MIRCEA DEGERATU
Laureat al Premiului „Hermann Oberth” al
Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România

ARON PETRU **SERGIU IONIŢĂ**

CALCULUL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România
Bucureşti, 2019

Referent ştiinţific: Comandor, CS III, drd. ing. Mihai DIACONU
Centrul de Scafandri Constanța
Forțele Navale Române

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
DEGERATU, MIRCEA
Calculul aparatelor speciale de respirat sub apă / Mircea Degeratu..., Aron Petru, Sergiu Ioniţă. - Bucureşti : Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România, 2019
Conţine bibliografie
ISBN 978-606-8636-59-7

I. Petru, Aron
II. Ioniţă, Sergiu

62

Coperta 1: Scafandri de incursiune ai Centrului de Scafandri Constanța din cadrul Forțelor Navale Române, echipați cu aparate de respirat sub apă cu oxigen, în circuit închis

Copyright ©Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România, 2019

În memoria **Viceamiralului ing. Ilie Ștefan**
fost Comandant al Centrului de Scafandri Constanța
din cadrul Forțelor Navale Române

Mircea DEGERATU

Aron PETRU **Sergiu IONIȚĂ**

CALCULUL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

CUPRINS

PREFAȚĂ **9**
1. GAZE UTILIZATE LA APARATELE SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ **11**
1.1. Date generale privind gazele utilizate în scufundarea cu aparate special 11
1.2. Caracteristicile gazelor utilizate în scufundarea cu aparate special 13
1.2.1. Oxigenul şi efectele acestuia 13
1.2.1.1. Caracteristicile oxigenului 13
1.2.1.2. Efectele oxigenului asupra scafandrilor 15
1.2.2. Azotul şi efectele acestuia 21
1.2.2.1. Caracteristicile azotului 21
1.2.2.2. Efectele azotului asupra scafandrilor 23
1.2.3. Heliul şi efectele acestuia 24
1.2.3.1. Caracteristicile heliului 24
1.2.3.2. Efectele heliului asupra scafandrilor 25

2. AMESTECURI DE GAZE UTILIZATE LA APARATELE SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ **27**
2.1. Amestecuri respiratorii binare şi ternare 27
2.2. Fabricarea amestecurilor respiratorii 28
2.2.1. Fabricarea amestecurilor respiratorii binare 28
2.2.1.1. Fabricarea unui amestec binar NITROX pornind de la gaze pure: oxigen şi azot 30
2.2.1.2. Fabricarea unui amestec NITROX din oxigen şi aer 31
2.2.1.3. Fabricarea unui amestec HELIOX din heliu şi oxigen 32
2.2.1.4. Fabricarea unui amestec HELIOX din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure 32
2.2.2. Fabricarea amestecurilor respiratorii ternare 33
2.3. Corectarea amestecurilor de gaze 33
2.3.1. Corectarea unui amestec HELIOX prea sărac în oxigen 34
2.3.2. Corectarea unui amestec HELIOX prea bogat în oxigen 34
2.3.3. Corectarea unui amestec NITROX prea sărac în oxigen 35
2.3.4. Corectarea unui amestec NITROX prea bogat în oxigen 36
2.4. Procedee şi instalaţii pentru prepararea amestecurilor respiratorii 37
2.4.1. Procedeu şi instalaţie de preparare a amestecului respirator NITROX prin injecţie succesivă de oxigen şi aer 37

2.4.2. Procedeu şi instalaţie de preparare a amestecului respirator NITROX prin injecţie succesivă în două etape 38
2.4.3. Procedeu şi instalaţie de preparare a amestecului respirator NITROX prin separarea azotului cu ajutorul membranelor 42
2.4.4. Procedeu şi instalaţie de preparare a amestecului respirator NITROX prin omogenizarea continuă a gazelor componente 43
2.4.5. Procedeu şi instalaţie de preparare a amestecului respirator TRIMIX prin omogenizarea continuă a gazelor componente 45
2.4.6. Procedeu şi instalaţie de preparare a amestecului respirator în flux continuu prin injecţia gazelor componente la debit masic constant 46
2.5. Omogenizarea amestecurilor de gaze..... 48
2.6. Înlocuirea amestecurilor respiratorii 49

3. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS ŞI ÎNCHIS 51
3.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis. Generalităţi 51
3.2. Tipuri de aparate de respirat sub apă cu circuit deschis 51
3.2.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, autonome 51
3.2.1.1. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor COMEX SUPER-PHYSALIE 52
3.2.1.2. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor SHARK 54
3.2.1.3. Aparatul cu circuit deschis, autonom, MODULAR 600 54
3.2.1.4. Aparatul cu circuit deschis, autonom, PA 38 55
3.2.2. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, cu alimentare de la suprafaţă 56
3.2.2.1. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 70 ... 57
3.2.2.2. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă K21 MOD 1 59
3.2.2.3. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, ISAS 60
3.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis. Generalităţi 62
3.4. Tipuri de aparate de respirat sub apă cu circuit închis 62
3.4.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis, cu oxigen 63
3.4.1.1. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, LAR VI 63
3.4.1.2. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, FROGS 66
3.4.1.3. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, CODE 67
3.4.1.4. Aparatul LAR VII Standard funcţionând în varianta cu oxigen în circuit închis 68
3.4.1.5. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, EMERSON RIG şi SIVA 10 . 69
3.4.1.6. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, CASTORO 96 PRO 70
3.4.1.7. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, DIVEX SHADOW 71
3.4.1.8. Aparatul cu circuit închis, cu oxigen, OXYDIVE 72
3.4.2. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis, cu amestec respirator 73
3.4.2.1. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, DOXGERS 73
3.4.2.2. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK10 MOD 4 73
3.4.2.3. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK 15 75
3.4.2.4. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, PRISM-TOPAZ 76

3.4.2.5. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, CISLUNAR MK5 77
3.4.2.6. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, CLASIC KISS 78
3.4.2.7. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, INSPIRATION 79
3.4.2.8. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, OUROBOROS 80
3.4.2.9. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MK 6 DISCOVERY..... 81
3.4.2.10. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MEGALODON 82
3.4.2.11. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, rEVO 83
3.4.2.12. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, STEALTH 84
3.4.2.13. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, MR9800 85
3.4.2.14. Aparatul cu circuit închis, cu amestec, VIPER E 86

4. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS ŞI MIXT 87
4.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis. Generalităţi 87
4.2. Tipuri de aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis 87
4.2.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec respirator prefabricat 88
4.2.1.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC55 89
4.2.1.2. Aparatul LAR VII Standard funcţionând în varianta cu amestec în circuit semiînchis 90
4.2.1.3. Aparatul cu circuit semiînchis cu amestec prefabricat, FGT I 91
4.2.1.4. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DOLPHIN I 92
4.2.1.5. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I 93
4.2.1.6. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat MK 6 94
4.2.1.7. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON 95
4.2.1.8. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, AZIMUTH .. 95
4.2.1.9. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, SUBMATIX 96
4.2.2. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec respirator preparat local 97
4.2.2.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SMT 98
4.2.2.2. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, M100M . 100
4.2.2.3. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, SM1 101
4.2.2.4. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec preparat local, FGT III .. 102
4.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit mixt. Generalităţi 103
4.4. Tipuri de aparate de respirat sub apă cu circuit mixt 103
4.4.1. Aparatul cu circuit mixt, IDA-71U 104
4.4.2. Aparatul cu circuit mixt, OXYMIX 97 106
4.4.3. Aparatul cu circuit mixt, LAR VII COMBI 107
4.4.4. Aparatele cu circuit mixt, SIVA 24, SIVA 55 şi SIVA + ... 108
4.4.5. Aparatul cu circuit mixt, MIXGERS 78 108
4.4.6. Aparatul cu circuit mixt, FGT II 109
4.4.7. Aparatul cu circuit mixt, INFINITO 110
4.4.8. Aparatul cu circuit mixt, DIVEX SHADOW EXCURSION 111
4.4.9. Aparatul cu circuit mixt, VIPER + ... 111
4.4.10. Aparatul cu circuit mixt, VIPER SC 112

5. CALCULUL GAZODINAMIC AL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ 113
5.1. Curgerea gazelor respiratorii prin ajutajele de injecţie, de compensare şi de spălare 113
5.1.1. Curgerea izentropică prin ajutaje. Relaţia lui Hugoniot 113
5.1.2. Relaţia lui Barré de Saint-Venant. Debitul masic în regim de blocaj 117
5.1.3. Curgerea gazelor prin ajutaje convergente 122
5.2. Descrierea matematică a curgerii fluidelor compresibile în blocurile specifice aparatelor de respirat sub apă speciale 124
5.2.1. Relaţiile de calcul aferente sacului respirator 124
5.2.2. Relaţiile de calcul pentru ajutajele de injecţie şi de spălare 128
5.2.3. Relaţiile de calcul pentru ajutajele de compensare 128
5.2.4. Calculul teoretic al ajutajelor de injecţie la debit masic constant 135
5.3. Concepţia şi calculul aparatelor de respirat sub apă speciale 137
5.3.1. Concepţia şi calculul aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, cu spălare automată a sacului respirator 137
5.3.1.1. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, cu spălarea automată a sacului respirator 137
5.3.1.2. Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen 142
5.3.2. Concepţia şi calculul aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis..... 156
5.3.2.1. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie 156
5.3.2.2. Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis de mare autonomie 158
5.3.2.3. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, de mare autonomie, pentru scufundări de sistem 189
5.3.3. Concepţia şi calculul aparatelor de respirat sub apă cu circuit mixt 195
5.3.3.1. Concepţia aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt 195
5.3.3.2. Calculul gazodinamic al circuitelor aferente aparatelor de respirat sub apă cu circuit mixt 202
5.4. Comparaţie asupra eficienţei aparatelor speciale de respirat sub apă 214

BIBLIOGRAFIE 216

PREFAŢĂ

Scufundările militare şi industriale, autonome sau cu alimentare de la suprafaţă, prin cerinţele lor operaţionale și deci prin destinația lor specială, presupun utilizarea unor aparate speciale de respirat sub apă.

Din categoria aparatelor speciale de respirat sub apă fac parte aparatele cu circuit deschis, închis, semiînchis şi mixt cu mare autonomie şi, mai ales, cu randament al scufundării ridicat. Aceste aparate de respirat sub apă speciale utilizează, în afară de aer, atât amestecuri de gaze respiratorii binare supraoxigenate aşa cum sunt amestecurile azot-oxigen (NITROX) şi heliu-oxigen (HELIOX), cât şi, uneori, amestecuri de gaze respiratorii ternare aşa cum este amestecul heliu-azot-oxigen (TRIMIX).

Cartea este structurată pe cinci capitole, primele două capitole referindu-se la gazele şi amestecurile de gaze utilizate în circuitele aparatelor speciale de respirat sub apă, următoarele două capitole prezentând tipuri de aparate speciale de respirat sub apă cu circuit deschis, închis, semiînchis şi mixt, iar ultimul capitol referindu-se la calculul gazodinamic al circuitelor aparatelor speciale de respirat sub apă de tipul cu circuit închis, semiînchis şi mixt.

Lucrarea, prima de acest gen din România, este rezultatul activităţilor de cercetare şi proiectare efectuate în comun de Departamentul de Hidraulică şi Protecţia Mediului din Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti şi Centrul de Scafandri din Constanţa din cadrul Forţelor Navale Române şi al colaborării acestor unităţi de învățământ și cercetare-proiectare cu faimoasa firmă germană Dräger.

Cartea se adresează, în primul rând, specialiştilor în domeniul hiperbar, inginerilor specializaţi în proiectarea, realizarea şi exploatarea aparatelor de respirat sub apă şi scafandrilor profesionişti specializaţi în scufundarea militară şi industrială cu aparate speciale de respirat sub apă.

Autorii

1.

GAZE UTILIZATE LA APARATELE SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

Un rol important în conceperea, proiectarea, realizarea şi exploatarea aparatelor de respirat sub apă îl au gazele şi amestecurile de gaze respiratorii utilizate în cadrul acestor aparate. Tipul gazului sau amestecului respirator utilizat este impus de tipul aparatului de scufundare folosit şi de tehnologia de scufundare adoptată.

Pentru alegerea corectă a gazului sau amestecului respirator în cadrul diferitelor aparate de respirat sub apă şi pentru stabilirea cu precizie a tehnologiei de scufundare, este necesară cunoaşterea în detaliu a caracteristicilor fizice ale gazelor utilizate. De asemenea, pentru obţinerea unor amestecuri de gaze cu participaţii volumice (concentraţii) ale componentelor dorite, este necesară cunoaşterea metodelor de fabricare a acestor amestecuri respiratorii.

1.1. DATE GENERALE PRIVIND GAZELE UTILIZATE ÎN SCUFUNDAREA CU APARATE SPECIALE

Primul gaz utilizat în scufundare a fost *aerul* care este un amestec respirator natural. Folosit la adâncimi mari aerul pune probleme importante cu implicaţii în revenirea scafandrului la presiunea atmosferică, impunând precauţii severe pentru evitarea unor accidente datorate fie apariţiei unor stări anormale, fie unei decompresii necorespunzătoare.

Pentru evitarea acestor probleme, cunoscut fiind faptul că oxigenul este gazul indispensabil vieţii şi considerându-se că este "inofensiv", s-a încercat executarea de scufundări numai cu oxigen pur. Din păcate, utilizarea oxigenului pur deşi a eliminat accidentele de decompresie, a condus, în cazul scufundărilor la adâncimi mai mari de 7...10 m, la alte accidente specifice oxigenului. Aceste accidente au fost foarte grave şi uneori mortale, prin acestea infirmându-se "inofensivitatea" oxigenului respirat la presiuni mai mari decât presiunea atmosferică. Astfel, a reapărut necesitatea diluării oxigenului şi realizării unor amestecuri respiratorii sintetice. De asemenea a apărut şi necesitatea găsirii unor noi gaze zise "inerte" pentru eliminarea neajunsurilor provocate de azotul din aerul atmosferic. Considerate ca inerte, pentru că nu sunt nici metabolizate, nici produse de organism, ele sunt totuşi generatoare de efecte biochimice cu atât mai evidente cu cât presiunea parţială a gazului inert, din amestecul gazos respirator, creşte o dată cu creşterea adâncimii de scufundare.

Indiferent de gazul inert utilizat ca diluant al oxigenului, unul din marile neajunsuri ale gazului inert este efectul narcotic pe care îl induce. În prezent, se admite că acţiunea fiziologică a unui amestec gazos respirator depinde de compoziţia sa, de concentraţiile (participaţiile volumice) ale gazelor care alcătuiesc amestecul, precum şi

de presiunea la care este respirat. Ultimii doi factori, corelaţi cu acţiunea fiziologică a amestecului respirator, determină valoarea maximă admisă a presiunii parţiale a gazului inert astfel încât efectul narcotic să nu-şi facă apariţia.

Este deci important să se cunoască faptul că toate gazele zise "inerte" au o putere narcotică apropiată de aceea a gazelor anestezice (cum ar fi protoxidul de azot), că această putere narcotică este funcţie de solubilitatea lor în grăsimi raportată la solubilitatea lor în apă (coeficientul Mayer-Overton) şi funcţie, de asemenea, de masa lor specifică (densitatea), ceea ce este evident pentru gazele grele. Astfel, narcoza începe de la adâncimea de 60 m cu azot, de la 40 m cu argon şi chiar la presiunea atmosferică cu xenon, pentru amestecuri cu 80% gaz inert. Din contră, deşi este cel mai uşor gaz dintre gazele utilizate ca diluant pentru oxigen, hidrogenul este mai narcotic ca heliul care este de două ori mai greu, motiv pentru care hidrogenul se distinge de celelalte gaze prin proprietăţile sale originale. Heliul poate fi considerat deci ca cel mai inert dintre gaze, dar puterea sa narcotică, cunoscută ca foarte slabă, este perfect perceptibilă la adâncimi foarte mari.

În tabelul 1.1 sunt prezentate câteva proprietăţi ale gazelor zise "inerte", legate de puterea lor narcotică.

Tabelul 1.1

Câteva proprietăţi ale gazelor zise "inerte"

Gaz	Masa molară [kg/kmol]	Densitatea [kg/m^3]*	Numărul Van der Waals** *a*	Solubilitatea [m ℓ/ℓ]		
				în apă (la 37^0C)	în grăsimi (la 37^0C)	M.O.***
Heliu	4	0,18	0,034	9,2	17	1,85
Neon	20	0,90	0,21	10,6	22	2,07
Hidrogen	2	0,09	0,24	18,0	57	3,17
Azot	28	1,25	1,39	14,5	76	5,24
Argon	40	1,78	1,34	33,0	150	4,54
Kripton	83,8	3,75	2,32	70,0	490	7,00
Xenon	131	5,90	4,19	130,0	1700	13,07

*Valorile densităţilor sunt la 0^0C şi la presiunea atmosferică normală;

**Numărul lui Van der Waals *a* exprimă forţa de atracţie intermoleculară;

***Coeficientul Mayer-Overton = $\frac{\text{Solubilitatea în grăsimi}}{\text{Solubilitatea în apă}}$, în relaţie cu puterea narcotică.

Un alt neajuns, la fel de important, îl constituie faptul că, la decompresie, gazul inert se poate degaja cu formarea de bule, care pot provoca accidente serioase în cazul nerespectării unei proceduri speciale de revenire la presiunea atmosferică. În plus, absenţa prelungită a azotului din amestecurile respiratorii poate sta la baza unor importante modificări de ordin fiziologic, iar în perioada schimbării amestecurilor respiratorii apare, la nivelul membranelor, o contradifuzie izobarică a gazelor inerte dizolvate în ţesuturi.

1.2. CARACTERISTICILE GAZELOR UTILIZATE ÎN SCUFUNDAREA CU APARATE SPECIALE

Prin urmare, pentru contracararea efectelor hiperoxiei, oxigenul trebuie diluat prin amestecare cu gaze diluante, zise şi gaze "inerte". Dintre acestea, în continuare sunt prezentate, pe lângă oxigen, cele mai utilizate gaze diluante în fabricarea amestecurilor respiratorii folosite la aparatele de respirat sub apă speciale, azotul şi heliul.

1.2.1. OXIGENUL ŞI EFECTELE ACESTUIA

Oxigenul este cel mai important dintre toate gazele utilizate în scufundare deoarece este indispensabil vieţii şi este elementul chimic cel mai răspândit din natură. Aerul atmosferic conţine aproximativ 21% oxigen liber, în stare moleculară.

