25^{\circ}C$.

Întrebări

Ce valoare indică după presurizare manometrul și care este cantitatea de gaz care trebuie completată pentru a reveni la adâncimea inițială, dacă barocamera are volumul inundabil $V_b = 20m^3$? (R: 72msw; $6m^3$)

11. Enunț

3 scafandri sunt în saturație la 90msw într-o turelă de $15m^3$ și presiunea parțială a oxigenului este 500mbar.

Întrebare

După cât timp scade presiunea parțială a oxigenului la 450mbar, dacă nu se mai completează oxigen? (R: 8h20min)

12. Enunț

Presurizarea unei turele se face cu amestec heliox 6/94 peste aerul atmosferic, până la 50msw, unde se staționează 5min. Se trece la următorul palier de 90msw, prin presurizarea cu amestec heliox 4/96.

**Întrebări**

- Care sunt presiunea parțială a oxigenului și concentrația acestuia la primul palier?
($R: p_{pOx1} = 570\text{mbar}, C_{Ox1} = 9.5\%$)
- Care vor fi valorile p_{pOx} și C_{Ox} la palierul de 90msw?
($R: p_{pOxf} = 730\text{mbar}, C_{Oxf} = 7.3\%$)
- Dar presiunea parțială a azotului? ($R: p_{pN} = 790\text{mbar}$)
- Dacă avem la dispoziție doar tabele de decompresie US Navy, ce tabel vom utiliza pentru revenirea la suprafață? ($R: 300\text{fsw}$ cu $\tau_f = 20\text{min}$)

13. Enunț

O presurizare pentru scufundarea în saturație la 90msw, este abandonată la 85 msw, când p_{pox} este de 450 mbar. Aveți la dispoziție următoarele tabele pentru scufundări unitare la:

- 81 m utilizând un amestec de 15%;
- 87 m utilizând un amestec de 6%;
- 87 m utilizând un amestec de 10%.

Întrebare

Care este tabelul adecvat pentru decompresia scafandrilor? ($R: c$)

14. Enunț

O presurizare pentru scufundarea în saturație este abandonată la 75 msw, când presiunea parțială a oxigenului este de 500 mbar. Aveți tabele pentru scufundări unitare în pași de 3 m de la 81 m la 90 m, toate utilizând un amestec de 8%.

Întrebare

Alegeți tabelul adecvat pentru decompresia scafandrilor. ($R: 81m$)

15. Enunț

Un scafandru, aflat la adâncimea de 20m, respiră aer cu debitul $\dot{V} = 0,8 \text{ l/s}$. Temperatura corpului uman $t = 37^\circ\text{C}$, densitatea aerului la presiune normală este $\rho = 1.14 \text{ kg/m}^3$. Temperatura apei mării este $t_a = 20^\circ\text{C}$.

Întrebare

Ce flux termic este necesar pentru a încălzi aerul inspirat, dacă se consideră că aerul se încălzește de la temperatura mediului (apei de mare) până la cea a corpului uman? ($R: 48.37 \text{ W}$)

16. Enunț

Un scafandru autonom stă în imersiune, la 30m adâncime. Gazul respirator este aer uscat, livrat de detentor la presiunea mediului ambiant, cu $\dot{V} = 20\text{l/min}$. Scafandru poartă costum de neopren, astfel că rezistența termică la nivel cutanat (inclusiv filmul de apă și stratul de neopren de 7mm) este $R_p = 0.079 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$. El are vârsta de 29 de ani, masa de 80 kg și înălțimea de

1.8 m. Căldura specifică a corpului uman se consideră $c_b = 3470 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$.

Temperatura apei mării este $t_e = 15^\circ\text{C}$, iar temperatura internă, inițială, a scafandrului este $t_o = 37^\circ\text{C}$. Se consideră că aerul respirator ajunge la saturație și se încălzește la 37°C , în timpul unei inspirații.