1.2.1.1. Caracteristicile oxigenului

Acest gaz, inodor, incolor şi insipid este foarte activ combinându-se uşor cu alte elemente. În tabelul 1.2 sunt prezentate cele mai importante caracteristici fizice ale oxigenului.

Tabelul 1.2

Proprietăţile fizice ale oxigenului

Mărimea	Valoarea
Volumul molar $[m^3/kmol]$	22,403
Masa molară $[kg/kmol]$	31,999
Temperatura critică T_{cr} [K]	154,4
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) T_f [K]	90,2
Conductibilitatea termică k $[\mu cal/cm \cdot s \cdot K]$	58,5
Coeficientul de autodifuzie $D[cm^2/s]$	0,189
Densitatea ρ [g/*l*]	1,429
Coeficientul dinamic de viscozitate μ[micropoise]*	192,6
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	0,157

Mărimea	Valoarea
$k/\mu c_v$	1,93
$D\rho/\mu$	$1{,}4 \cdot 10^{-3}$
Constante Van der Waals: a – at/(*l*/mol)^2 b – *l*/mol	1,36 0,0318
Presiunea critică p_{cr} [ata]**	49,7
T_f/T_{cr}	0,58
Diametrul moleculei [Å]***	3,62
Solubilitatea în apă [*l*/*l*]	0,0314
Solubilitatea în alcool etilic [*l*/*l*]	0,1431
Solubilitatea în benzen [*l*/*l*]	0,163

*1 micropoise = 10^{-3} poise = 10^{-3} g/(cm s) = dyn s/cm^2; **ata – atmosferă în scara absolută;
***Å – angström (1 Å = 10^{-8} cm).

În scufundare, pentru prima dată a fost utilizat oxigenul pur, în cel de-al doilea război mondial, de către scafandrii de luptă italieni. Aceştia, echipaţi cu combinezoane grele, etanşe şi cu aparate de respirat sub apă în circuit închis, au efectuat intervenţii sub apă cu scop militar. Nu cunoşteau nimic despre toxicitatea oxigenului, motiv pentru care au avut pierderi chiar pe timpul antrenamentelor.

În prezent, când fenomenele de toxicitate ale oxigenului sunt cunoscute şi controlate, oxigenul este utilizat, la aparatele de respirat sub apă, atât pur cât şi amestecat cu gaze inerte sub formă de amestecuri respiratorii. Pentru dozarea corespunzătoare a oxigenului pur sau a amestecului respirator către scafandru, este necesară cunoaşterea consumului individual de oxigen funcţie de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (tab. 1.3).

Tabelul 1.3

Consumul individual de oxigen funcţie de activitatea subacvatică desfăşurată de scafandru (NOAA Diving Manual)

Activitatea desfăşurată de scafandru	Consum O_2 [l_N/min]	Ventilaţie pulmonară [l_N/min]
Repaus	0,4	8
Lucrări uşoare, înot cu viteza $v = 0{,}5\,\text{Nd}^* = 0{,}257$ m/s	0,8	18
Lucrări moderate, înot cu viteza $v = 0{,}8\,\text{Nd} = 0{,}411$ m/s	1,3	30
Lucrări intense, înot cu viteza $v = 1{,}0\,\text{Nd} = 0{,}514$ m/s	1,7	40
Lucrări foarte grele, înot cu viteza $v = 1{,}2\,\text{Nd} = 0{,}617$ m/s	2,5	60

*Nd – nod, unitate de măsură a vitezei egală cu 1 milă marină pe oră: 1 Nd = 1,852 km/h = 0,514 m/s.

În cazul scufundărilor cu alimentare la narghilea şi a scufundărilor autonome cu plecare de la suprafaţă, în cadrul aparatelor de respirat sub apă, se utilizează de obicei amestecuri gazoase binare supraoxigenate. Utilizarea amestecurilor respiratorii cu concentraţii mari de oxigen (cu participaţii volumice ale oxigenului, r_{O_2}, mari) se justifică prin aceea că viteza de revenire la presiunea atmosferică, deci viteza de decompresie, este dictată de timpul necesar eliminării gazului inert dizolvat la un moment dat în organismul uman. Cantitatea de gaz inert dizolvată este funcţie de presiunea parţială a acestuia din amestecul respirator, cu alte cuvinte, pentru o adâncime dată, cu cât participaţia volumică a oxigenului în amestecul respirator, r_{O_2}, este mai mare, cu atât cantitatea de gaz inert ce se va dizolva în ţesuturi va fi mai mică şi implicit viteza de revenire la presiunea atmosferică va fi mai mare.

Astfel, pentru o anumită adâncime de scufundare, care corespunde unei presiuni totale a amestecului gazos respirator, p_{am}, şi pentru un amestec de gaz azot-oxigen (NITROX) caracterizat prin participaţiile volumice ale componentelor r_{O_2} şi r_{N_2}, ($r_{O_2} + r_{N_2} = 1$), presiunile parţiale ale celor două componente ale amestecului sunt

2.

AMESTECURI DE GAZE UTILIZATE LA APARATELE SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

Amestecurile de gaze respiratorii sunt amestecuri gazoase cu două sau trei componente, o componentă fiind oxigenul, iar celelalte componente fiind gazele inerte. Aceste amestecuri rezultă din amestecarea, în proporţie dorită, a două sau trei din gazele prezentate în capitolul 1, unul dintre ele fiind întotdeauna oxigenul.

2.1. AMESTECURI RESPIRATORII BINARE ŞI TERNARE

După numărul componentelor principale din amestecurile respiratorii, acestea se împart în: amestecuri binare (cu două componente) şi amestecuri ternare (cu trei componente).

Amestecurile respiratorii binare cel mai des utilizate în domeniul pătrunderii omului sub apă, sunt amestecurile azot-oxigen, cunoscute sub denumirea de amestecuri NITROX şi amestecurile heliu-oxigen denumite amestecuri HELIOX. Pentru scufundările autonome, aceste tipuri de amestecuri sunt standardizate din punct de vedere al conţinutului de oxigen. Cele mai frecvente amestecuri respiratorii utilizate în scufundări autonome sunt cele caracterizate prin următoarele concentraţii ale oxigenului: 30% (uneori 32% sau 32,5%), 40%, 50% şi 60%, deci prin următoarele participaţii volumice ale oxigenului r_{O_2} în amestec: 0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50 şi 0,60. În ultimii ani se utilizează, în mod experimental, şi amestecuri binare hidrogen-oxigen (HIDROX) cu concentraţii ale oxigenului mai mici de 4% ($r_{O_2} < 0{,}04$).

Pentru scufundări cu amestecuri respiratorii se ţine seama nu numai de concentraţia oxigenului din amestec ci şi de natura gazului inert, din punct de vedere al efectelor lui narcotice.

Amestecurile respiratorii ternare (TRIMIX) utilizate frecvent la pătrunderea omului sub apă, sunt amestecuri heliu-azot-oxigen. Pentru scufundări autonome şi aceste amestecuri sunt standardizate. În general, concentraţiile heliului şi azotului sunt egale, iar concentraţia oxigenului este funcţie de limitele impuse la utilizarea acestuia. Amestecurile ternare se folosesc şi în scufundări profunde. La astfel de scufundări, se utilizează amestecurile HELIOX în care se injectează azot necesar pentru ameliorarea S.N.I.P., obţinându-se în acest fel amestecuri ternare cu concentraţii ale azotului de 5...10% ($r_{N_2} = 0{,}05...0{,}10$).

Amestecurile heliu-azot-oxigen se fabrică, de obicei, plecându-se de la heliu în care se adaugă aer comprimat. Presiunea parţială maximă admisibilă a azotului în amestec pentru evitarea oricăror forme de nacoză este cea corespunzătoare azotului din aerul respirat la 30 m adâncime ($p_{am} = p_{aer} = 4$ bar (sc. abs.)), adică $(p_{N_2})_{\max} = r_{N_2} . p_{am} = 0{,}79 \cdot 4 = 3{,}16$ bar (sc. abs.).

În cadrul experimentărilor de laborator, se mai utilizează şi amestecuri ternare hidrogen-heliu-oxigen (HIDRELIOX).

2.2. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII

Amestecurile gazoase binare sau ternare utilizate în scufundare se pot fabrica fie printr-o injecţie succesivă şi controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipienţi, fie printr-o separare a azotului din aer pentru sărăcirea amestecului în azot, fie printr-o omogenizare continuă a gazelor componente, fie printr-o amestecare în flux continuu, cu injectarea simultană a gazelor componente la proporţia dorită, utilizându-se pentru aceasta dispozitive prevăzute cu ajutaje calibrate lucrând în domeniul critic (sonic), ce asigură livrarea componentelor gazoase la debite masice constante.

2.2.1. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII BINARE

Amestecurile azot-oxigen (NITROX) se fabrică de obicei, prin injectarea aerului comprimat într-un recipient în care se află oxigen la o anumită presiune.

Amestecurile heliu-oxigen (HELIOX) se fabrică prin injectarea de oxigen într-un recipient în care se află heliu la o anumită presiune.

Amestecurile respiratorii de gaze se fabrică prin comprimarea gazelor componente în recipienţi cu volume cunoscute. Dacă se lucrează la temperatură constantă, cantităţile de gaz comprimate în recipient se pot determina prin măsurarea variaţiilor de presiune din recipient rezultate în urma injectării gazelor pure sau amestecurilor de gaze. Principalele instrumente de măsură necesare fabricării amestecurilor de gaze sunt manometrul cu clasă de precizie corespunzătoare şi analizorul de oxigen. La analiza oxigenului din amestecul fabricat trebuie să se ţină cont că acestuia îi sunt necesare minim 12 ore pentru o bună omogenizare, iar pentru măsurarea presiunii, după comprimarea gazelor în recipient, este necesară trecerea unui anumit interval de timp pentru ca temperatura amestecului să revină la temperatura ambiantă astfel încât să nu fie necesare corecţii de calcul rezultate din temperatură. Deci, amestecurile gazoase respiratorii se fabrică în recipienţi cu volume cunoscute şi la o temperatură constantă, repectiv temperatura ambiantă, ce permite aplicarea legii Boyle-Mariotte:

$$pV = \text{const.} \tag{2-1}$$

De asemenea, se ţine cont şi de legea lui Dalton care arată că, la o temperatură dată, presiunea unui amestec gazos p_{am} este egală cu suma presiunilor parţiale ale fiecărui gaz component p_{g_i} $(i = 1,2\ldots n)$. Astfel, pentru un amestec de *n* gaze, legea lui Dalton se poate scrie:

$$p_{am} = \sum_{i=1}^{n} p_{g_i} = p_{g_1} + p_{g_2} + \ldots + p_{g_i} + \ldots + p_{g_n} \ , \qquad (2\text{-}2)$$

iar legea lui Amagat se scrie:

$$\sum_{i-1}^{n} r_{g_i} = r_{g_1} + r_{g_2} + \ldots + r_{g_i} + \ldots + r_{g_n} = 1. \qquad (2\text{-}3)$$

Presiunea parţială a unui gaz component dintr-un amestec de gaze se obţine prin înmulţirea presiunii amestecului de gaze cu participaţia volumică r_{g_i} a gazului component considerat:

$$p_{g_i} = p_{am}\, r_{g_i} \,. \qquad (2\text{-}4)$$

Pentru a se putea calcula mai uşor un amestec de gaze în vederea fabricării acestuia, se propune o schemă simplă. Astfel, se reprezintă recipientul în care se doreşte prepararea amestecului cu un dreptunghi (fig. 2.1) şi se presupune că gazele rămân stratificate fără să se amestece. Deci, în dreptunghiul "recipient" se poate reprezenta fiecare gaz component înscriind în fiecare compartiment gazul sau amestecul de gaze considerat. În dreapta dreptunghiului "recipient" se notează presiunile parţiale finale ale fiecărui gaz sau amestec gazos component $p_{g_i,f}$ şi presiunea finală a amestecului $p_{am,f}$ exprimate în scară manometrică, iar în stânga se notează participaţiile volumice $r_{g_i}^{(j)}$ ale gazului pur i din amestecurile injectate prin fiecare tranşă de injecţie (j), precum şi concentraţia finală dorită a acestui gaz $r_{g_i,f}$ din amestecul care este propus a fi obţinut în recipient.

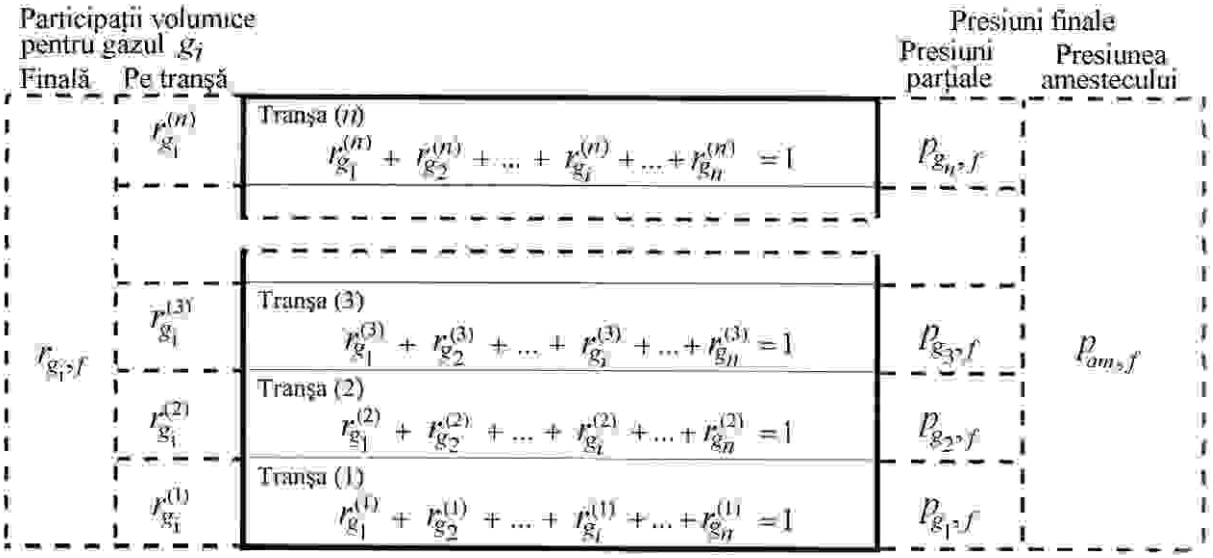


Fig. 2.1. Schema generală de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator de gaze.

Pe baza schemei din figura 2.1 şi a relaţiilor prezentate mai sus se poate exprima presiunea parţială finală a unui gaz component astfel:

$$p_{g_i,f} = p_{am,f}\ r_{g_i,f} = \\ = p_{g_1,f}\ r_{g_i}^{(1)} + p_{g_2,f}\ r_{g_i}^{(2)} + ... + p_{g_i,f}\ r_{g_i}^{(j)} + ... + p_{g_n,f}\ r_{g_i}^{(n)} \tag{2-5}$$

unde exponentul $(j)[(j) = (1),(2)\ldots(n)]$ reprezintă numărul tranşei de injecţie de gaze în recipient. Pentru o mai bună înţelegere, în cele ce urmează se prezintă câteva cazuri întâlnite mai des la fabricarea amestecurilor gazoase binare.

2.2.1.1. Fabricarea unui amestec binar NITROX pornind de la gaze pure: oxigen şi azot

Schema recipientului pentru calculul fabricării amestecului NITROX din gaze pure este prezentată în figura 2.2.

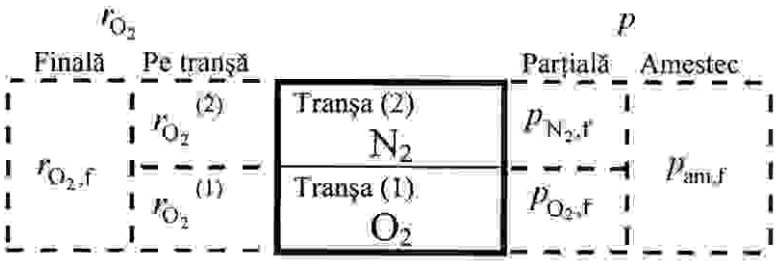


Fig. 2.2. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX pornind de la oxigen şi azot.

Pentru acest caz, relaţia (2-5) devine:

$$p_{O_2,f} = p_{am,f}\ r_{O_2,f} = p_{O_2,f}\ r_{O_2}^{(1)} + p_{N_2,f}\ r_{O_2}^{(2)}. \tag{2-6}$$

Astfel, calculul fabricării unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), se reduce la rezolvarea ecuaţiei scrise pe baza schemei de calcul din figura 2.3:

$$200 \cdot 0{,}3 = x \cdot 1 + (200 - x) \cdot 0\,, \tag{2-7}$$

de unde rezultă $x = 60$ bar (sc. man.) care reprezintă atât valoarea presiunii parţiale finale a oxigenului cât şi presiunea la sfârşitul primei tranşe de presurizare a recipientului prin injecţie de oxigen pur.

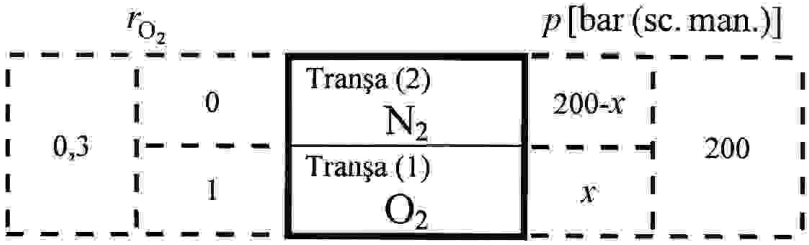


Fig. 2.3. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen şi azot.

Prin urmare, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 60 bar (sc. man.), apoi se presurizează în continuare recipientul cu azot pur cu încă 140 bar, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

2.2.1.2. Fabricarea unui amestec NITROX din oxigen şi aer

Având în vedere normele de tehnica securităţii muncii, este recomandabil să se evite manevrarea oxigenului pur la presiuni înalte, motiv pentru care, pentru fabricarea unui amestec binar NITROX din oxigen şi aer, se va proceda la injectarea de aer (21% oxigen şi 79% azot) în oxigenul stocat în recipient.

Astfel, pentru fabricarea unui amestec NITROX 30/70 (30% oxigen şi 70% azot) la presiunea de 200 bar (sc. man.), se va rezolva ecuaţia de mai jos, corespunzătoare schemei de calcul din figura 2.4:

$$p_{am,f}\ r_{N_2,f} = p_{O_2,f}\ r_{N_2}^{(1)} + p_{aer,f}\ r_{N_2}^{(2)}, \qquad (2\text{-}8)$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}7 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 0{,}79, \qquad (2\text{-}9)$$

de unde rezultă $x = 177{,}2$ bar (sc. man.).