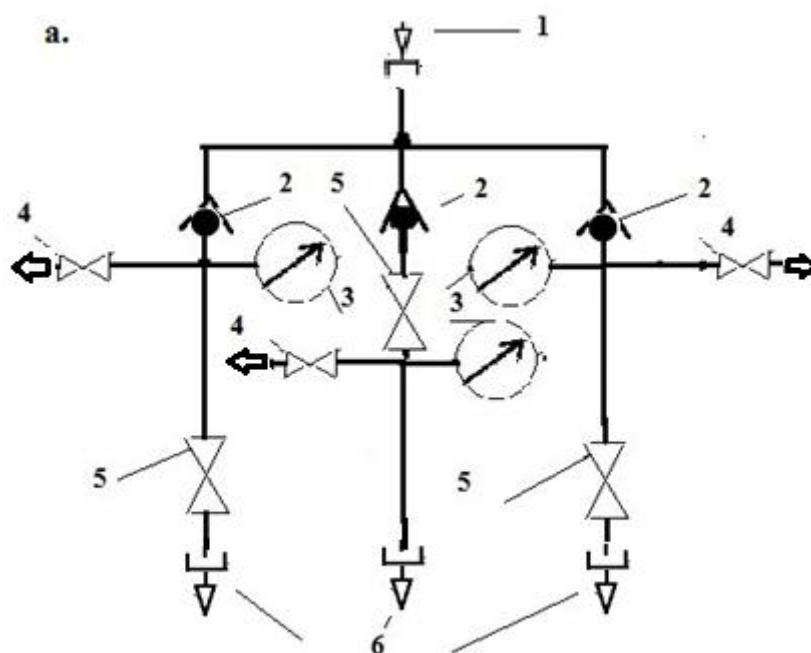
Întrebare

La ce valoare ajunge temperatura internă a scafandrului după $\tau = 30\text{min}$, dacă el rămâne în repaus, în mare, la 30m adâncime? (R: 33.5°C).

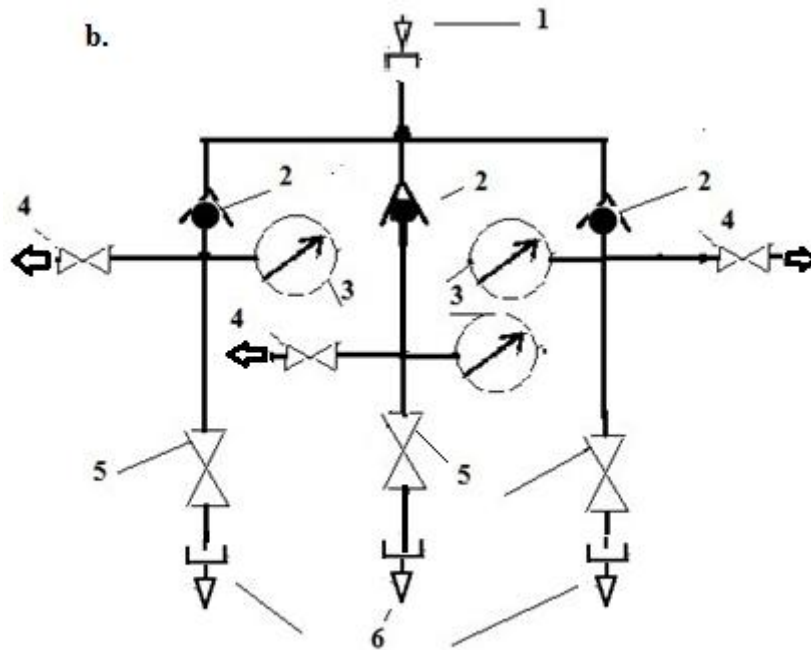
17. Enunț/ Întrebare

Care variantă de circuit pneumatic din cele 3 este corectă și de ce? Justificați.