Deci, amestecul NITROX 30/70 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează mai întâi cu oxigen pur până când presiunea devine 200-177,2 = 22,8 bar (sc. man.), după care se continuă presurizarea cu încă 177,2 bar cu aer, până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

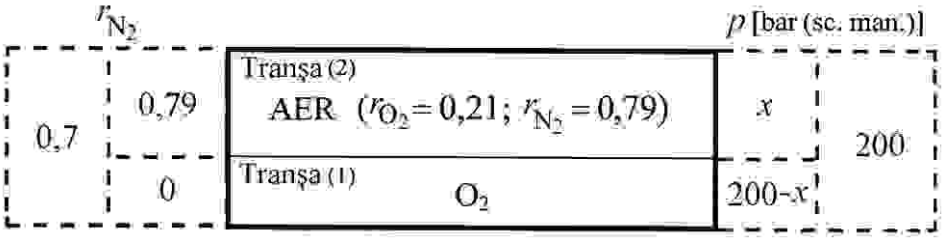


Fig. 2.4. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen şi aer.

Deoarece amestecurile respiratorii binare NITROX sunt cele mai utilizate în scufundările industriale, dar mai ales în cele cu scop militar şi datorită faptului că metoda fabricării acestor amestecuri prin injectare succesivă de oxigen şi aer este cea mai utilizată, în tabelul 2.1 se prezintă variaţiile de presiune rezultate prin cele două tranşe de presurizare, mai întâi cu oxigen şi apoi cu aer, în vederea obţinerii amestecurilor respiratorii binare NITROX, la o presiune finală de 200 bar (sc. man.).

Tabelul 2.1

Fabricarea amestecurilor NITROX prin injectarea succesivă de oxigen şi aer

Amestec NITROX [%O_2 / %N_2]	Presiunea din recipient după presurizarea cu oxigen pur [bar (sc. man.)]	Creşterea de presiune prin presurizarea cu aer [bar]	Presiunea finală a amestecului [bar (sc. man)]
60/40	98,7	101,3	200
50/50	73,4	126,6	200
40/60	48,1	151,9	200
32,5/67,5	29,1	170,9	200
32/68	27,8	172,2	200
30/70	22,8	177,2	200

La fabricarea amestecurilor NITROX se utilizează oxigen cu puritate ridicată (minimum 99,5% O_2) şi aer respirator corespunzător normativelor în vigoare (21% O_2 şi 79% N_2).

2.2.1.3. Fabricarea unui amestec HELIOX din heliu şi oxigen

Datorită diferenţei mari de densitate dintre cele două gaze, întotdeauna se injectează oxigenul peste heliu şi aceasta cât mai violent posibil pentru a se realiza o mai bună omogenizare a amestecului. Spre exemplu, pentru fabricarea unui amestec HELIOX 20/80 (20% oxigen şi 80% heliu) la 200 bar (sc. man.), schema recipientului va fi cea din figura 2.5, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$p_{am,f}\ \ r_{O_2,f} = p_{He,f}\ \ r_{O_2}^{(1)} + p_{O_2,f}\ \ r_{O_2}^{(2)}, \qquad (2\text{-}10)$$

adică:

$$200 \cdot 0{,}2 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 1, \qquad (2\text{-}11)$$

de unde rezultă $x = 40$ bar (sc. man.).

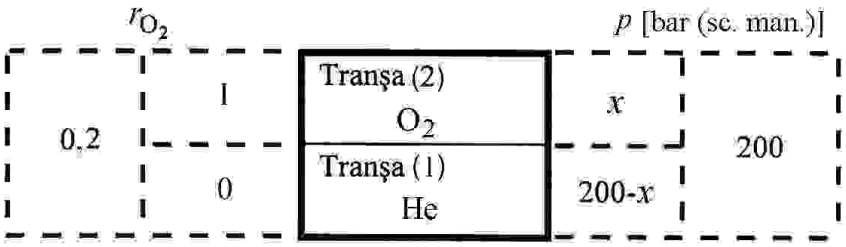


Fig. 2.5. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator HELIOX 20/80 din heliu şi oxigen.

Prin urmare, amestecul HELIOX 20/80 la 200 bar (sc. man.) se va fabrica astfel: se presurizează recipientul mai întâi cu heliu pur până la presiunea 200 – 40 = 160 bar (sc. man.), iar, în continuare, se continuă presurizarea cu încă 40 bar cu oxigen pur până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

2.2.1.4. Fabricarea unui amestec HELIOX din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure

Metoda de fabricare a unui amestec HELIOX din alt amestec HELIOX, se utilizează atunci când se doreşte economisirea heliului. Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 20 bar (sc. man.) şi un amestec HELIOX 14/86 (14% O_2 şi 86% He) aflat într-un alt recipient la presiunea de 160 bar (sc. man.) şi se doreşte ca să se fabrice un amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He) la 200 bar (sc. man.). Iniţial, nu se cunoaşte dacă trebuie adăugat heliu sau oxigen pur şi, de aceea, schema iniţială a recipientului de calcul va fi cea din figura 2.6, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$200 \cdot 0{,}12 = x \cdot 1 + 160 \cdot 0{,}14 + (200 - 160 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0{,}10 \qquad (2\text{-}12)$$

de unde rezultă $x = -0{,}4$, lucru imposibil. De aceea, se revine asupra schemei recipientului, renunţându-se la injectarea oxigenului. Schema recipientului de calcul va fi cea din figura 2.7, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$200 \cdot 0{,}12 = x \cdot 0{,}14 + (200 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0{,}10 \qquad (2\text{-}13)$$

de unde rezultă $x = 157{,}14$ bar (sc. man.)

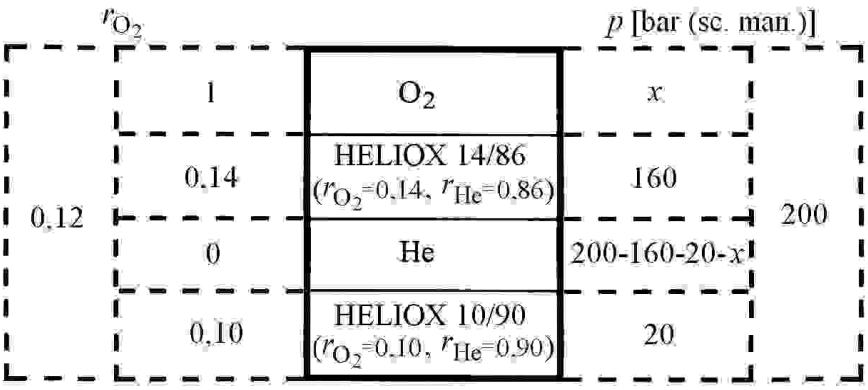


Fig. 2.6. Schema iniţială de calcul pentru fabricarea unui amestec HELIOX 12/88 din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure.

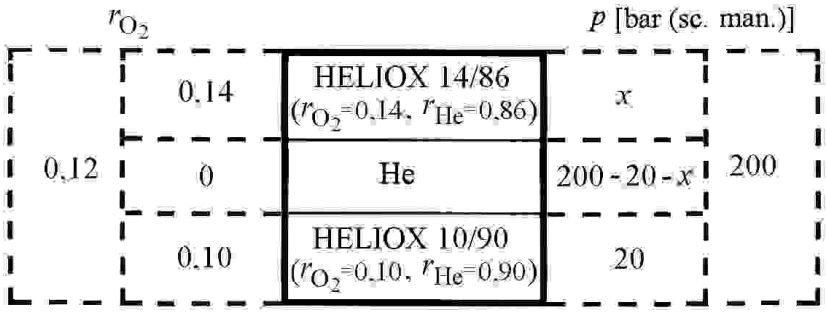


Fig. 2.7. Schema finală de calcul pentru fabricarea unui amestec HELIOX 12/88 din alte amestecuri HELIOX şi gaze pure.

Deci, amestecul HELIOX 12/88 la 200 bar (sc. man.) se obţine astfel: recipientul conţinând amestecul HELIOX 10/90 la presiunea de 20 bar (sc. man.) se presurizează, în continuare, cu încă 200 - 20 - 157,14 = 22,86 bar (sc. man.), cu heliu pur, după care se continuă presurizarea cu încă 157,14 bar (sc. man.) cu amestc HELIOX 14/86 până când presiunea amestecului din recipient devine egală cu 200 bar (sc. man.).

2.2.2. FABRICAREA AMESTECURILOR RESPIRATORII TERNARE

Pentru fabricarea amestecurilor ternare se aplică aceeaşi metodă ca cea prezentată la fabricarea amestecurilor binare. Astfel, pentru fabricarea amestecurilor ternare heliu-azot-oxigen (TRIMIX) se pot utiliza fie heliu şi aer, fie heliu şi amestec binar azot-oxigen (NITROX). În primul caz se presurizează mai întâi recipientul cu heliu, apoi se continuă presurizarea cu aer. În al doilea caz, se fabrică mai întâi amestecul binar NITROX care apoi se injectează în recipient peste heliu.

2.3. CORECTAREA AMESTECURILOR DE GAZE

Indiferent de metoda utilizată pentru fabricarea amestecurilor de gaze, este necesar controlul permanent al participaţiilor gazelor componente ale amestecurilor cu ajutorul unor analizoare de gaze specializate şi corectarea acestora în vederea obţinerii amestecurilor dorite.

Corectarea amestecurilor respiratorii de gaze se face după analiza lor din punct de vedere al concentraţiei de oxigen. În cele ce urmează se vor prezenta patru cazuri de corecţie a amestecurilor respiratorii.

2.3.1. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PREA SĂRAC ÎN OXIGEN

Se consideră că se dispune de un amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 180 bar (sc. man.) şi se doreşte corectarea acestuia pentru obţinerea unui amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He). În acest caz nu se cunoaşte presiunea finală a amestecului dorit. Schema recipientului este cea din figura 2.8, iar ecuaţia corespunzătoare va fi:

$$x \cdot 0{,}88 = 180 \cdot 0{,}9 + (x - 180) \cdot 0, \qquad (2\text{-}14)$$

de unde rezultă x = 184 bar (sc. man.)

Prin urmare, amestecul HELIOX 12/88 se obţine astfel: peste amestecul HELIOX 10/90 aflat la 180 bar (sc. man.) se injectează 4 bar (sc. man.) oxigen pur, până când presiunea ajunge la valoarea finală de 184 bar (sc. man.).

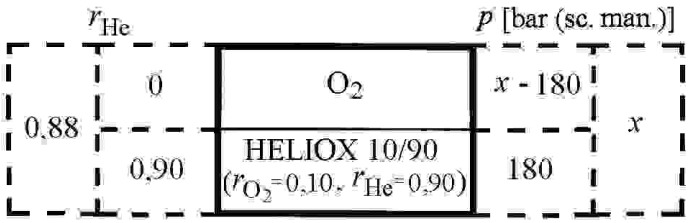


Fig. 2.8. Schema de calcul privind corectarea amestecului HELIOX 10/90 pentru obţinerea amestecului HELIOX 12/88.

2.3.2. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PREA BOGAT ÎN OXIGEN

Datorită diferenţei mari de densitate dintre heliul pur şi un amestec HELIOX, întotdeauna amestecul HELIOX se va injecta peste heliul aflat în recipient.

Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 12/88 (12% O_2 şi 88% He) la presiunea de 150 bar (sc. man.) şi se doreşte corectarea acestuia în vederea obţinerii unui amestec HELIOX 10/90 (10% O_2 şi 90% He). Şi în acest caz nu se cunoaşte presiunea finală a amestecului dorit. Pentru o astfel de corectare pot fi folosite două variante: varianta utilizării unui compresor şi a unei başe recuperatoare şi varianta utilizării unui surpresor.

a. *Dacă pentru fabricarea amestecului se foloseşte un compresor şi o başă recuperatoare*, se poate utiliza întregul amestec HELIOX şi schema recipientului de calcul este prezentată în figura 2.9.

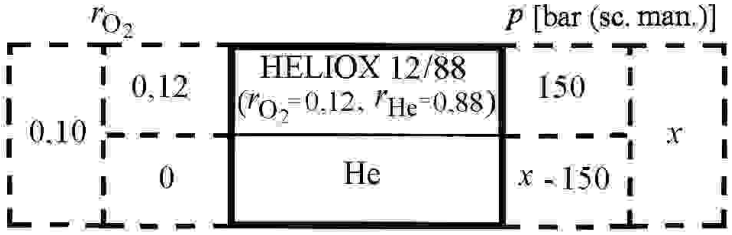


Fig. 2.9. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului HELIOX 10/90 prin corectarea unui amestec HELIOX 12/88
(cazul utilizării unui compresor şi a unei başe recuperatoare).

3.

APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS ŞI ÎNCHIS

3.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS. GENERALITĂŢI

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt aparatele la care întregul amestec gazos, rezultat din expiraţie, este evacuat în mediul acvatic exterior. Aceste aparate sunt alcătuite din buteliile de stocaj pentru rezerva de gaz sau de amestec gazos respirator înmagazinate sub presiune, atunci când aparatele sunt autonome, şi dintr-un regulator de presiune care asigură respiraţia la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie. Autonomia acestor aparate este relativ redusă. Atunci când se doreşte ca timpul de imersie să fie mai mare, se utilizează aparate de respirat sub apă cu circuit deschis alimentate cu aer sau cu amestec gazos sintetic de la suprafaţă sau dintr-un mijloc imersat. Adâncimea de scufundare cu aparatele în circuit deschis este relativ mare, până la 50…75 m.

3.2. TIPURI DE APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt de două feluri:
- aparate cu circuit deschis, *cu debit continuu*;
- aparate cu circuit deschis, *cu debit la cerere*.

În figura 3.1 se prezintă schematic caracteristicile şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit deschis.

3.2.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS,CU DEBIT LA CERERE, AUTONOME

Aparatul autonom pentru respirat sub apă este acel aparat constituit, în principal, dintr-un recipient cu gaze respiratorii şi prevăzut cu o instalaţie de distribuţie şi control, care asigură întreaga cantitate de amestec respirator necesară scafandrului pentru executarea unei scufundări. Optim pentru un aparat de scufundare înseamnă: timp mare în imersiune, adâncime cât mai mare şi timp de decompresie cât mai scurt.

Aparatele cu circuit deschis cu debit la cerere se caracterizează prin aceea că amestecul respirator este livrat numai în faza de inspiraţie, livrarea având o durată egală cu durata inspiraţiei. În fazele de apnee şi de expiraţie livrarea de amestec este întreruptă.

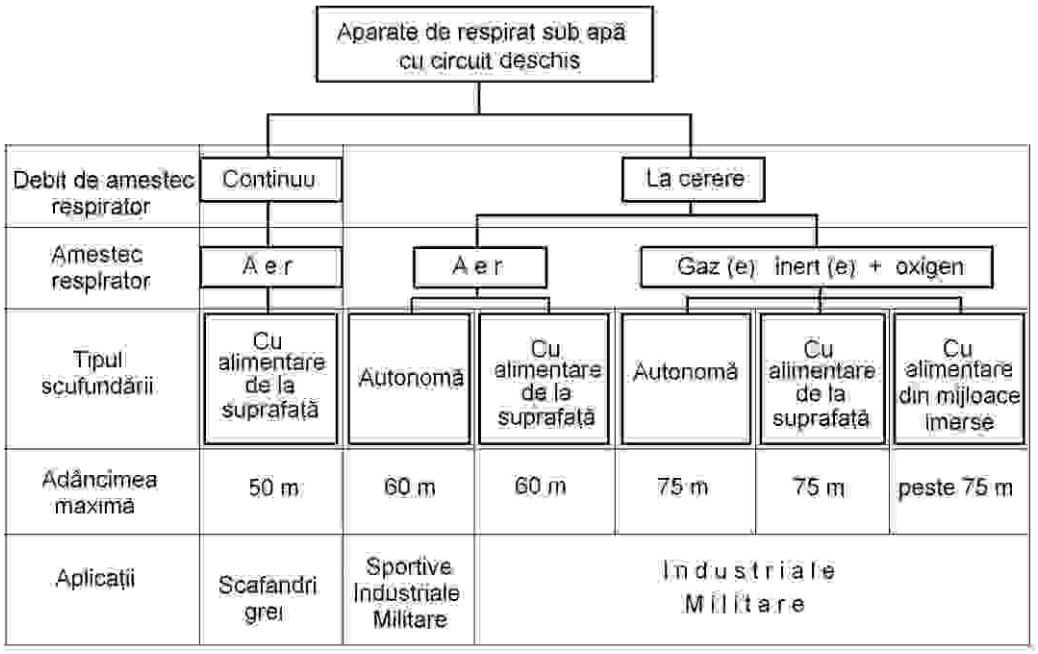


Fig. 3.1. Schema generală cu caracteristicile, performanţele şi domeniile de aplicare pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis.

Elementul comun al *aparatelor cu circuit deschis, cu debit la cerere, autonome* îl reprezintă aparatul de respirat propriu-zis. Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit de gaz respirator livrat la cerere, autonome, au în componenţă şi rezerva de gaz necesară respiraţiei pe timpul lucrului în imersiune, rezervă ce este transportată de către scafandru.

3.2.1.1. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor COMEX SUPER-PHYSALIE

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, autonome, echipate cu detentor SUPER-PHYSALIE, sunt utilizate pe scară largă de către scafandrii profesionişti, atât militari cât şi civili. Acest detentor, cu reducerea presiunii în două trepte, este fabricat de firma franceză COMEX şi reprezintă un detentor profesional. În figura 3.2 se prezintă schema detentorului treapta I SUPER-PHYSALIE cu elementele componente principale, iar în figura 3.3 se prezintă schematic detentorul treapta a II-a.

Urmărind schema simplificată din figura 6.28 se observă că detentorul treapta I este cu membrană necompensată, aşa numitul model standard. De o parte a membranei acţionează forţa dată de presiunea gazului din camera de medie presiune, iar de cealaltă parte, forţa elastică a resortului de taraj împreună cu cea generată de presiunea hidrostatică a mediului exterior. La inspir, echilibrul se rupe, membrana se înalţă şi deschide clapetul de admisie. Gazul pătrunde până când presiunea medie atinge o valoare cu 8...12 bar peste presiunea mediului exterior şi echilibrul se restabileşte.

Detentorul treapta a II-a, conform schemei din figura 6.29 are interiorul împărţit în două camere de către o membrană de cauciuc, aflată în echipresiune. De o parte a ei acţionează forţa dată de presiunea hidrostatică (fiind în contact direct cu apa), iar de cealaltă parte, forţa dată de presiunea gazului inspirat.