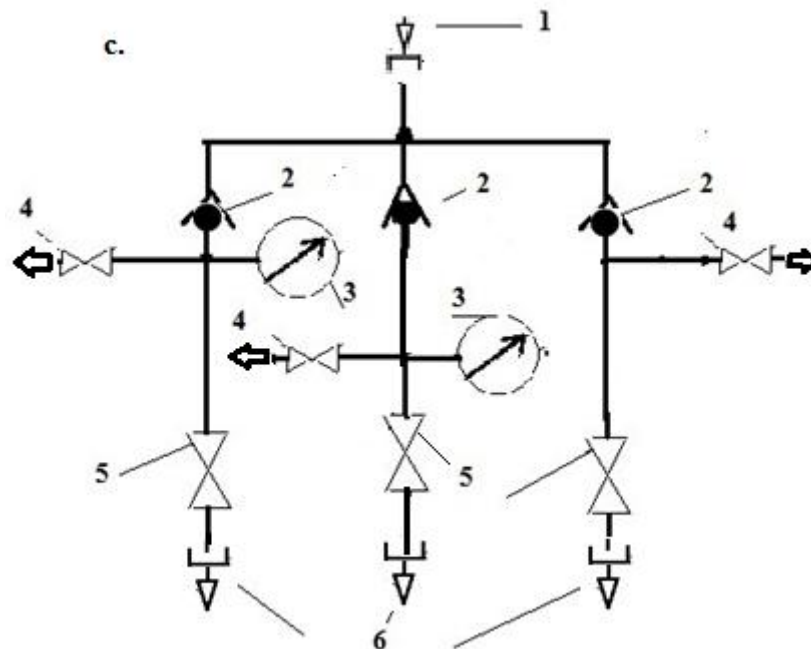
(R: b)



1 cuplă rapidă de intrare 2 Supapă de sens 3 Manometru de presiune 4 Vană de purjare
5 Vană de presiune înaltă 6 Cuplă rapidă de ieșire



1 cuplă rapidă de intrare 2 Supapă de sens 3 Manometru de presiune 4 Vană de purjare
5 Vană de presiune înaltă 6 Cuplă rapidă de ieșire



1 cuplă rapidă de intrare 2 Supapă de sens 3 Manometru de presiune 4 Vană de purjare
5 Vană de presiune înaltă 6 Cuplă rapidă de ieșire

ANEXE

Tabelul 1 Decompresie cu aer LH-82
fără durată totală a ridicării [Petrut A., 1992]

Adâncime (m)	Durata scuf. (min)	Paliere (min)						Coef. C
		18m	15m	12m	9m	6m	3m	
9	20							1.1
	40							1.2
	70							1.3
	100							1.4
	120							1.5
12	15							1.1
	30							1.2
	50							1.3
	70							1.4
	90							1.5
	120							1.6
15	10							1.1
	25							1.2
	40							1.3
	50							1.4
	70							1.5
	80							1.6
	90						3	1.6
	100						5	1.7
	110						8	1.7
	120						10	1.7
18	10							1.1
	20							1.2
	30							1.3
	40							1.4
	50							1.5
	60						1	1.6
	70						7	1.6
	80						12	1.7
	90						16	1.7
	100						19	1.8
	110						22	1.8
	120						23	1.9
21	5							1.1
	15							1.2
	25							1.3
	30							1.4
	40							1.5
	50						5	1.6
	60						13	1.6
	70						19	1.7



	80						24	1.8
	90						27	1.8
	100						28	1.9
	110						31	1.9
	120						37	1.9
24	5							1.1
	15							1.2
	20							1.3
	30							1.4
	40						5	1.5
	50						15	1.6
	60						23	1.7
	70					2	27	1.8
	80					7	28	1.8
	90					12	29	1.9
	100					15	36	1.9
	110					18	43	1.9
	120					20	48	1.9
27	5							1.1
	10							1.2
	20							1.3
	25							1.4
	30						3	1.5
	40						13	1.6
	50						23	1.7
	60					6	28	1.7
	70					13	28	1.8
	80					17	31	1.9
	90					22	38	1.9
	100				2	23	46	1.9
	110				2	23	52	1.9
30	5							1.1
	10							1.2
	20							1.3
	25						2	1.4
	30						7	1.5
	40						21	1.6
	50					4	28	1.7
	60					14	28	1.8
	70					21	30	1.8
	80				2	23	41	1.9
	90				9	23	48	1.9
	100				12	23	55	1.9
33	5							1.1
	10							1.2
	15							1.3
	20						1	1.4

CULEGERE DE EXERCII ȘI PROBLEME PENTRU PREGĂTIREA SCAFANDRILOR (VOLUMUL 2)							2019
---	--	--	--	--	--	--	-------------

	25						7	1.5
	30						13	1.6
	40					4	24	1.6
	50					13	28	1.7
	60				1	20	28	1.8
	70				7	23	29	1.9
	80				12	23	48	1.9
	90				17	23	57	1.9
36	5							1.1
	10							1.2
	15							1.3
	20						3	1.4
	30					1	18	1.6
	40					8	28	1.7
	50				2	18	28	1.8
	60				7	23	35	1.8
	70				14	23	47	1.9
	80				20	30	50	1.9
39	5							1.1
	10							1.2
	15						2	1.3
	20						5	1.4
	25					1	13	1.5
	30					4	21	1.6
	40				1	14	28	1.7
	50				4	23	28	1.8
	60				14	23	40	1.9
	70			2	20	30	48	1.9
	80			9	20	35	57	1.9
42	5							1.2
	10							1.3
	15						3	1.4
	20					1	7	1.5
	25					3	17	1.6
	30					7	25	1.6
	40				4	16	28	1.7
	50			1	9	23	36	1.8
	60			3	19	23	46	1.9
	70			10	20	30	54	1.9
	80							1.9
45	5							1.2
	10						1	1.3
	15						4	1.4
	20					2	9	1.5
	25					6	19	1.6
	30				2	8	28	1.7
	40				5	23	28	1.8
	50			4	15	23	40	1.8
	60							1.8

CENTRUL DE SCAFANDRI



	60			9	20	30	49	1.9
	70		1	16	20	33	57	1.9
48	5							1.2
	10						1	1.3
	15					1	4	1.4
	20					3	23	1.5
	25				2	6	23	1.6
	30				5	11	28	1.7
	40			3	8	22	32	1.8
	50			6	19	23	46	1.9
	60		3	12	20	30	57	1.9
51	5							1.2
	10						3	1.3
	15					2	5	1.5
	20				1	4	7	1.5
	25				3	9	26	1.6
	30			1	5	14	28	1.7
	40			5	11	23	36	1.8
	50		3	7	20	32	46	1.9
	60		4	18	20	35	69	1.9
54	5							1.2
	10						3	1.3
	15					3	6	1.5
	20				2	5	19	1.6
	25			1	4	8	28	1.7
	30			2	8	16	28	1.7
	40		1	7	14	23	41	1.8
	50		5	14	20	35	56	1.9
	60	2	7	18	20	38	77	1.9
57	5							1.2
	10					1	2	1.3
	15				1	4	7	1.5
	20				3	7	21	1.6
	25			2	5	11	28	1.7
	30		1	2	8	20	28	1.8
	40		4	7	16	23	55	1.8
	50	2	6	14	20	30	65	1.9
60	5						1	1.2
	10					1	4	1.4
	15				2	4	10	1.5
	20			1	4	7	24	1.6
	25			3	7	13	28	1.7
	30		1	5	8	21	28	1.8
	40	1	5	7	19	30	45	1.8
	50	4	6	17	20	34	70	1.9

**Tabelul 2 valoarea coeficientului real C_r
pentru scufundări succesive, respirând aer [Petr A., 1992]**

Timpul de sup. (min)	Coeficientul C inițial									
	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
	Coeficientul real C_r corespunzător timpului de suprafață									
10	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
20	1.9	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
30	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1
40	1.8	1.7	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1
50	1.8	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1
60	1.7	1.7	1.6	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1
80	1.7	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1
100	1.6	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.1
120	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1
150	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1
180	1.4	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1
240	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1
300	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1
360	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1