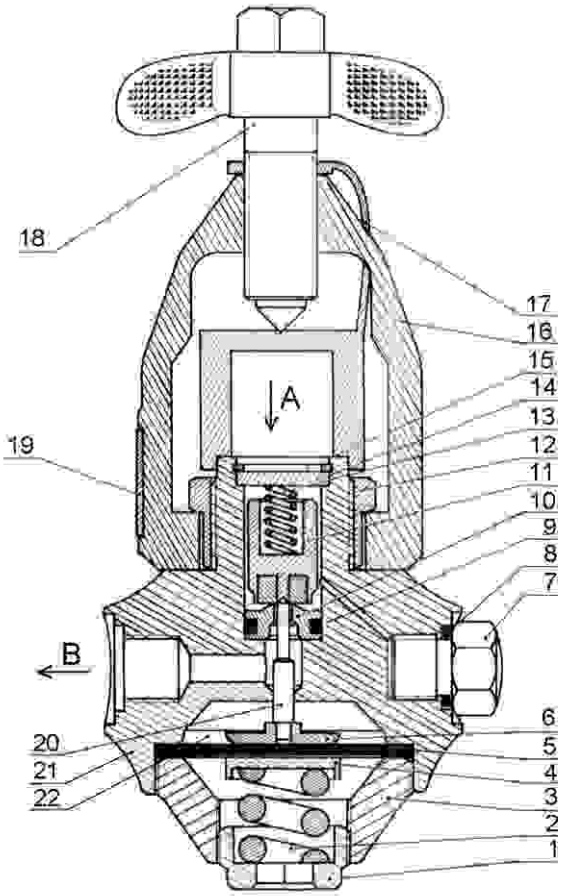


Fig. 3.2. Schema detentorului treapta I SUPER-PHYSALIE:
A. Alimentare cu amestec respirator la înaltă presiune;
B. Ieşire amestec respirator la medie presiune;
1– şurub de reglaj; 2– resort de taraj;
3– capac; 4– taler resort;
5– membrană; 6– taler tijă;
7– dop; 8,9– inele de etanşare;
10– scaun clapet; 11– clapet;
12– piuliţă de fixare;
13– resort clapet; 14– filtru sinterizat;
15– inel de siguranţă;
16– jug de fixare pe butelie;
17– dop de protecţie;
18– şurub de fixare;
19– placă de inscripţionare; 20– tijă;
21– corp detentor;
22– cameră medie presiune.

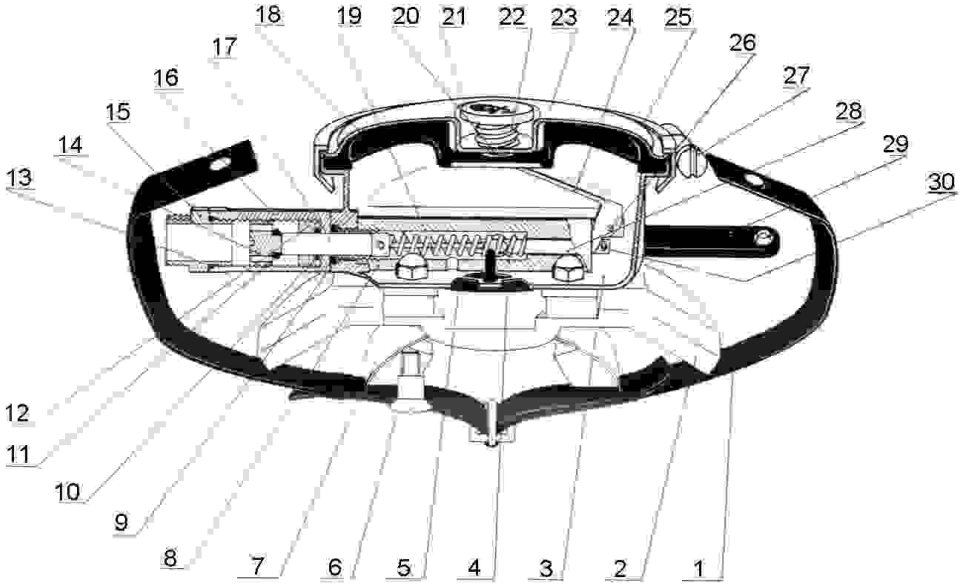


Fig. 3.3. Schema detentorului treapta a II-a SUPER-PHYSALIE:
1- baretă; 2- deflector; 3- cutie; 4- resort de rapel; 5- supapă expiraţie; 6- şurub; 7- piesă bucală; 8- corp joasă presiune; 9,10,11- garnituri oring; 12- suport oring; 13- oring; 14- scaun clapet; 15- manşon; 16- port clapet; 17- piston clapet; 18- membrană; 19- tijă ac; 20- rondea; 21- buton debit continuu; 22- resort buton; 23- capac; 24- pârghie; 25- inel de închidere; 26- ax levier; 27- şurub; 28- tijă piston clapet; 29- bridă piesă bucală; 30- opritor.

Noutatea adusă de acest model este că scaunul supapei de admisie este mobil şi nu clapetul, ca la modelele anterioare. Scaunul, care are forma unui cilindru, este mişcat axial prin intermediul pârghiei de către membrană. Scaunul urmăreşte mişcările alternative ale membranei, deschizând şi închizând supapa după mişcările respiratorii ale scafandrului. Detentorul este prevăzut şi cu buton de debit continuu. Aparatul livrează gazul respirator la cerere sau continuu dacă se apasă butonul respectiv.

Detentorul SUPER-PHYSALIE asigură scafandrului un debit de 300 l_N/min, la o depresiune de 3…4 cm H_2O (3…4 mbar) creată prin inspiraţie. Gazul respirator din butelii este comprimat la o presiune de maximum 200 bar (sc. man.).

3.2.1.2. Aparatul cu circuit deschis, autonom, cu detentor SHARK

Detentorul SHARK (fig. 3.4), fabricat de firma germană DRÄGER, este un regulator de înaltă performanţă cu două trepte legate între ele printr-un furtun de medie presiune. Detentorul treapta I este de tipul cu piston compensat care asigură o independenţă a presiunii medii la ieşirea din prima treaptă în raport cu scăderea presiunii din buteliile de stocaj. Detentorul treapta a II-a este conceput ţinând cont de *principiul amonte*, asigurând o creştere a debitului la acelaşi efort de inspiraţie.

Detentorul SHARK ete prevăzut,la treapta I, cu două racorduri de înaltă presiune şi cu patru racorduri de medie presiune. De asemenea, este prevăzut cu un conector de înaltă presiune pentru racordarea la butelii atât tip DIN cât şi tip INT. Detentorul treapta a doua este prevăzut şi cu un deflector de bule de concepţie specială.

Detentorul SHARK treapta I poate fi racordat, prin intermediul unui furtun de medie presiune prevăzut cu un cuplaj rapid, la o mască facială ORCA, fabricată de firma DRÄGER, cu detentor treapta a II-a integrat (fig. 3.5).

Fig. 3.4. Detentorul cu două trepte SHARK.

Fig. 3.5. Detentor treapta I SHARK racordat la detentor treapta a II-a integrat la masca facială ORCA.

3.2.1.3. Aparatul cu circuit deschis, autonom, MODULAR 600

Aparatul MODULAR 600 (fig. 3.6) fabricat de firma DRÄGER este un aparat de scufundare ce poate fi utilizat atât ca aparat autonom cât şi ca aparat de rezervă în cazul scafandrilor alimentaţi cu aer de la suprafaţă. Aparatul MODULAR 600 este compus din aparatul de bază BASIC 600 şi din masca facială SECORA 600.

Aparatul de bază BASIC 600 constă din două butelii (2×4 *l* la 300 bar (sc. man.), corespunzător unei rezerve de aer de 2800 l_N, sau 2×6 *l* la 300 bar (sc. man.), corespunzător unei rezerve de aer de 3500 l_N), un detentor treapta I robust şi protejat contra îngheţului şi murdăriei şi un detentor treapta a II-a direct integrat la mască protejat de asemenea contra formării de gheaţă şi murdăriei.

Detentorul treapta I este prevăzut cu patru racorduri de presiune medie oferind suficiente posibilităţi de conectare la detentor treapta a II-a, la ventilul de siguranţă, la sistemul de umplere a costumului cu volum contant etc. Detentorul treapta a II-a este caracterizat printr-o rezistenţă la respiraţie foarte scăzută, conferind aparatului un confort ridicat. Aparatul este prevăzut cu un echipament electronic de avertizare, scafandrul primind un semnal optic în mască atunci când presiunea din butelii scade sub 50 bar (sc. man.). Totuşi, aparatul este dotat şi cu un manometru de control, independent de sistemul electronic de avertizare. Masca facială SECORA 600 este o mască cu un vizor astfel construit încât, prin sistemul antirefracţie, asigură perceperea de către scafandru a unei imagini nedeformate, la scară reală. De asemenea, masca dispune de un dispozitiv special integrat care conduce la îndepărtarea bulelor de aer expirat şi permite o egalizare rapidă a presiunii.

Fig. 3.6. Aparatul de respirat sub apă autonom cu circuit deschis şi debit la cerere MODULAR 600.

3.2.1.4. Aparatul cu circuit deschis, autonom, PA 38

Aparatul autonom de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit de aer livrat în sistemul la cerere PA 38, este un aparat realizat de firma DRÄGER şi utilizat pentru intervenţii subacvatice de scurtă durată. Caracteristicile aparatului PA 38 sunt următoarele (fig. 3.7):

- utilizează butelii de 4 *l*, 6 *l* sau 7 *l*;
- stocajul de gaz poate fi de 1600 l_N, 2800 l_N sau 3600 l_N;
- este echipat cu un detentor treapta a II-a pentru conectarea la masca facială simplă sau la masca cagulei costumului cu volum constant;
- este prevăzut cu un manometru de control a presiunii din butelii;
- este echipat cu un detentor treapta I care reduce presiunea de la valoarea presiunii înalte din butelii, ce poate avea valoarea maximă de 200 bar (sc. man.) sau 300 bar (sc. man.), la o valoare de 5 bar (sc. man.), independentă de adâncimea de imersie.

Aparatul PA 38 este fabricat în trei variante şi anume PA 38/1600, PA 38/2800 şi PA 38/3600.

Modelul PA 38/1600 este utilizat pentru scufundări cu durată scurtă având un stocaj de gaz de 1600 l_N (butelii 2×4 *l* umplute cu aer la 200 bar (sc. man.)). Aparatul prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a gazului din butelii de 40 bar (sc. man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 320 l_N. Acest model este utilizat pentru scufundări la adâncimi de până la 10 m.

Modelul PA 38/2800 are un stocaj de 2800 l_N (butelii 2×7 *l* umplute cu aer la 200 bar (sc. man.)). Aparatul este prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a aerului din butelii de 40 bar (sc. man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 560 l_N. Acest aparat este utilizat la adâncimi de până la 20 m.

Modelul PA 38/3600 are un stocaj de 3600 l_N (butelii 2×6 *l* umplute cu aer la 300 bar (sc. man.)). Aparatul este prevăzut cu un sistem de rezervă corespunzătoare unei presiuni a aerului din butelii de 60 bar (sc. man.), echivalent cu un volum de rezervă de gaz de 720 l_N. Acest model este utilizat la adâncimi de până la 20 m.

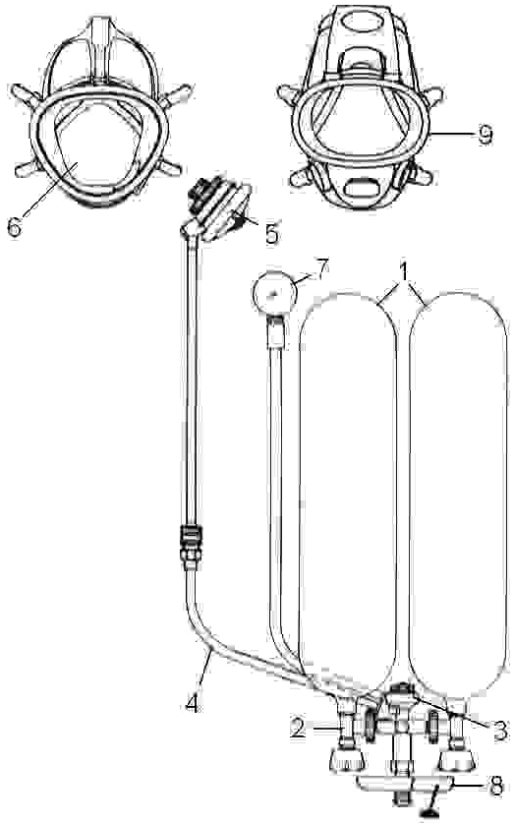


Fig. 3.7. Schema aparatului de respirat sub apă autonom şi cu circuit deschis PA 38:
1- butelii aer comprimat;
2- robinet butelie;
3- detentor treapta I;
4- furtun de medie presiune;
5- detentor treapta a II-a;
6- mască facială simplă;
7- manometru de control;
8- levierul de acţionare a rezervei;
9- masca cagulei costumului cu volum constant.

3.2.2. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS, CU DEBIT LA CERERE, CU ALIMENTARE DE LA SUPRAFAŢĂ

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, în varianta cu alimentare de la suprafaţă prin ombilical oferă scafandrului posibilitatea staţionării un timp îndelungat la adâncimea de lucru deoarece sursa de amestec gazos respirator folosită poate fi ori o baterie de butelii cu capacitate mare de stocare, ori un compresor. Pentru acest tip de aparate cu alimentare de la suprafaţă prin ombilical, se folosesc, de obicei, staţii de stocare a amestecului respirator formate din mai multe butelii de 50 *l* încărcate cu amestec respirator la o presiune de 200 bar (sc. man.). Buteliile sunt grupate sub formă de rack alcătuit, în general, din nouă butelii având o

capacitate maximă de stocare de 90 m_N^3. În condiţiile unei nave suport specializate sau în condiţii de laborator hiperbar, se mai pot utiliza şi recipienţi sferici de 600 *l* la 200 bar (sc. man.) asigurând o capacitate de 120 m_N^3.

Scufundarea de sistem cu astfel de aparate de respirat sub apă este pusă în aplicare pentru lucrări la adâncimi mari sau pentru lucrări de lungă durată. Are avantajul unei alimentări permanente cu amestec respirator, unei protecţii termice foarte bune şi unui sistem de comunicaţie permanentă cu suprafaţa.

Dezavantajul metodei constă într-o desfăşurare înceată, într-o mobilitate redusă a scafandrului şi în necesitatea unui suport logistic de suprafaţă foarte important.

3.2.2.1. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 70

Aparatul PL 70 este un aparat cu circuit deschis, alimentat de la suprafaţă, cu debit livrat la cerere, fabricat de firma DRÄGER. Acest aparat are o greutate mică şi poate fi folosit până la adâncimea maximă de scufundare cu aer (50 m).

Conform schemei aparatului din figura 3.8, aparatul PL 70 este caracterizat printr-o alimentare cu aer prin furtun, fiind echipat totodată şi cu o baterie de butelii cu aer de securitate cu un volum de 800 l_N. La alegere, aparatul poate fi dotat cu un robinet de comutare de la alimentarea de la suprafaţă la alimentarea din rezerva de securitate, fie acţionat manual (PL 70 H), fie acţionat automat (PL 70A).

Aparatul PL 70 este echipat şi cu un detentor treapta a II-a identic cu cel al aparatului PA 38. Detentorul este o valvă de dozaj controlată de respiraţie care se deschide la inspiraţie şi se închide la expiraţie. Acesta asigură livrarea, la cerere, a unui volum de aer necesar scafandrului în faza de inspiraţie. Totodată, detentorul compensează presiunea exterioară a apei. Aerul expirat este eliminat în mediul acvatic exterior printr-o supapă de evacuare. Aparatul este conectat, prin detentor, la masca facială simplă sau la masca facială a cagulei unui costum cu volum constant.

În figura 3.9 sunt prezentaţi doi scafandri echipaţi cu costume cu volum constant şi alimentaţi cu aer prin intermediul aparatelor de respirat PL 70.

Atât la aparatul PL 68 cât şi la aparatul PL 70 alimentarea cu aer este posibilă în două feluri (fig. 3.10):

- prin utilizarea unor baterii de butelii de stocare transportabile la locul scufundării, încărcate la o presiune de 150…200 bar (sc. man.) şi deservite de un reductor de presiune care reduce presiunea de dinainte de detentor la valoarea de după acesta de 8…10 bar (sc. man.);
- cu un compresor de medie presiune, care livrează aer comprimat la o presiune de circa 40 bar (sc. man.) şi la un debit de circa 400 l_N/min, la care se cuplează un reductor de presiune la ieşire, pentru a reduce presiunea aerului comprimat de la 40 bar (sc. man.) la 10 bar (sc. man.), presiune necesară aerului comprimat pe sistem înainte de detentorul treapta a II-a cuplat la masca facială.

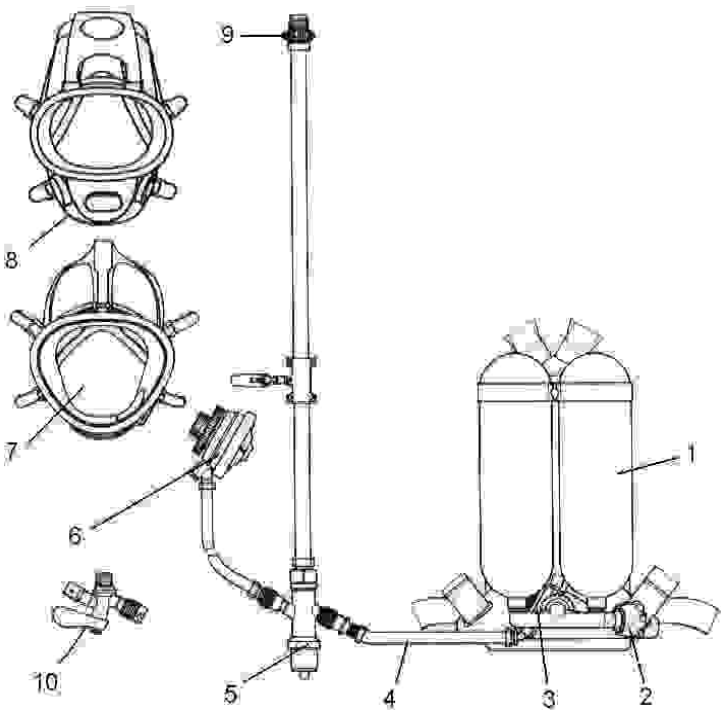


Fig. 3.8. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, PL 70:
1- bloc butelii securitate; 2- robinet butelie; 3- detentor treapta I; 4- furtun de medie presiune; 5- robinet de comutare automată; 6- detentor treapta a II-a; 7- mască facială; 8- mască facială pentru cagula costumului cu volum constant; 9- conector furtun alimentare de la suprafaţă; 10- robinet de comutare manuală.