**Tabelul 3 timpul de majorare
a duratei scufundării [Petr A., 1992]**

Adâcimea scuf. succs(m)	Coeficientul C_r din Tabelul 2 sau 4									
	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
	Timpul de majorare (h:min)									
12	5:10	4:00	3:11	2:32	2:00	1:34	1:11	0:50	0:32	0:16
15	3:10	2:40	2:26	2:13	1:29	1:11	0:54	0:39	0:25	0:12
18	2:20	2:00	1:52	1:26	1:11	0:57	0:44	0:32	0:21	0:11
21	1:55	1:38	1:23	1:11	0:59	0:48	0:37	0:27	0:18	0:09
24	1:35	1:22	1:11	1:00	0:50	0:41	0:32	0:24	0:16	0:08
27	1:20	1:11	1:01	0:53	0:44	0:36	0:28	0:21	0:14	0:07
30	1:11	1:02	0:54	0:47	0:39	0:32	0:25	0:19	0:12	0:06
33	1:05	0:56	0:49	0:42	0:35	0:29	0:23	0:17	0:11	0:06
36	0:57	0:50	0:44	0:38	0:32	0:26	0:21	0:16	0:11	0:05
39	0:52	0:46	0:40	0:35	0:29	0:24	0:19	0:14	0:10	0:05
42	0:48	0:42	0:37	0:32	0:27	0:22	0:18	0:13	0:09	0:05
45	0:44	0:39	0:34	0:30	0:25	0:21	0:17	0:12	0:08	0:05
48	0:41	0:36	0:32	0:28	0:24	0:20	0:16	0:12	0:08	0:04
51	0:38	0:34	0:30	0:26	0:22	0:18	0:15	0:11	0:07	0:04
54	0:36	0:32	0:28	0:25	0:21	0:17	0:14	0:11	0:07	0:04
57	0:34	0:30	0:27	0:23	0:20	0:16	0:13	0:10	0:07	0:04
60	0:32	0:29	0:25	0:22	0:19	0:16	0:12	0:09	0:06	0:03



**Tabelul 4 valoarea coeficientului real C_r
pentru scufundări succesive, respirând oxigen [Petru A., 1992]**

Timpul de sup. (min)	Coeficientul C inițial								
	2	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2
	Coeficientul real C_r corespunzător timpului de suprafață								
10	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2
20	1.8	1.7	1.6	1.6	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2
30	1.7	1.6	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
40	1.6	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1.1
50	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1	
60	1.4	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1		
70	1.4	1.3	1.2	1.2	1.1	1			
80	1.3	1.2	1.2	1.1	1				
90	1.2	1.2	1.1	1					
100	1.1	1.1	1						
110	1.1	1							
120	1								

**Tabelul 5 Grupele succesive pentru scufundări la altitudine (701=1500m) fără durata
ridicării [Petru A., 1992]**

H (m)	Durata scuf. (min)	Timp ridicare primul palier (min)	Palier (min)							Gr. succe sivă
			18m	15m	12m	9m	6m	4m	2m	
9	180	1								G
12	90	1								G
	100	1							2	G
	110	1							6	G
	120	1							10	G
	130	1							13	G
	140	1							15	G
	150	1							17	H
15	63									F
	70	1.2							4	G
	80	1.2							9	G
	90	1.2							15	G
	100	1.2							20	G
	110	1.2							24	G
	120	1.2							27	H
18	43									F
	50	1.7							2	F
	60	1.7							9	G
	70	1.7							17	G
	80	1.7							24	G

CULEGERE DE EXERCII ȘI PROBLEME PENTRU PREGĂTIREA SCAFANDRILOR (VOLUMUL 2)									2019
---	--	--	--	--	--	--	--	--	-------------

	90	1.3							27	G
	100	1.3							30	H
	110	1.3							31	H
	120	1.3							33	H
21	30									F
	40	1.8							3	F
	50	1.8							11	G
	60	1.7						1	20	G
	70	1.7						5	25	G
	80	1.7						9	29	H
	90	1.7						14	30	H
	100	1.5					6	17	32	H
	110	1.5					6	19	36	H
24	25									E
	30	2.2							3	E
	40	2						1	9	F
	50	2						3	18	G
	60	2						8	25	G
	70	1.8					2	12	29	H
	80	1.8					6	15	30	H
	90	1.8					10	18	34	H
	100	1.5				2	12	20	39	H
27	18									E
	25	2.5							3	E
	30	2.3						1	5	F
	40	2.3						3	14	G
	50	2.2					2	7	24	G
	60	2.2					5	11	29	G
	70	1.8				1	9	15	30	H
	80	1.8				4	11	19	35	H
	90	1.8				8	14	20	40	J
30	16									E
	20	2.8							3	E
	25	2.7						1	5	F
	30	2.7						3	8	F
	40	2.3					2	7	19	G
	50	2.2					5	11	27	G
	60	2.2				1	9	15	30	H
	70	2.2				4	11	19	35	H
	80	2.2				8	14	20	41	J
33	14									E
	20	2.8						1	4	E
	25	2.7					1	3	6	F
	30	2.7					2	4	12	G
	40	2.3				2	4	7	24	G
	50	2.3				4	7	12	30	H
	60	2.3			1	8	11	19	35	H

CENTRUL DE SCAFANDRI



	70	2.2			4	12	14	20	41	J
36	11									D
	15	3.3							4	E
	20	3.2						3	5	F
	25	3					2	3	10	G
	30	2.7				2	3	4	16	G
	40	2.7				4	5	11	26	G
	50	2.3			1	8	10	15	30	H
	60	2.3			4	12	12	20	38	J
39	10									D
	15	3.5						1	4	E
	20	3.3					2	3	6	F
	25	3				2	3	3	13	G
	30	3				3	4	6	20	G
	40	2.7			2	6	6	12	30	H
	50	2.7			5	9	11	18	34	H
	55	2.7			6	12	13	18	40	J
42	15	3.8						3	4	F
	20	3.3				1	3	3	8	G
	25	3.3				3	3	5	16	G
	30	3			2	4	4	8	24	G
	40	2.7		1	3	8	9	14	30	H
	50	2.7		2	6	13	14	20	38	J
45	10	4.3							3	D
	15	3.8					2	3	4	F
	20	3.7				3	3	4	12	F
	25	3.3			2	3	4	6	20	G
	30	3.3			3	5	5	10	27	G
	40	3.0		2	5	9	11	16	31	H
48	10	4.3						1	4	D
	15	3.8				1	2	3	6	F
	20	3.7			1	3	3	4	15	G
	25	3.7			3	4	4	8	23	G
	30	3.3		2	3	6	6	12	29	H
	40	3.3	1	3	6	11	12	19	35	J
51	10	4.7						2	4	E
	15	4.2				2	3	3	7	G
	20	3.8			2	4	4	5	17	G
	25	3.7		1	4	5	5	9	26	H
	30	3.7		3	4	7	8	13	30	H
	40	3.3	2	5	7	13	14	19	39	J
54	10	4.8					1	3	4	E
	15	4.5				3	3	4	10	G
	20	4.2			3	4	4	6	21	G
	25	3.8		3	3	6	6	11	28	H
	30	3.7	2	3	5	8	10	15	31	H
	35	3.7	3	4	6	12	12	20	36	J

**Tabelul 6 Călduri specifice ale diferitelor substanțe, la presiune normală
[Leonăchescu N, 1981]**

Nr.	Substanța	Căldură specifică [$J/kg \cdot ^\circ C$]	
		izobară	izocoră
1	Aer	1004	717
2	Azot	1039,5	742,5
3	Oxigen	910	650
4	Heliu	5192,5	3115,5
5	Hidrogen	14028,4	9902,4
6	Dioxid de carbon	831,6	642,6
7	Apă	4182	
8	Vapori de apă	1860	1398,1

**Tabelul 7 Temperaturi și presiunile de saturație corespunzătoare ale apei
[Leonăchescu N, 1981]**

temperatură de saturație $t_s [^\circ C]$	presiune de saturație $p_s [mbar]$	temperatură de saturație $t_s [^\circ C]$	presiune de saturație $p_s [mbar]$	temperatură de saturație $t_s [^\circ C]$	presiune de saturație $p_s [mbar]$
0,01	6,108	15	17,041	30	42,41
1	6,566	16	18,170	31	44,91
2	7,054	17	19,364	32	47,53
3	7,575	18	20,62	33	50,29
4	8,129	19	21,96	34	53,18
5	8,719	20	23,37	35	56,22
6	9,347	21	24,86	36	59,40
7	10,013	22	26,43	37	62,74
8	10,721	23	28,08	38	62,74
9	11,473	24	29,82	39	69,91
10	12,277	25	31,66	40	73,75
11	13,118	26	33,60	100	1013
12	14,016	27	35,64	102	1087,6
13	14,967	28	37,79	105	1207,9
14	15,974	29	40,04	110	1988,6