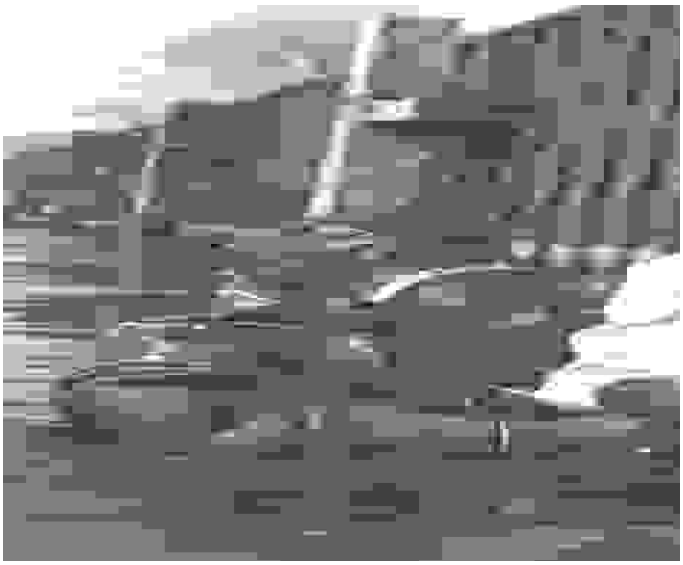


Fig. 3.9. Scafandri echipaţi cu aparate de respirat sub apă cu alimentare de la suprafaţă PL 70.

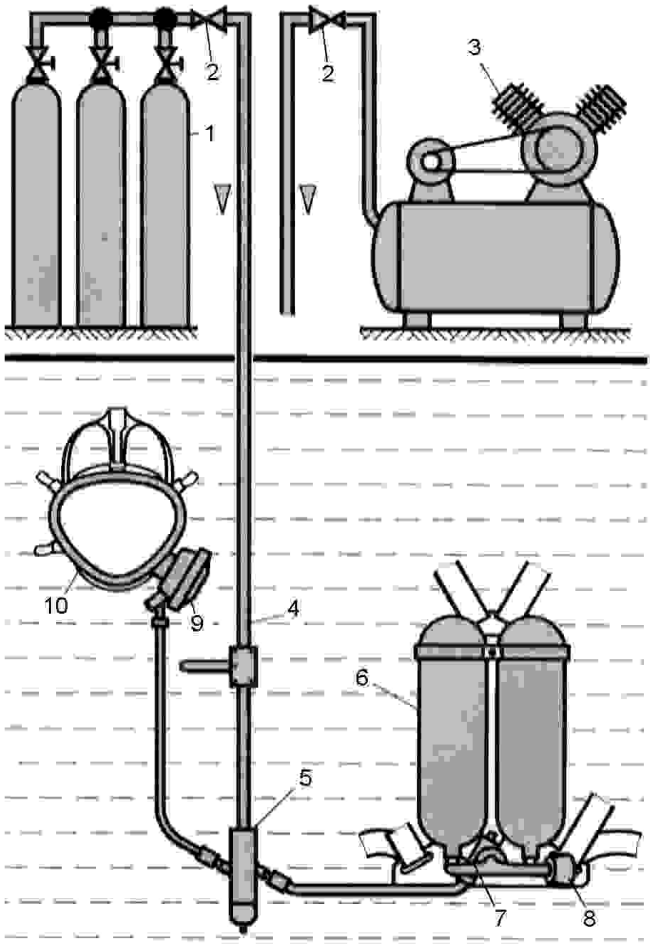


Fig. 3.10. Modalităţi de alimentare cu aer de la suprafaţă a aparatelor PL 70:

1- baterii de butelii de stocare;
2- reductor de presiune treapta I;
3- compresor;
4- furtun de alimentare;
5- robinet de comutare;
6- bloc butelii securitate;
7- detentor treapta I butelii;
8- robinet butelie;
9- detentor treapta a II-a;
10- mască facială.

3.2.2.2. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă MK21 MOD 1

În figura 3.11 este prezentată schema echipamentului MK21 MOD1 şi casca rigidă aferentă, folosit de U.S. Navy pentru operaţiuni de scufundare la adâncimi de până la 100 m cu amestec HELIOX şi până la maximum 60 m cu aer.

Echipamentul este compus din: cască asamblată, ansamblu ombilical şi sistem de alimentare de urgenţă.

Casca este rigidă şi este echipată cu un detentor treapta a II-a de tip Kirby-Morgan alimentat de la suprafaţă printr-un furtun de medie presiune. Presiunea de alimentare este cu 9…11 bar peste presiunea mediului. Furtunul este prevăzut cu o supapă de sens unic, care nu permite gazului să iasă din cască în cazul în care, în mod accidental, furtunul se depresurizează. Această supapă este amplasată lateral pe cască. Casca este înzestrată cu un dispozitiv de dezaburire. De asemenea, aceasta este prevăzută cu sistemul receptor-microfon pentru comunicaţia audio.

Ansamblul ombilical este alcătuit din furtunul de alimentare de la suprafaţă, cablul de comunicaţie audio şi cablul de rezistenţă. Sistemul de alimentare pentru cazuri de urgenţă este compus dintr-o butelie cu detentor treapta I. Butelia are o capacitate de 2 *l* şi presiunea maximă de încărcare de 150 bar (sc. man.). Scafandrul deschide butelia de rezervă în cazul în care alimentarea de la suprafaţă este defectuoasă.

Echipamentul permite respiraţia în circuit deschis, cu un debit maxim de 300 l_N/min. Aparatul oferă un grad ridicat de siguranţă în scufundare şi de fiabilitate, dar libertatea de mişcare a scafandrului este mult limitată faţă de cea a unui scafandru autonom.

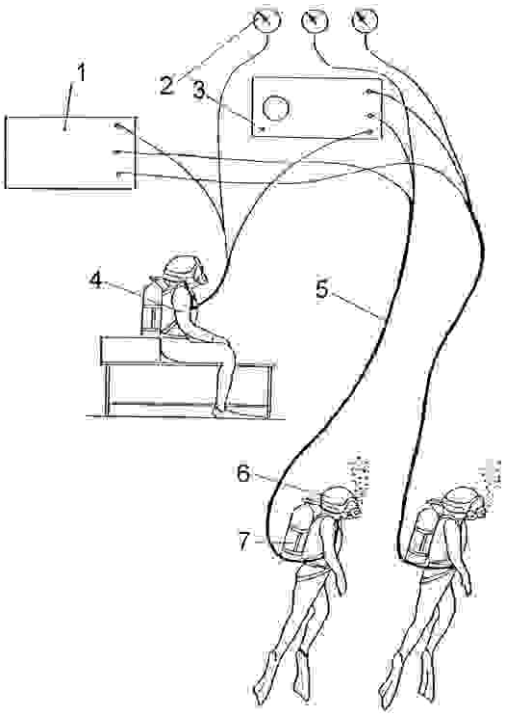


Fig. 3.11. Schema instalaţiei de scufundare cu circuit deschis şi alimentare de la suprafaţă MK 21 MOD 1 şi casca rigidă aferentă: 1- instalaţie de alimentare cu gaz respirator; 2- pneumofazometre; 3- tablou comunicaţii; 4- scafandru însoţitor; 5- ombilical; 6- cască rigidă cu detentor treapta a II-a; 7- butelie cu rezervă de gaz pentru securitate.

3.2.2.3. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafaţă, ISAS

Instalaţia de scufundare cu alimentare de la suprafaţă, ISAS, este un aparat de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit livrat în sistemul la cerere.

Circuitul respirator al instalaţiei de scufundare cu alimentare de la suprafaţă ca şi instalaţia în ansamblul ei, au fost concepute de un colectiv de specialişti aparţinând Centrului de Scafandri Constanţa. Instalaţia este concepută să asigure desfăşurarea scufundărilor cu aer, cu durată mare de imersiune, în şantiere situate la adâncimi de până la 18 m. Instalaţia, prezentată schematic în figura 3.12, cuprinde un rezervor de aer de mare capacitate, o mască facială, ombilicalul şi butelia de rezervă.

a. *Rezervorul de aer*, aflat la suprafaţă, este o butelie de mare capacitate (40 *l* la 200 bar (sc. man.)), sau un bloc de butelii (4×12 *l* la 200 bar (sc. man.)). La sursa de aer este montat un detentor treapta I, echipat cu un manometru de înaltă presiune şi unul de joasă presiune, cu ajutorul cărora se urmăreşte evoluţia presiunii gazului din rezervor şi, respectiv, din furtunul de alimentare.

b. *Ombilicalul* (legătura între scafandru şi instalaţiile de suprafaţă) este compus din furtunul de alimentare cu aer, saula de rezistenţă şi cablul de comunicaţii audio. Furtunul de alimentare este confecţionat din cauciuc siliconic armat şi rezistă la

presiunea de 19 bar (presiunea de lucru). El face legătura între cele două trepte ale aparatului de respirat. Saula de rezistenţă preia solicitările ce apar la ombilical.

c. *Masca facială* este executată din cauciuc şi are o formă adecvată feţei unui scafandru de talie mijlocie. Pe mască este montat detentorul treapta a II-a, prin care respiraţia se face la cerere, sau continuu, în funcţie de opţiunea utilizatorului. Detentorul, tip SUPER-PHYSALIE, nu este prevăzut cu muştiuc, pentru ca scafandrul să poată vorbi. Aerul este inspirat din mască, microfonul este amplasat în partea de jos a măştii, lateral. Spaţiul din mască, prevăzut pentru posibilitatea comunicării, reprezintă un volum mort pentru respiraţie. El se adaugă volumului mort din camera de joasă presiune a detentorului treapta a II-a. Din această cauză, respiraţia prin mască cere scafandrului un efort suplimentar faţă de respiraţia prin piesa bucală din aparatele de respirat cu circuit deschis, autonome.

d. *Butelia de rezervă* este purtată de scafandru pe spate. Ea are capacitate mică: 2 *l* la 150 bar (sc. man.). La butelie este ataşat un detentor treapta I, a cărui funcţionare este pilotată de presiunea hidrostatică. Această butelie este deschisă de scafandru în cazul în care, în mod accidental, s-a întrerupt alimentarea de la suprafaţă.

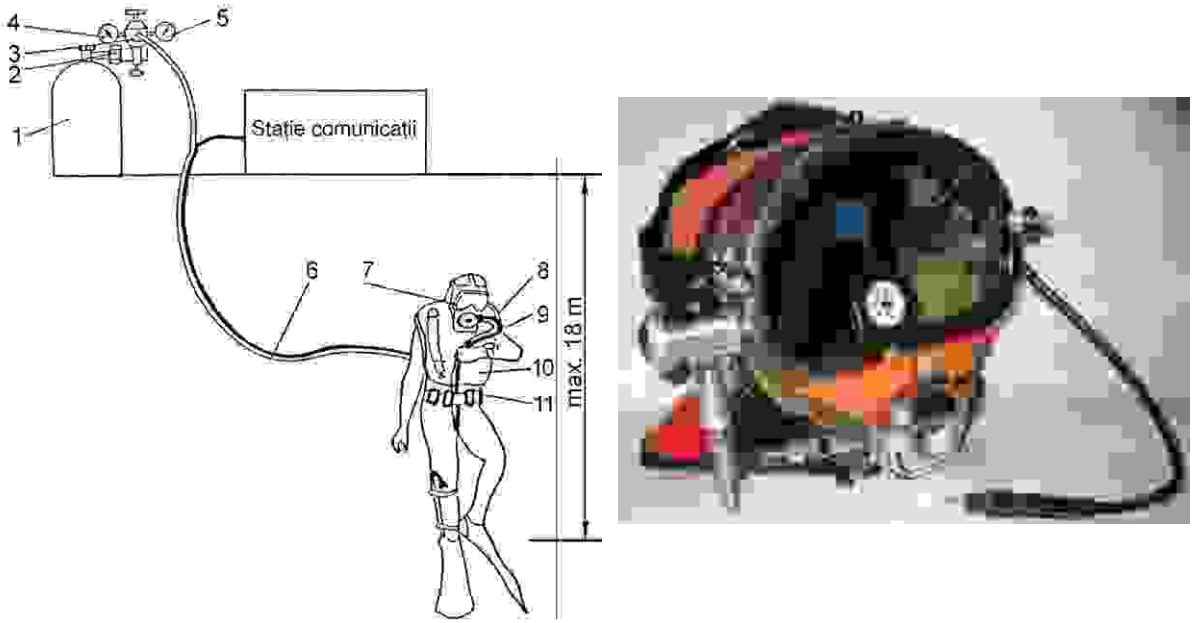


Fig. 3.12. Elementele componente ale instalaţiei de scufundare cu circuit deschis şi alimentare de la suprafaţă, ISAS şi masca facială aferentă: 1- butelii de mare capacitate cu aer; 2- racord; 3- detentor treapta I; 4- manometru de înaltă presiune (0…200 bar); 5- manometru de medie presiune (0…25 bar); 6- ombilical; 7- mască facială cu detentor treapta a II-a; 8- cablu comunicaţii; 9- furtun de alimentare cu aer la presiune medie; 10- vestă de salvare; 11- centură lest.

Furtunul de alimentare cu gaz respirator de la suprafaţă este prevăzut cu o supapă de sens unic care, atunci când se trece pe rezervă, închide calea de pierdere a aerului pe furtunul avariat. Supapa funcţionează şi automat dacă butelia de rezervă este deschisă încă de la începutul scufundării, iar presiunea medie de alimentare de la suprafaţă, de 12 bar (sc. man.) este superioară celei de la butelia de rezervă, de 8 bar (sc. man.). Autonomia oferită de această instalaţie este de două ori mai mare decât a unui aparat autonom cu butelii de 2×12 *l*. Zona de intervenţie a scafandrului este restrânsă de lungimea ombilicalului.

4.

APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS ŞI MIXT

4.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS. GENERALITĂŢI

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis sunt aparate la care o parte din amestecul gazos expirat este evacuat în mediul acvatic exterior, cealaltă parte fiind reciclată şi reintrodusă în circuitul de respiraţie după ce a fost trecută, în prealabil, printr-un cartuş epurator unde este reţinut dioxidul de carbon. Presiunea parţială a oxigenului din amestecurile utilizate este menţinută în limitele de securitate, fără a se creşte prea mult presiunea parţială a gazului inert care determină, de fapt, durata revenirii la presiunea atmosferică (durata decompresiei).

Aceste aparate sunt alcătuite din butelii de stocaj cu amestecuri binare azot–oxigen (NITROX) sau heliu–oxigen (HELIOX), sau cu amestecuri ternare TRIMIX, ($He–N_2–O_2$ sau $Ne–N_2–O_2$), regulator de presiune treapta I, sac respirator şi sistem de livrare automată a debitului de amestec respirator către consumator. Aceste aparate, atunci când sunt autonome, sunt caracterizate printr-o autonomie ridicată şi printr-un randament al scufundării crescut. Atunci când se doreşte un timp de scufundare mai ridicat, se procedează la alimentarea cu amestec respirator sintetic de la suprafaţă sau dintr-un mijloc imersat, realizându-se prin aparatul cu circuit semiînchis o economie de amestec respirator. Adâncimea maximă de scufundare cu astfel de aparate este de 54 m în cazul utilizării amestecurilor NITROX şi peste 54 m în cazul utilizării amestecurilor HELIOX sau TRIMIX. De asemenea şi aceste aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi de două feluri funcţie de debitul de amestec livrat consumatorului:

- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit masic constant*;
- aparate cu circuit semiînchis, *cu debit volumic constant*.

4.2. TIPURI DE APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi, funcţie de modul de preparare a amestecului respirator, de două feluri:

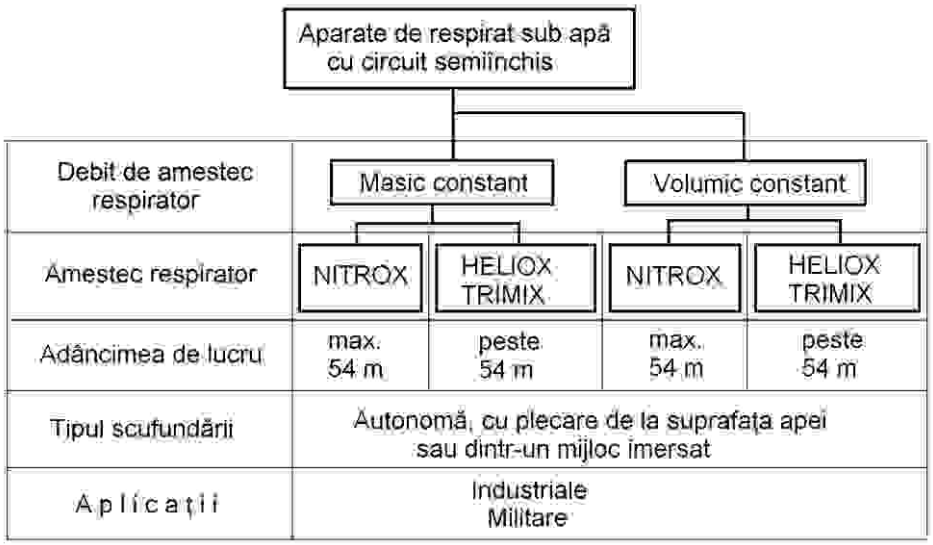
- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec prefabricat;*
- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec preparat local*.

Din prima categorie fac parte aparatele la care stocajul de amestec de gaz este realizat în instalaţii specializate, iar buteliile acestor aparate sunt umplute cu acest amestec respirator prefabricat.

Din cea de-a doua categorie fac parte aparatele la care stocajul de gaze este alcătuit din stocajul de oxigen şi stocajul de gaz inert (gaz diluant al oxigenului), fiecare din cele două gaze fiind înmagazinate în butelii separate. Amestecarea celor două gaze, în vederea obţinerii amestecului respirator dorit, se realizează local, în interiorul aparatului, alimentarea circuitului de respiraţie cu acest amestec efectuându-se prin intermediul unui dispozitiv de dozare complex, de construcţie specială.

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec respirator prefabricat, trebuie să furnizeze, în mod automat, un amestec gazos în care concentraţia oxigenului să scadă o dată cu creşterea adâncimii de scufundare, în aşa fel încât presiunea parţială a acestuia să rămână în limitele admisibile, sau un amestec gazos cu o concentraţie de oxigen constantă pe o anumită gamă de adâncimi.

În figura 4.1 este prezentată o schemă conţinând caracteristicile generale şi performanţele aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis.



NITROX = amestec binar azot–oxigen (N_2–O_2);
HELIOX = amestec binar heliu–oxigen (He–O_2);
TRIMIX = amestec ternar heliu–azot–oxigen (He–N_2–O_2).

Fig. 4.1. Schema generală cu caractersiticile, performanţele şi domeniile de aplicaţie pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis.

4.2.1. APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS, CU AMESTEC RESPIRATOR PREFABRICAT

Aparatele de respirat sub apă cu circuit semiînchis cu amestec prefabricat, sunt aparate la care amestecul respirator este preparat deja în instalaţii speciale fiind înmagazinat la presiune înaltă (200 bar (sc. man.) sau 300 bar (sc. man.)) în buteliile aferente aparatului de respirat. Acest amestec gata preparat este injectat, printr-un dispozitiv de dozare la debit constant, într-un sac respirator unde se combină cu amestecul expirat de către scafandru şi curăţat de dioxidul de carbon, fomând astfel amestecul respirat în mod efectiv de către scafandru. Acest amestec trebuie să

îndeplinească condiţiile privind limitele impuse presiunii parţiale a oxigenului din amestec pentru evitarea fenomenelor de hipoxie sau hiperoxie, urmărind totodată ca presiunea parţială a gazului inert din amestec să fie suficient de mică astfel încât adâncimea de scufundare să fie cât mai mare fără să se producă fenomenul de narcoză şi timpul de decompresie, dictat de presiunea parţială a gazului inert, să fie cât mai scurt.

Aparatele cu circuit semiînchis cu amestec respirator prefabricat sunt alcătuite în principal din butelii de stocaj umplute fie cu amestecuri binare azot-oxigen (NITROX) sau heliu-oxigen (HELIOX), fie cu amestecuri ternare heliu-azot-oxigen (TRIMIX), regulator de presiune treapta I, sac respirator, sistem de livrare automată a debitului de amestec dinspre detentorul treapta I către sacul respirator, supapă de evacuare a surplusului de amestec din sac şi cartuş epurator pentru dioxidul de carbon.

4.2.1.1. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC55

Aparatul de respirat sub apă DC 55, (fig. 4.2), produs de firma AQUALUNG, este un aparat autonom cu circuit semiînchis, cu amestec de gaze prefabricat, utilizat în aplicaţii militare, care asigură stabilitatea compoziţiei amestecului respirat efectiv, prin eliminarea din circuit a unui volum de gaz proporţional cu ventilaţia. Conform schemei de funcţionare din figura 4.3, scafandrul respiră din aparat prin intermediul unei piese bucale (muştiuc), legată la două tuburi gofrate flexibile, fiecare având la capăt câte o supapă: de inspir (7), respectiv de expir (10). Plămânul artificial este alcătuit din două burdufuri concentrice şi anume din sacul respirator mare (4) şi sacul respirator mic (5). La expiraţie, amestecul gazos traversează cartuşul epurator (2) şi se repartizează în cele două burdufuri proporţional cu volumele acestora. În burduful mic, gazul intră printr-o supapă de transfer (8). În momentul inspiraţiei, plămânul artificial îşi micşorează volumul, iar gazul din burduful mic este evacuat în exterior printr-o supapă de evacuare (6) de construcţie specială. Deci, evacuarea este proporţională cu raportul volumelor celor două burdufuri.

Împrospătarea cu gaz se face la cerere. Atunci când cantitatea de gaz în mişcare diminuează datorită evacuării, consumului de oxigen şi fixării dioxidului de carbon de către calcea sodată, partea superioară a sacului respirator acţionează pârghia clapetului de admisie (9). Astfel, are loc împrospătarea cu gaz la presiune medie din buteliile de amestec respirator (1), prin intermediul detentorului (3).

Autonomia aparatului DC 55 este de maximum patru ore.

În funcţie de adâncime, amestecurile supraoxigenate folosite sunt:

- între 0 m şi 25 m se foloseşte amestec NITROX cu 60% oxigen şi 40% azot, autonomia fiind de 3 ore;
- între 25 m şi 45 m se foloseşte amestec NITROX cu 40% oxigen şi 60% azot, autonomia fiind de 25 min. (determinată de probleme de decompresie);
- între 45 m şi 55 m se foloseşte amestec NITROX cu 32,5% oxigen şi 67,5% azot, autonomia fiind de 30 min.

Scufundările cu amestecuri NITROX supraoxigenate sunt prin excelenţă cu profil militar. Aceste scufundări se execută de către scafandrii de luptă antimine submarine.

Fig. 4.2. Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DC 55.

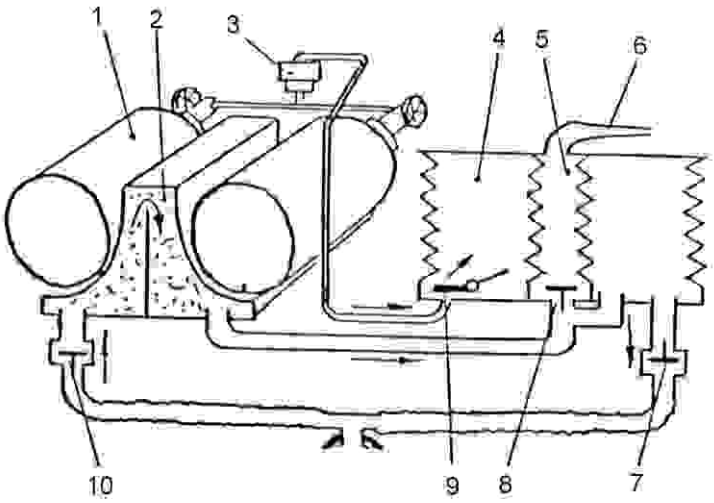


Fig. 4.3. Schema de principiu a aparatului cu circuit semiînchis DC 55.

Un alt aparat din aceeaşi categorie, dar mai performant datorită în special cartuşului filtrant, este aparatul de respirat sub apă MIXGERS 78 fabricat de firma FENZY. Construit pe acelaşi principiu, acest aparat permite utilizarea unui amestec respirator ternar TRIMIX alcătuit din 23% oxigen, 37% azot şi 40% heliu, în scufundări de 10 min. la adâncimea de 80 m, cu o decompresie în apă, cu oxigen. Oxigenul pur este furnizat printr-o narghilea la care scafandrul se leagă printr-un dispozitiv special, fără să părăsească muştiucul său.

4.2.1.2. Aparatul LAR VII Standard funcţionând în varianta cu amestec în circuit semiînchis

Aparatul de respirat sub apă autonom LAR VII Standard (fig. 4.4), fabricat de firma DRÄGER, poate funcţiona şi cu amestec gazos prefabricat în circuit semiînchis.

Pentru varianta de funcţionare în circuit semiînchis, se utilizează amestecul de gaze standard NATO, NITROX B (60% O_2, 40% N_2) livrat către sacul respirator. Cu ajutorul unui dispozitiv de dozare, circuitul respirator este alimentat cu amestec gazos proaspăt. Gazul excedentar iese prin supapa de suprapresiune şi distribuitorul de bule, în mediul acvatic exterior. Aparatul LAR VII Standard este conceput pentru un consum maxim de oxigen de 2,5 l_N/min. Dozarea gazului pentru amestecul de gaze ales este stabilită pentru consumul corespunzător nivelului de activitate impus, debitul fiind până la 5 l_N/min. De aici, rezultă că adâncimea de scufundare pentru amestecul respirator NITROX B este în domeniul 0…24 m.

Pentru reţinerea dioxidului de carbon din amestecul gazos expirat se utilizează un cartuş epurator care constă dintr-o canistră ce conţine o masă absorbantă (calce sodată) de tipul DiveSorbPro cu volumul de 2,5 *l* pentru o scufundare. La o temperatură cuprinsă între -2^0C şi $+40^0$C o canistră de calce sodată umplută corect cu masa absorbantă, asigură o autonomie de 150 min. Aparatul LAR VII Standard are dimensiunile: lungimea de 425 mm, lăţimea de 300 mm şi grosimea de 170 mm. Greutatea aparatului este de aproximativ 15 kg în aer şi neutră în apă, cu sacul respirator umflat cu circa 2 *l* oxigen. Aparatul poate fi utilizat în varianta cu amestec de către scafandrii deminori, la adâncimi de până la 24 m.

Fig. 4.4. Scafandru deminor echipat cu aparat LAR VII Standard (funcţionare în varianta cu amestec în circuit semiînchis).

4.2.1.3. Aparatul cu circuit semiînchis cu amestec prefabricat, FGT I

Aparatul de respirat sub apă, autonom, FGT I, (fig. 4.5) fabricat de firma germană DRÄGER, este un aparat cu circuit semiînchis utilizând amestecuri de gaze prefabricate. Acest aparat este conceput pentru activităţi cu caracter militar la adâncimi cuprinse între 0 m şi 54 m.

Fig. 4.5. Scafandru militar echipat cu aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, FGT I.

Aparatul FGT I are o amprentă magnetică scăzută şi o amprentă acustică redusă, conform normelor NATO, ceea ce îl face utilizabil pentru operaţiuni speciale.

Aparatul asigură o autonomie a scufundării de până la trei ore în funcţie de nivelul de efort al activităţii subacvatice depusă de scafandru. De asemenea, aparatul este cu dimensiuni reduse, este compact, uşor de utilizat şi de întreţinut.

În continuare, sunt prezentate datele tehnice mai importante ale aparatului:

- Principiul de funcţionare: aparat cu circuit semiînchis;
- Adâncimea de scufundare/timp de scufundare:
  - 0…24 m cu amestec NITROX B/aprox. 170 min;
  - 0…42 m cu amestec NITROX C/aprox. 100 min;
  - 0…54 m cu amestec NITROX D/aprox. 60 min;
- Amestecurile respiratorii tip NATO:
  - NITROX B (60% O_2, 40% N_2);
  - NITROX C (40% O_2, 60% N_2);
  - NITROX D (32,5% O_2, 67,5% N_2).
- Calcea sodată: Drägersorb 400, aprox. 3,5 ℓ pentru o scufundare;
- Dimensiunile: 660 mm lungime, 465 mm lăţime, 225 mm grosime;
- Greutatea aparatului pe uscat: aprox. 25 kgf;
- Caracteristicile buteliei cu amestec gazos: volumul interior 2,5 *l*, diametrul 117 mm, presiunea de operare 200 bar (sc. man.), materialul aluminum alloys are alloys in which aluminium (Al) is the predominant metal; the typical alloying elements are copper, magnesium, manganese, silicon, tin and zinc.

4.2.1.4. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, DOLPHIN I

Aparatul de respirat sub apă autonom cu circuit semiînchis DOLPHIN I (fig. 4.6), fabricat de firma germană DRÄGER, este un aparat care foloseşte amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate. Amestecul respirator NITROX este furnizat la debit constant şi această livrare este suplimentată de un detentor treapta a II-a pentru consum de oxigen mai mare în cazul unei activităţi subacvatice mai intense. Aparatul DOLPHIN I, care este un aparat de respirat sub apă utilizat în scufundări civile profesionale, prezintă multe avantaje faţă de aparatele în circuit deschis cum ar fi:

- consum de gaz respirator cu până la 95% mai puţin;
- timp de scufundare fără decompresie mai lung;
- decompresie efectuată în condiţii de mai mare siguranţă;
- echilibru termic mai lung datorită căldurii generate în cartuşul epurator;
- dimensiuni mai mici decât aparatele în circuit deschis;
- generează doar câteva bule mici.

Aparatul DOLPHIN I este alcătuit din următoarele componente principale: unitatea de bază cuprinzând cartuşul epurator şi sacul respirator, furtunurile respiratoare cu piesa bucală, detentorul treapta a II-a integrat sacului respirator, reductorul de presiune pentru gazul din butelie, harnaşamentul şi vesta de salvare cu lest integrat, butelia cu amestec NITROX de diferite mărimi şi butelia de securitate.

În continuare sunt prezentate datele tehnice semnificative ale aparatului:

- Principiul de funcţionare: aparat cu circuit semiînchis cu dozaj constant, cu sac respirator şi cartuş filtrant;
- Substanţă absorbantă pentru dioxidul de carbon: DiveSorb, aprox. 2,7 *l* pentru o scufundare;

- Sacul respirator: variaţie de volum între inspiraţie şi expiraţie de circa 4,5 *l*, volumul total fiind de 10,5 *l*;
- Dimensiuni: 520 mm lungime, 370 mm lăţime şi 235 mm grosime;
- Greutatea aparatului: 15 kgf pe uscat şi aproximativ neutră în apă;
- Volum interior butelie: 4 *l*;
- Presiune de încărcare butelie: 200 bar (sc. man.);
- Material butelie: oţel;
- Adâncimea scufundării/timp de scufundare:
  - 0…20 m pentru NITROX 60/40 (O_2/N_2)/125 min.;
  - 0…24 m pentru NITROX 50/50 (O_2/N_2)/95 min.;
  - 0…30 m pentru NITROX 40/60 (O_2/N_2)/67 min.;
  - 0…45 m pentru NITROX 32/68 (O_2/N_2)/47 min.

Fig. 4.6. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat DOLPHIN I.

4.2.1.5. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I

Aparatul de respirat sub apă autonom, cu circuit semiînchis ATLANTIS I (fig. 4.7), fabricat de firma DRÄGER, este un aparat care utilizează amestec de gaze prefabricat, în special NITROX.

Versiunea standard a aparatului care cântăreşte 15 kg pe uscat şi care are flotabilitate nulă în apă, este prevăzută cu o butelie având volumul interior de 4 *l* ce poate fi încărcată la o presiune maximă de 200 bar (sc. man.) şi este concepută astfel încât să garanteze o durată a scufundării de 110 min. la adâncimi cuprinse între 0 m şi 20 m.

Este posibilă şi utilizarea unor butelii cu volume interioare mai mari.

Fig. 4.7. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, ATLANTIS I.

Conţinutul buteliei cu amestec respirator este suficient pentru efectuarea unei scufundări cu o durată de 40 min. la adâncimea de 45 m. Tehnologia specifică acestui aparat, oferă scafandrilor un amestec azot-oxigen (NITROX) cu proporţiile componentelor de 40% oxigen şi 60% azot. Aparatul de respirat sub apă ATLANTIS I poate fi utilizat şi în scufundări cu caracter civil.

4.2.1.6. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat MK 6

Aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, utilizând amestec respirator prefabricat, MK 6 (fig. 4.8), este un aparat conceput de U.S. Navy pentru aplicaţii militare. Acest aparat a fost unul dintre aparatele standard ale U.S. Navy, utilizat pentru operaţiuni militare de către scafandri deminori. Aparatul poate utiliza atât amestec heliu-oxigen (HELIOX), cât şi amestec azot-oxigen (NITROX).

Aparatul MK 6 utilizează o injecţie la debit constant de gaz. Aparatul are în componenţă două butelii pentru gazul respirator (NITROX sau HELIOX) şi, într-o anumită configuraţie, o butelie cu oxigen, pentru efectuarea decompresiei în caz de urgenţă. Buteliile cu amestec gazos au fiecare capacitatea de 2400 l_N de amestec şi sunt încărcate la presiunea de 210 bar (sc. man.). Adâncimea maximă de utilizare a aparatului este de 60 m, iar durata scufundării este cuprinsă în intervalul 30 min…3 ore, fiind funcţie de temperatura apei şi de activitatea depusă.

Fig. 4.8. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, MK 6.

4.2.1.7. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON

Aparatul de respirat sub apă, cu circuit semiînchis, utilizând amestec respirator prefabricat, HALCYON (fig. 4.9), este un aparat utilizat pentru scufundări civile, fiind fabricat de firma americană BROWNIES THIRD LUNG.

Aparatul este utilizat în special de către scafandri care efectuează scufundări în peşteri, scufundări la epave, scufundări civile la mare adâncime şi scufundări cu caracter ştiinţific.

Sacul respirator este fixat la spatele scafandrului. Spre deosebire de alte tipuri de aparate în circuit semiînchis, aparatul HALCYON alimentează scafandrul cu amestec respirator conform cerinţelor metabolice ale scafandrului, printr-o injecţie la debit masic constant. În consecinţă, cantitatea de amestec respirator este utilizată mai eficient (de circa opt ori mai eficient decât în cazul unui aparat cu circuit deschis).

Aparatul se caracterizează printr-o autonomie de peste 100 min. la adâncimea de 90 m. Aparatul utilizează un singur amestec respirator, stocat în două butelii. Aparatul HALCYON poate fi utilizat şi în circuit deschis în caz de urgenţă, scafandrul respirând direct amestecul respirator din acelaşi detentor.

Fig. 4.9. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, HALCYON.

4.2.1.8. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, AZIMUTH

În anul 1999, firma producătoare de echipament de scufundare Mares produce aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis, cu debit constant, AZIMUTH (fig. 4.10). Aparatul este asemănător în construcţie şi funcţionare cu aparatele DRÄGER RAY, DRÄGER ATLANTIS/DOLPHIN, SUBMATIX. Aparatul AZIMUTH este certificat CE și a fost conceput special pentru scufundări cu caracter civil până la adâncimea de 33 m utilizând amestecuri NITROX cu o concentraţie de oxigen de 32%, 40% şi 50%:

- cu amestec NITROX cu 50% O_2 , adâncimea maximă este de 18 m;
- cu amestec NITROX cu 40% O_2 , adâncimea maximă este de 25 m;
- cu amestec NITROX cu 32% O_2 , adâncimea maximă este de 33 m.

Pentru fiecare amestec NITROX ales, scafandrul trebuie să calibreze la începutul scufundării, cu ajutorul unui debitmetru, debitul pentru amestecul NITROX respectiv:

- pentru amestec NITROX cu 32% O_2 / 68% N_2: 15,6 *l*/min;
- pentru amestec NITROX cu 40% O_2 / 60% N_2: 9,6 *l*/min;
- pentru amestec NITROX cu 50% O_2 / 50% N_2: 6,6 *l*/min.

Aparatul este prevăzut cu două butelii ce pot fi încărcate cu două amestecuri diferite de NITROX, unul pentru coborâre, urcare şi eventual decompresie, iar celălalt pentru adâncimea maximă a scufundării. Comutarea se face de către scafandru prin intermediul unui comutator special.