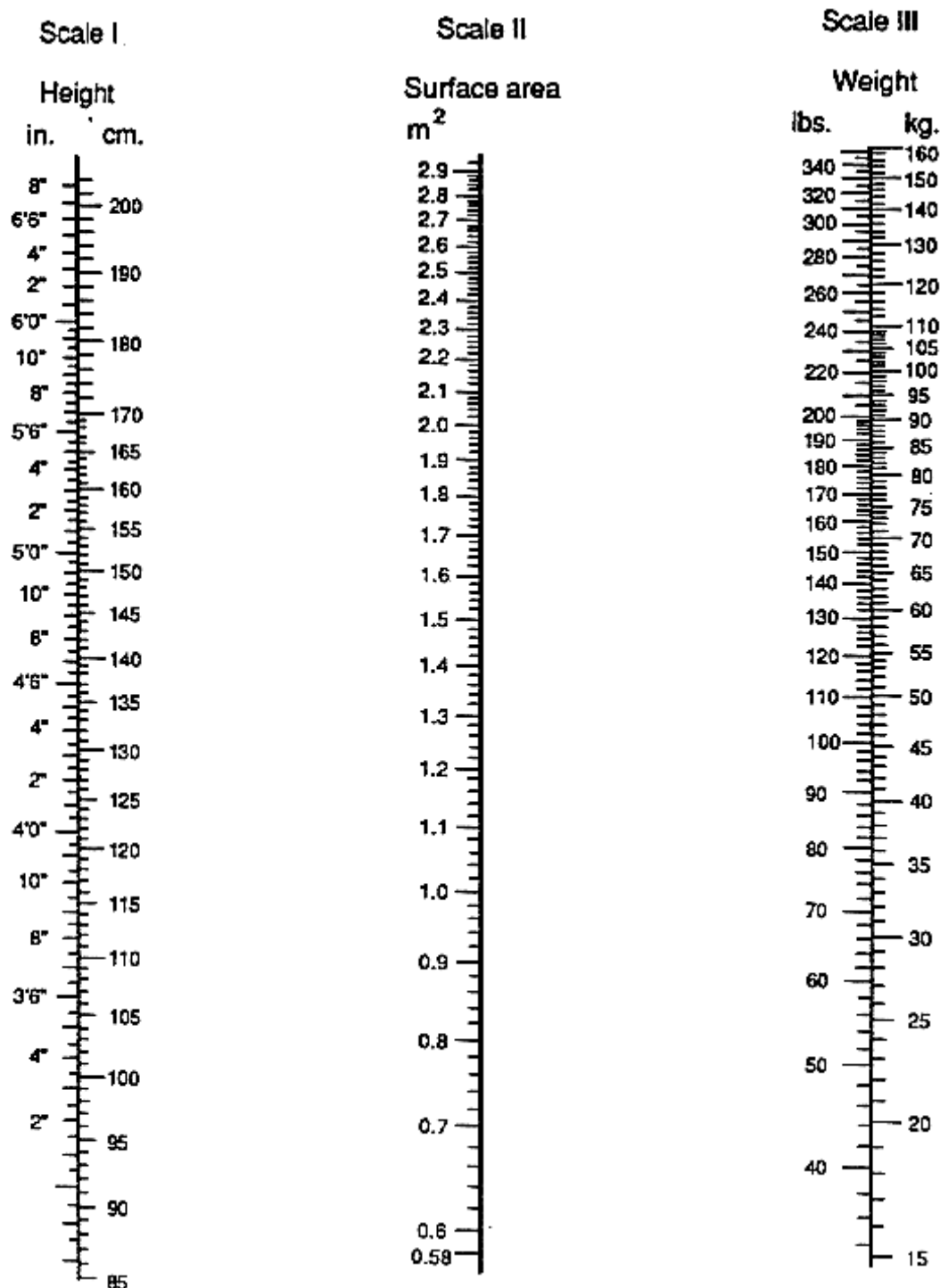
Tabelul 8 Coeficientul de conductivitate termică, λ , pentru câteva tipuri de material
[Beckman E. L., 1964], [Leonăchescu N., 1981]