Alte date tehnice:

- Capacitate sac respirator: 2 x 6 *l*;
- Capacitate canistră: 2,35 kg de Sodalime;
- Durata de scufundare: 2,5 ore pentru NITROX 32% şi 4 ore pentru NITROX 60%);
- Temperatura optimă a apei: -1° + 35 °C;
- Greutate: 27 kg cu absorbant; flotabilitate neutră în apă.

Varianta AZIMUTH AF comercializată din anul 2002 în EU, foloseşte şi amestec TRIMIX şi poate fi utilizat până la adâncimea maximă de 120 m în funcţie de amestec. La această variantă, buteliile sunt de capacitate mai mare, de 2 x 10 *l* fiecare la 200 bar, sacul respirator de 6,2 *l* fiecare, iar greutatea de 45 kg cu absorbant și flotabilitate neutră în apă.

Fig. 4.10. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, AZIMUTH.

4.2.1.9. Aparatul cu circuit semiînchis, cu amestec prefabricat, SUBMATIX

SUBMATIX 100 ST (fig. 4.11) este un aparat de respirat sub apă cu circuit semiînchis produs în Germania în anul 2003.

Aparatul a fost special conceput pentru scufundări cu caracter civil până la adâncimea maximă de 40 m, fiind asemănător în construcţie şi funcţionare cu recirculatoarele DRÄGER ATLANTIS, DRÄGER RAY și AZIMUTH. Este certificat CE fiind folosit şi comercializat în UE.

5.

CALCULUL GAZODINAMIC AL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ

În acest capitol sunt prezentate calcule specifice mecanicii fluidelor compresibile utile la proiectarea circuitelor gazodinamice ale aparatelor speciale de respirat sub apă.

Schemele de principiu care au stat la baza proiectării unor aparate speciale de respirat sub apă cu circuit închis, semiînchis sau mixt, sunt prezentate în figurile 5.1 (aparatul de respirat sub apă cu circuit mixt) şi 5.2 (aparatul de respirat sub apă cu circuit semiînchis). Schemele comportă trei blocuri distincte: blocul de alimentare cu amestec respirator, blocul de alimentare cu oxigen şi blocul cu sacul respirator. Primele două blocuri au în componenţă unul, două sau trei ajutaje: de injecţie AI, de compensare AC şi de spălare a sacului respirator AS. În continuare, sunt prezentate elementele de mecanica fluidelor compresibile specifice calculelor de gazodinamică a circuitelor aparatelor de respirat sub apă speciale şi relaţiile de calcul aferente elementelor fiecărui bloc din componenţa acestor aparate.

5.1. CURGEREA GAZELOR RESPIRATORII PRIN AJUTAJELE DE INJECŢIE, DE COMPENSARE ŞI DE SPĂLARE

În paragrafele următoare sunt prezentate elemente de teoria ajutajelor. Curgerile prin ajutaje sunt considerate ca adiabatice reversibile (izentropice).

5.1.1. CURGEREA IZENTROPICĂ PRIN AJUTAJE. RELAŢIA LUI HUGONIOT

Pentru ajutajele propuse ca elemente care să realizeze injecţia, compensarea şi spălarea, se pot face următoarele ipoteze de calcul: curgerea este adiabatică $\Delta Q = 0$, fără frecare $\Delta W_f = 0$, precum şi fără lucru mecanic util $\Delta W_M = 0$.

Ţinând cont de ipotezele de mai sus şi apelând la ecuaţia de bilanţ energetic scrisă pentru unitatea de masă, deci cu mărimi specifice, sub forma:

$$\Delta\left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right) = -\Delta\left|W_f\right| + \Delta W_M + \Delta Q = 0, \tag{5-1}$$

se poate scrie ecuaţia diferenţială:

$$\mathrm{d}\left(H + \frac{v^2}{2} + gz\right) = \mathrm{d}H + \mathrm{d}\left(\frac{v^2}{2}\right) + \mathrm{d}(gz) = 0, \tag{5-2}$$

unde: $H = E + p/\rho$ este entalpia, E energia internă, p presiunea absolută, ρ densitatea gazului, $v^2/2$ energia cinetică, gz energia potenţială, W_f lucrul mecanic datorat forţelor de frecare, iar W_M lucrul mecanic util.

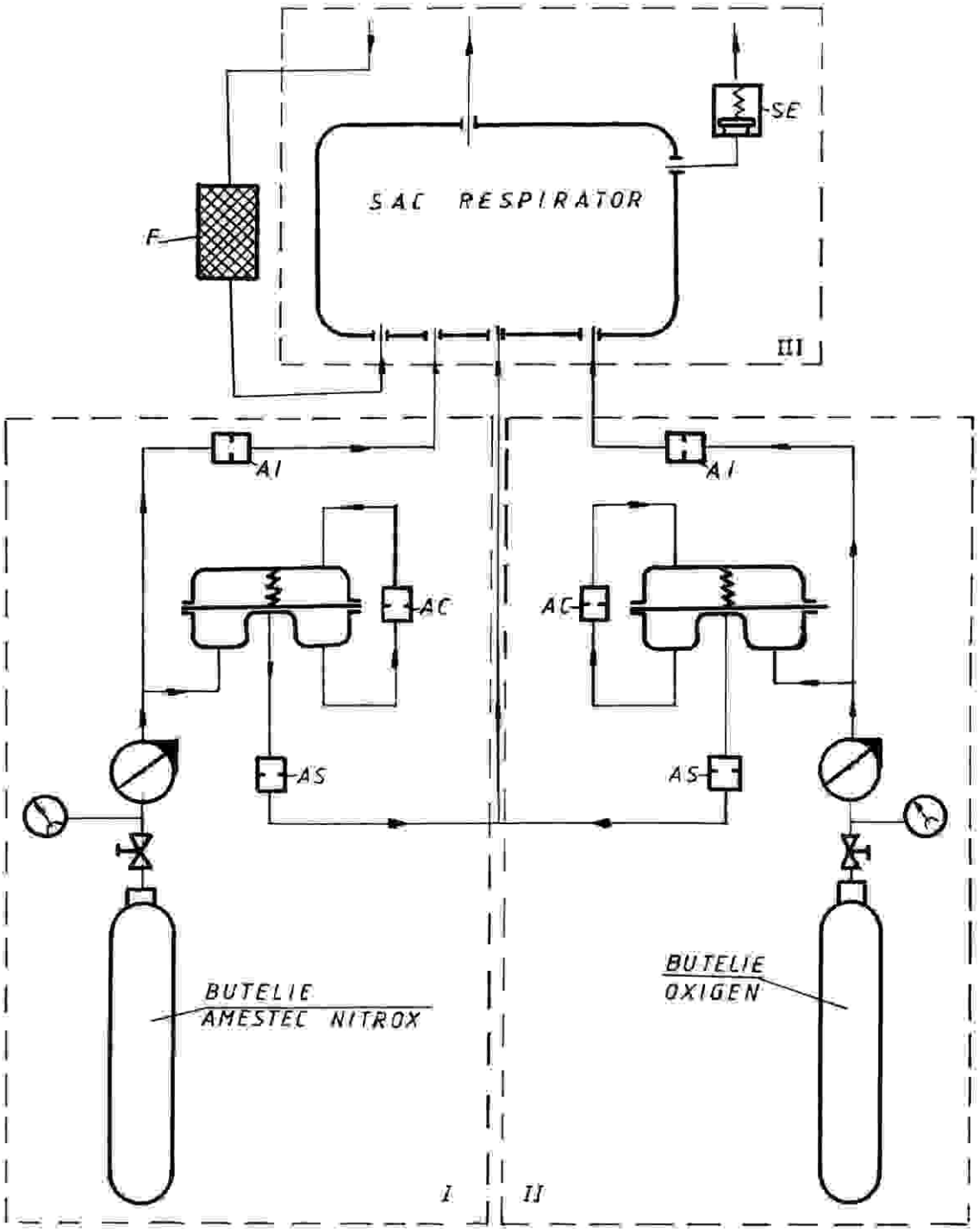


Fig. 5.1. Schema de principiu, simplificată, a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt: I – bloc de alimentare cu amestec respirator NITROX; II – bloc de alimentare cu oxigen; III – bloc cu sac respirator; SE – supapă de evacuare; AI – ajutaj de injecţie; AC – ajutaj de compensare; AS – ajutaj de spălare a sacului respirator.

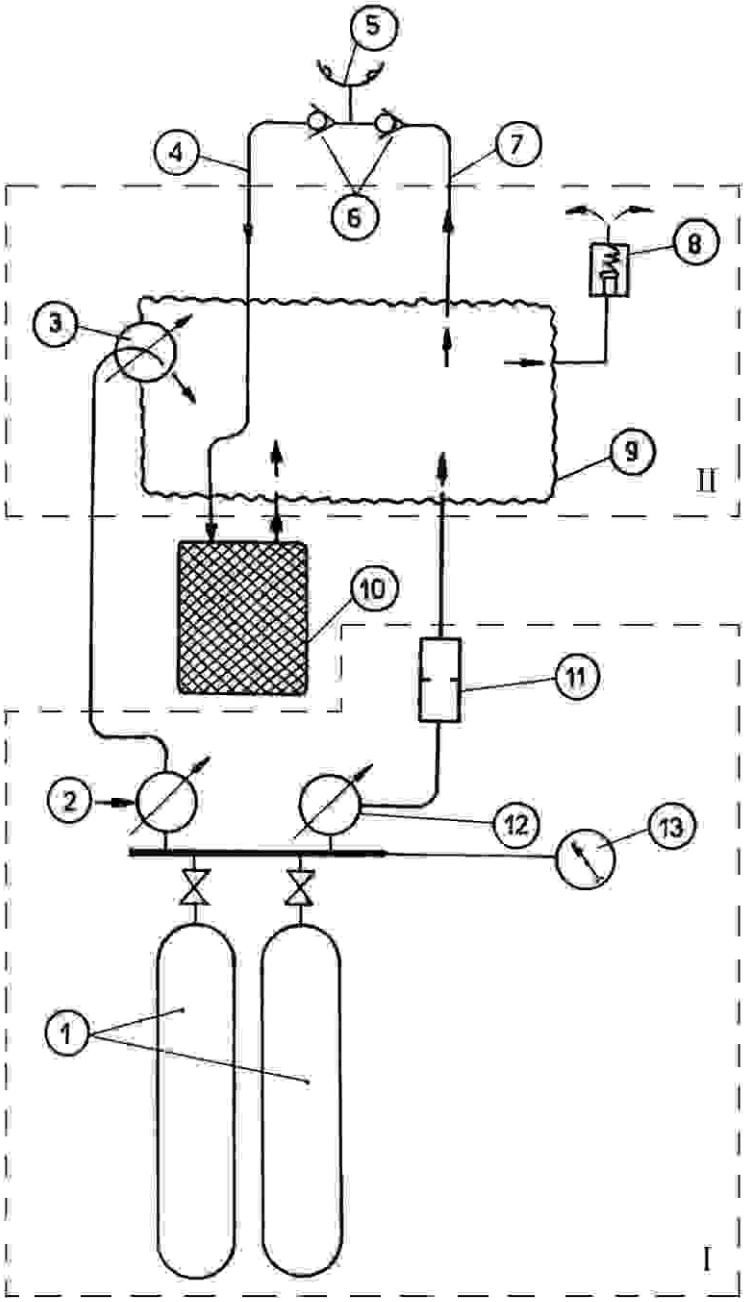


Fig. 5.2. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis: I – bloc de alimentare cu amestec respirator; II – bloc cu sac respirator; 1 – butelii stocare amestec respirator; 2 – reductor de presiune treapta întâi pilotat; 3 – reductor de presiune treapta a doua; 4 – furtun expiraţie; 5 – muştiuc; 6 – bloc supape; 7 – furtun inspiraţie; 8 – supapă evacuare; 9 – sac respirator; 10 – epurator de dioxid de carbon; 11 – ajutaj de injecţie; 12 – reductor de presiune treapta întâi nepilotat; 13 – manometru control presiune.

Termenii ecuaţiilor de mai sus sunt, din punct de vedere dimensional, viteze la pătrat $\left[L^2 T^{-2}\right]$, iar din punct de vedere energetic, energii specifice raportate la masa de fluid. Pentru studierea curgerii prin ajutaj, pe lângă ecuaţia 5-2 sunt necesare ecuaţii suplimentare şi anume:

– ecuaţia termică de stare a gazelor perfecte (ecuaţia Clapeyron – Mendeleev):

$$\frac{p}{\rho} = R\,T\,, \tag{5-3}$$

unde: ρ este densitatea gazului, iar R constanta gazului;

– ecuaţia de continuitate pentru fluide compresibile ($Av = ct.$), care poate fi scrisă sub forma diferenţială:

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho} + \frac{\mathrm{d}v}{v} + \frac{\mathrm{d}A}{A} = 0\,, \tag{5-4}$$

unde: A este aria secţiunii transversale corespunzătoare tubului de curent;

– ecuaţia energiei pentru fluidul perfect (legea lui Bernoulli) a cărei formă diferenţială este:

$$\mathrm{d}(gz) + \mathrm{d}\left(\frac{v^2}{2}\right) + \frac{\mathrm{d}p}{\rho} = 0\,. \tag{5-5}$$

Ţinând cont de ecuaţiile 5-2 şi 5-5 se poate scrie expresia variaţiei de entalpie în condiţiile ipotezelor de calcul adoptate:

$$\mathrm{d}H = \frac{\mathrm{d}p}{\rho}\,. \tag{5-6}$$

Pentru gazul perfect se poate scrie:

$$H = c_p\,T = \frac{k}{k-1}\,\frac{p}{\rho}\,, \tag{5-7}$$

unde $k = c_p / c_v$ este exponentul adiabatic, iar c_p şi c_v sunt căldurile specifice la presiune constantă şi respectiv la volum constant, pentru gazul de lucru.

Rezultă relaţia:

$$\mathrm{d}H = \frac{k}{k-1}\,\mathrm{d}\left(\frac{p}{\rho}\right) = \frac{k}{k-1}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\rho} - p\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho^2}\right), \tag{5-8}$$

de unde:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\rho} = \frac{k}{k-1}\,\frac{\mathrm{d}p}{\rho} - \frac{k}{k-1}\,p\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho^2}\,. \tag{5-9}$$

Integrând ecuaţia 5-9 se regăseşte ecuaţia transformării adiabatice:

$$\frac{p}{\rho^k} = ct. \tag{5-10}$$

După cum se cunoaşte, o transformare adiabatică reversibilă este în acelaşi timp şi izentropică.

Pentru a pune în evidenţă relaţiile diferenţiale între presiune *p*, viteză *v* şi aria secţiunii *A*, se porneşte de la ecuaţia 5-5 în care se neglijează termenul corespunzător forţelor masice (de greutate, $\mathrm{d}(g\,z)=0$) rezultând:

$$\mathrm{d}\left(\frac{v^2}{2}\right)+\frac{\mathrm{d}p}{\rho}=0\,.$$

Viteza sunetului (celeritatea) pentru procesele izentropice este:

$$a=\sqrt{\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}\rho}}\quad \text{şi, deci,}\quad \mathrm{d}p=a^2\,\mathrm{d}\rho \tag{5-11}$$

de unde rezultă relaţia:

$$v\,\mathrm{d}v=-\frac{\mathrm{d}p}{\rho}=-a^2\frac{\mathrm{d}\rho}{\rho}\,. \tag{5-12}$$

Eliminând $\mathrm{d}\rho/\rho$ din ecuaţiile 5-4 şi 5-12 rezultă relaţia diferenţială între *A* şi *v*, care poartă denumirea de *relaţia lui Hugoniot*:

$$\frac{\mathrm{d}A}{A}+\frac{\mathrm{d}v}{v}\left(1-\frac{v^2}{a^2}\right)=0\,, \tag{5-13}$$

sau

$$\frac{\mathrm{d}A}{A}+\frac{\mathrm{d}v}{v}\left(1-M^2\right)=0\,, \tag{5-14}$$

unde $M=v/a$ reprezintă numărul lui Mach.

Se poate scrie şi relaţia diferenţială între *v* şi *p* sub forma:

$$\frac{\mathrm{d}v}{v}+\frac{1}{M^2k}\frac{\mathrm{d}p}{p}=0\,. \tag{5-15}$$

Relaţia lui Hugoniot arată că într-un ajutaj dat, în care există o curgere adiabatică reversibilă:

a) Dacă $v<a$, ($M<1$ – viteze subsonice), viteza variază în sens invers cu secţiunea: $\mathrm{d}v>0$ dacă $\mathrm{d}A<0$.

b) Dacă $v>a$, ($M>1$ – viteze supersonice), viteza variază în acelaşi sens cu secţiunea: $\mathrm{d}v>0$ dacă $\mathrm{d}A>0$.

c) Viteza de curgere a unui fluid nu poate fi egală cu viteza locală a sunetului ($v=a,\ M=1$) decât într-o secţiune unde aria *A* prezintă un extrem. Acest extrem nu poate fi decât un minim deoarece, conform situaţiilor a) şi b), nu se poate trece de la regim subsonic la regim critic sau de la regim supersonic la regim critic decât prin micşorarea secţiunii.

5.1.2. RELAŢIA LUI BARRÉ DE SAINT-VENANT. DEBITUL MASIC ÎN REGIM DE BLOCAJ

Pornind de la ecuaţia 5-2 şi neglijând termenul corespunzător forţei masice se obţine:

$$\mathrm{d}\left(\frac{v^2}{2}\right)+\mathrm{d}H=0,$$

iar prin integrare rezultă:

$$\frac{v^2}{2}+H=ct. \tag{5-16}$$

Pentru gazul perfect $\left[H=c_pT=(k/k-1)(p/\rho)\right]$ relaţia 5-16 devine:

$$\frac{v^2}{2}+\frac{k}{k-1}\frac{p}{\rho}=ct. \tag{5-17}$$

Dacă se notează p_0, ρ_0, T_0 parametrii caracteristici ai gazului sau amestecului de gaze într-o secţiune S_0 unde viteza este $v_0=0$ (cazul alimentării ajutajului dintr-un recipient sau dintr-o conductă cu diametru foarte mare în raport cu diametrul caracteristic al ajutajului) şi se aplică relaţia 5-16, se obţine

$$\frac{v^2}{2}+H=H_0 \qquad \text{sau} \qquad \frac{v^2}{2}+\frac{k}{k-1}\frac{p}{\rho}=\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0},$$

de unde rezultă expresia vitezei:

$$v=\sqrt{\frac{2k}{k-1}\left(\frac{p_0}{\rho_0}-\frac{p}{\rho}\right)}=\sqrt{\frac{2k}{k-1}R(T_0-T)}.$$

Curgerea amestecului gazos prin ajutaj fiind izentropică şi deci:

$$\frac{p}{\rho^k}=\frac{p_0}{\rho_0^k} \qquad \text{sau} \qquad \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^k=\frac{p_0}{p},$$

rezultă următoarea expresie a vitezei locale în lungul ajutajului, în funcţie de parametrii amestecului gazos la intrarea (p_0 şi ρ_0):

$$v=\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \tag{5-18}$$

Aceasta este relaţia lui Barré de Saint-Venant cu ajutorul căreia se poate calcula viteza v într-o anumită secţiune a ajutajului, în funcţie de parametrii caracteristici ai fluidului în amonte de ajutaj (p_0, ρ_0) în ipoteza că viteza de acces în ajutaj poate fi neglijată ($v=0$).