Nr.	Material	$\lambda \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$
1	Fetru uscat	1,36-1,30
2	Nylon	0,79-0,57
3	Apă	0.61
4	Cauciuc neoprenic	0,62-0,57
5	Cauciuc natural	0,45
6	Cauciuc siliconic	0,63-0,62
7	Neopren poros	0,216-0,12
9	Neopren cu 30% aer	0,127-0,141
10	Cauciuc natural poros	0,11-0,12
11	Oțel carbon	43

Tabelul 9. Valorile căldurii specifice latente și ale umidității absolute a aerului saturat la 37°C, în funcție de presiunea la care este livrat aerul respirator
[<http://www.efunda.com>]

Presiunea, p [bar]	Căldura specifică latentă, l_v $\left[\frac{J}{kg} \right]$	Conținutul de umiditate absolută, x, $\left[\frac{kg}{kg} \right]$
1	2414000	0,067008
2	2385000	0,032418
3	2363000	0,021381
4	2346000	0,01595
5	2334000	0,01272
6	2322000	0,010577
7	2313000	0,009053

Diagrama BSA (body surface area) DUNN / DuBois [Redlarski G., 2013]



Utilizare: Se unesc, printr-o linie dreaptă, punctele corespunzătoare înălțimii (scala I) și a masei corporale (scala III). Punctul în care această linie intersectează scala II, dă valoarea ariei suprafeței corporale.

**REFERINȚE BIBLIOGRAFICE**

- [1] Beckman E. L., “Thermal protection during immersion in cold water”, pg. 252, 260, Research Report 1, National Naval Medical Center, Second Symposium on Underwater Physiology, Academy of Sciences, Maryland, USA, 1964
- [2] Bennett P. B., Elliott’s, Physiology and Medicine of Diving, 5th Edition., Saunders, Edinburgh, 2003.
- [3] Constantin A., Termotehnică, Ovidius University Press, Constanța, 2002.
- [4] Constantin A., Stanciu T., Transient heat transfer in subsea hyperbaric environment, 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Marine and Ocean Ecosystems, pag. 871, Albena Bulgaria, 2013.
- [5] Degeratu M., Petru A., Georgescu Șt., Ioniță S., Tehnologii hiperbare pentru scufundări unitare și în saturație, MATRIX ROM, București, 2008.
- [6] Degeratu M., Petru A., Ioniță Sergiu, Manualul scafandrului, Editura Per Omnes Artes, București, 1999.
- [7] Dinu D., Vlad C., Scafandri și vehicule subacvatice, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986.
- [8] Goodman M. W. et al., Hyperbaric respiratory heat loss study, Westinghouse Research Report, Office of Naval Research Report, 1971.
- [9] International Marine Contractors Association, Diving in contaminated waters, IMCA Publications Team, 2004.
- [10] Leonăchescu N., Termotehnica, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [11] NOAA Diving Manual, pag. 2-10, www.ntis.gov, Department of Commerce US, 2005.
- [12] Petru A., Degeratu M., Ioniță S., Ghidul scafandrului autonom, pag. 18 – 53, Olimp-Press, București, 1992.
- [13] Redlarski G. and Tojza P. M., „Computer supported analysis of the human body surface area”, International Journal of Inovative Computing, Information and Control, vol. 9, pg. 1804, May 2013.
- [14] Shepard Roy J., “Physical Performance and Dietary Restriction”, pg. 16, www.books.google.ro, 2015
- [15] Stanciu T., Teză de doctorat „Cercetări privind transferul de gaze în tehnologiile de scufundare”, Constanța, 2018.
- [16] Statul Major al Marinei Militare, Norme privind pregătirea, organizarea și protecția muncii în activitatea de scufundare, 1996.
- [17] US Navy Diving Manual, Causes of Breathing Resistance, Revision 7, Published by Direction of Commander Naval Sea Systems Command, 2017.
- [18] <http://www.draeger.com>, Draeger Tubes & CMS Handbook, pag. 4, 2017
- [19] http://www.efunda.com/materials/water/steamtable_sat.cfm

Erată: Volumul 1, Capitolul 3 Flotabilitatea – 3.3. Probleme propuse nr. 7: răspunsul este R: 30kg.