Limita superioară pentru viteza de curgere se poate determina pornind de la relaţia lui Barré de Saint-Venant şi considerând o detentă a gazului de la presiunea p_0 la presiunea vidului $(p=0)$. În acest caz, deoarece $p=0$, $p/\rho=0$ şi $T=0$ se obţine:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}} = a_0\sqrt{\frac{2}{k-1}} = \sqrt{kRT_0}\sqrt{\frac{2}{k-1}}, \tag{5-19}$$

unde a_0 este celeritatea corespunzătoare condiţiilor de alimentare a ajutajului.

Debitul masic printr-un ajutaj cu condiţii de alimentare $v_0 = 0$, p_0 şi T_0 se obţine înlocuind în relaţia debitului masic $q_m = \rho A v$ expresia vitezei *v* dată de relaţia lui Barré de Saint-Venant:

$$q_m = \rho A\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \tag{5-20}$$

Deoarece curgerea prin ajutaj este izentropică şi deci $p/\rho^k = p_0/\rho_0^k$ sau $\rho = \rho_0(p/p_0)^{1/k}$, se obţine expresia debitului masic de gaz:

$$q_m = A\rho_0\left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/k}\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}}\sqrt{1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}}. \tag{5-21}$$

Introducând viteza maximă $v_{\max}$ conform relaţiei 5-19 şi notând:

$$Y = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{1/k}\sqrt{1-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \tag{5-22}$$

se poate scrie expresia debitului masic prin ajutaj:

$$q_m = \rho_0 A v_{\max} Y. \tag{5-23}$$

Se observă că pentru parametrii corespunzători alimentării ajutajului (p_0, ρ_0 şi T_0) constanţi, debitul masic variază cu produsul AY. Considerând că pentru un anumit fluid exponentul adiabatic *k* este o constantă, se poate analiza variaţia lui *Y* funcţie de raportul p/p_0:

$$Y = 0 \qquad \text{pentru} \qquad \begin{cases} p = 0 & (p/p_0 = 0) \\ p/p_0 = 1 \end{cases}.$$

Funcţia *Y* are un maxim pentru valoarea lui p/p_0 care anulează derivata. Această valoare este:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{5-24}$$

unde p_{cr} reprezintă presiunea la starea critică corespunzătoare atingerii vitezei locale a sunetului.

Revenind la expresia debitului masic 5-23 şi considerând că p_0, ρ_0 şi T_0 sunt constante, debitul q_m este o constantă şi deci se poate scrie relaţia:

$$\mathrm{d}q_m = Y\mathrm{d}A + A\mathrm{d}Y = 0.$$

Pentru Y maxim, $\mathrm{d}Y = 0$, de unde rezultă că $\mathrm{d}A = 0$ şi deoarece Y este maxim, q_m fiind constant, rezultă că secţiunea A este minimă. Rezultă deci, că valoarea lui Y maxim ($Y = Y_{cr}$), care se obţine pentru:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}},$$

nu poate fi realizată decât în secţiunea minimă a ajutajului (în colul ajutajului: $A_{min} = A_{cr} = A_{col}$). Pentru această secţiune minimă, A_{cr}, se pot scrie relaţiile:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{5-25}$$

$$Y_{cr} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{k-1}{k+1}, \tag{5-26}$$

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{p_0}{\rho_0}\left[1-\left(\frac{p_{cr}}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} = a_0\sqrt{\frac{2}{k+1}}. \tag{5-27}$$

Exprimând viteza sunetului a_{cr} în condiţiile corespunzătoare secţiunii critice A_{cr} (p_{cr}, ρ_{cr}, T_{cr}) se poate demonstra că

$$v_{cr} = a_{cr} = \sqrt{kRT_{cr}} = \sqrt{k\frac{p_{cr}}{\rho_{cr}}} \tag{5-28}$$

şi deci

$$\frac{\rho_{cr}}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{şi} \quad \frac{T_{cr}}{T_0} = \frac{2}{k+1}, \tag{5-29}$$

iar debitul masic are expresia:

$$Q_m = q_{cr} = \rho_{cr} A_{cr} v_{cr}. \tag{5-30}$$

Astfel, pentru aer şi amestecuri NITROX, la care exponentul adiabatic este $k = 1{,}405$, se obţine:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = 0{,}527 \;\; ; \;\; \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} = 0{,}634 \;\; ; \;\; \frac{T_{cr}}{T_0} = 0{,}832,$$

iar pentru heliu, la care exponentul adiabatic este $k = 1,666$, se obţine:

$$\frac{p_{cr}}{p_0} = 0,487 \quad ; \quad \frac{\rho_{cr}}{\rho_0} = 0,649 \quad ; \quad \frac{T_{cr}}{T_0} = 0,750.$$

Când presiunea din aval scade, debitul masic prin ajutaj creşte corespunzător relaţiei 5-23.

Dacă detenta pe ajutaj este redusă, raportul p / p_0 fiind apropiat de valoarea 1 pe toată lungimea ajutajului, punctul figurativ al lui Y se deplasează pe ramura AC a curbei $Y = f(p / p_0)$ din figura 5.3, curgerea fiind subsonică pentru întregul ajutaj.

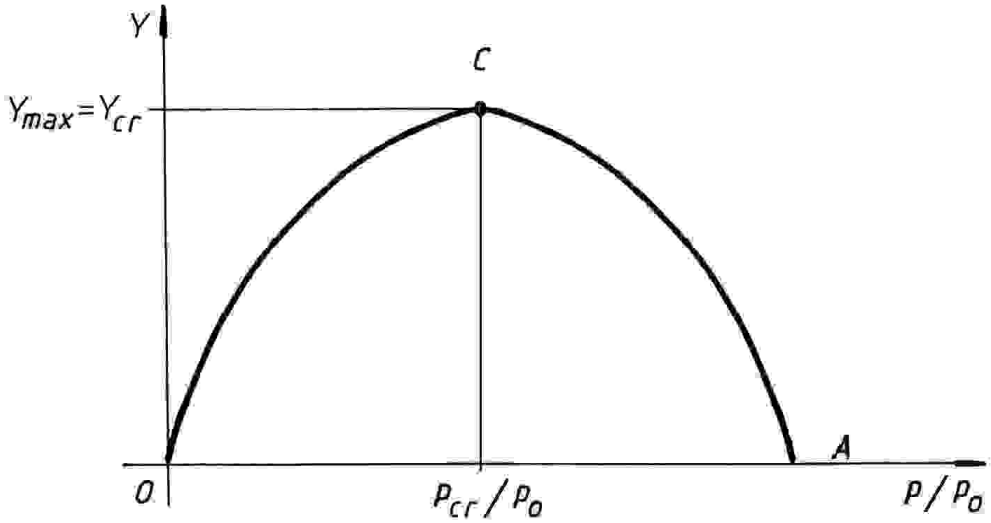


Fig. 5.3. Variaţia lui Y în funcţie de raportul p / p_0.

În cazul în care detenta este suficient de puternică, raportul p / p_0 poate deveni mai mic decât 1 şi punctul figurativ se deplasează pe ramura CO a curbei $Y = f(p / p_0)$ din figura 5.3. În această situaţie, în lungul ajutajului poate exista o secţiune A_{cr} pentru care Y este maxim şi egal cu Y_{cr}, corespunzător punctului C de pe curbă. Secţiunea A_{cr} este secţiunea minimă a ajutajului, unde se ating parametrii critici p_{cr}, v_{cr} (viteza sunetului), ρ_{cr} şi T_{cr}. În alte secţiuni din lungul ajutajului $A > A_{cr}$, deoarece debitul masic rămâne constant în lungul curgerii şi deci $AY = A_{cr} Y_{cr} = ct.$, rezultă că $Y < Y_{cr}$ şi pot exista două situaţii:

a) situaţia unde $p > p_{cr}$ (ramura CA) curgerea fiind subsonică;

b) situaţia unde $p < p_{cr}$ (ramura OC) curgerea fiind supersonică.

Această curgere se obţine în mod obligatoriu.

În amonte de secţiunea minimă, A_{cr}, mişcarea este întotdeauna subsonică, iar în aval de aceasta curgerea poate fi subsonică sau supersonică. Debitul masic care curge prin ajutajul de injecţie masică variază crescător cu scăderea presiunii din aval, fixându-se, la un moment dat, la valoarea sa maximă Q_m atunci când viteza în

secţiunea critică A_{cr} devine egală cu viteza locală a sunetului adică atunci când se ating parametrii critici. Acest debit maxim rămâne constant chiar dacă presiunea din aval continuă să scadă, fiind numit şi *debit în regim de blocaj*.

5.1.3. CURGEREA GAZELOR PRIN AJUTAJE CONVERGENTE

Deoarece la aparatele de respirat sub apă cu circuit închis, semiînchis şi mixt, interesează asigurarea unei injecţii de amestec gazos cu debit masic constant în raport cu adâncimea scufundării, se vor lua în considerare numai ajutajele convergente, care îndeplinesc condiţiile teoretice şi practice pentru a fi utilizate la circuitele de injecţie, compensare şi spălare cu amestec gazos sau oxigen aferente aparatelor de respirat sub apă speciale.

Se notează cu p_0, ρ_0, T_0 şi v_0 parametrii amestecului gazos sau oxigenului în amonte de ajutaj şi se face ipoteza că $v_0 = 0$, ipoteză perfect valabilă în cazul în care diametrul camerei de alimentare a ajutajului este mult mai mare decât diametrul colului ajutajului. De asemenea, se notează cu p_e şi $v_e = 0$, parametrii gazului la ieşire, iar cu $A_1 = A_{cr}$ secţiunea colului ajutajului (secţiunea minimă). Toţi parametrii din această secţiune se notează cu indicele 1 (fig. 5.4). Fiind vorba de un ajutaj convergent, $dA < 0$.

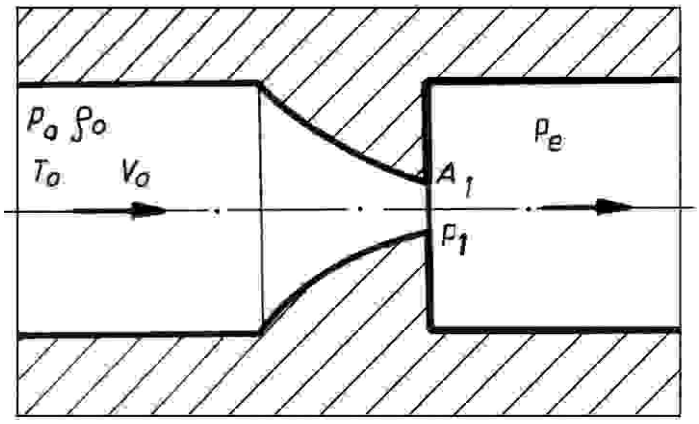


Fig. 5.4. Schema ajutajului convergent.

a) Dacă se consideră presiunea p_0 fixă şi se micşorează p_e plecând de la p_0, curgerea amestecului binar sintetic sau oxigenului fiind subsonică şi $dA < 0$, rezultă că $dv > 0$, iar debitul masic injectat q_m variază conform relaţiei lui Barré de Saint-Venant scrisă, pentru debit, sub forma:

$$q_m = A_1 \rho_0 \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}. \qquad (5\text{-}31)$$

Această relaţie este valabilă deoarece, pentru un raport $p_e / p_0 > p_{cr} / p_0$, presiunea p_1 este totdeauna egală cu p_e. Rezultă că, pentru acest domeniu, debitul

masic scade pe măsură ce raportul p_e / p_0 scade (fig. 5.5). Presiunea p_1 din secţiunea minimă A_1 este egală cu presiunea din aval datorită formării unui jet cilindric la ieşirea din ajutaj.

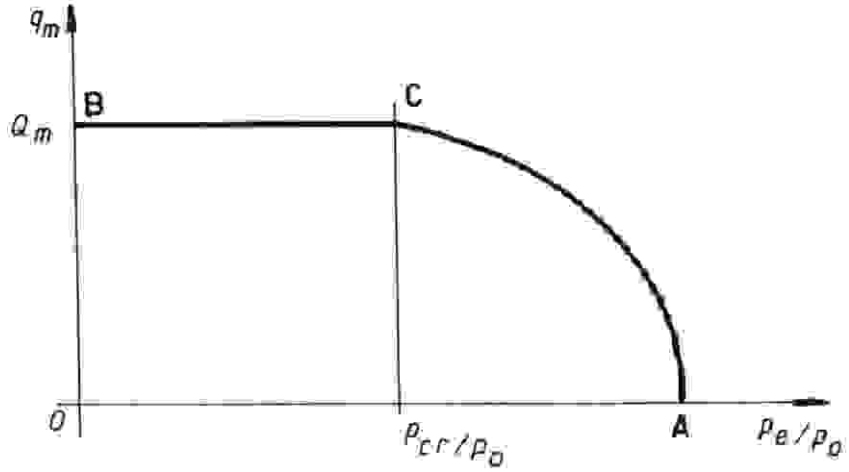


Fig. 5.5. Variaţia debitului masic q_m în funcţie de raportul p_e / p_0, pentru ajutajul convergent.

b) Atunci când presiunea din aval p_e devine egală cu presiunea critică, p_{cr}, adică atunci când:

$$\frac{p_e}{p_0} = \frac{p_{cr}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{5-32}$$

în secţiunea minimă A_1 a ajutajului se obţine viteza sunetului, v_{cr} şi corespunzător rezultă parametrii critici p_{cr}, ρ_{cr} şi T_{cr}, iar debitul masic de amestec gazos prin ajutaj atinge valoarea maximă Q_m dată de expresia 5-30. Înlocuind în această relaţie expresia vitezei v_{cr} (5-28) se obţine:

$$Q_m = \rho_{cr} A_1 \sqrt{k R T_{cr}}, \tag{5-33}$$

dar, conform relaţiilor 5-29:

$$\rho_{cr} = \rho_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{şi} \quad T_{cr} = T_0 \frac{2}{k+1},$$

rezultă:

$$Q_m = \rho_0 A_1 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{(k+1)} R T_0}. \tag{5-34}$$

c) Când presiunea din aval p_e descreşte în continuare, astfel încât $p_e < p_{cr}$, adică atunci când

BIBLIOGRAFIE

ATANASIU, T., GRAD, V., MIHAI, C., GEORGESCU, ŞT. – *Acţiunile scafandrilor deminori în viziunea flotelor occidentale*. Editura EX PONTO, Constanţa, 2000.

BADIU, G., ILIESCU, C., PETRU, A. – *Dynamic study of postural tremor in high pressure conditions.* Roumanian Journal of Physiology, Vol. 28, nr. 3-4, pp. 83-87, Bucureşti, 1991.

BENNETT, P.B. – *Atlantis III, an experimental deep dive to 686 m using TRIMIX 10.* Medicine Subaquatique et Hyperbare, vol. XX, nr. 80, pp. 320-322, 1981.

BERRY, Y., GAVARRY, P., HUBERT, J.P., LE CHUITON, J., PARC, J. – *La plongée et l'intervention sous la mer*. Ed. Arthaud, Paris, 1977.

BÜHLMANN, A.A. – *Decompression. Decompression sickeness*. Springer Verlag, pp. 4-62, Berlin, 1984.

BÜHLMANN, A.A. – *Untersuchungen zur Dekompresssion bei enniedrigtem Luftdruck*. Schweizerische Medizinische Wochenschrift, nr. 114, 1984.

CAYFORD, J.E. - *Underwater Work.* Ed. Lornelle Maritime Press Centreville, Maryland, 1982.

CONSTANTIN, A. – *Transportul gazelor prin sistemul respirator uman şi mijloacele de protecţia respiraţiei, în procese hiperbare.* Teză de doctorat, Universitatea "Ovidius" Constanţa, 1998.

DEGERATU, M., PETRU, A., BEIU, V. – *Computer – aided Simulation of Theoretical Processes in Binary and Ternary Mixtures of Hyperbaric Systems Used in Deep Diving.* **Chemical Abstracts, page 346, 9-Biochem. Methods, vol. 107, Columbus, Ohio, U.S.A., 1986.**

DEGERATU, M. – *Studiu privind gazodinamica unui dispozitiv cu injecţie masică constantă pentru amestecuri binare*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 45/1986, I.C.B., Bucureşti, 1986.

DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a fenomenelor gazodinamice specifice unui sistem cu injecţie la debit masic constant pentru amestecuri respiratorii binare*. A II-a Sesiune de Comunicări ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1988.

DEGERATU, M. – *Simularea teoretică a funcţionării aparatului de scufundare ASMA cu amestec Heliu-Oxigen.* A IV-a Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanţa, 1989.

DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a proceselor gazodinamice din cadrul aparatelor de scufundare utilizând oxigen pur şi amestec binar.* Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 73/1989, I.C.B., Bucureşti, 1989.

DEGERATU, M. – *Calculul termohidraulic al circuitelor aferente echipamentelor de scufundare ASMAR-AMOX.* Catedra de Hidraulică şi Protecţia Mediului, Raport tehnic la C.C. nr. 108/1991, I.C.B., Bucureşti, 1991.

DEGERATU, M., PETRU, A., IONIŢĂ, S. – *Manualul scafandrului.* Ed. Per Omnes Artes, Bucureşti, 1999.

DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Şt. – *Aparate de respirat sub apă*. Ed. MATRIX ROM, Bucureşti, 2003.

DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Şt., IONIŢĂ, S. – *Tehnologii hiperbare pentru scufundări unitare şi în saturaţie*. Ed. MATRIX ROM, Bucureşti, 2003.

DEGERATU, M. – *Studii de optimizare a activităţilor de scufundare prin utilizarea amestecurilor de gaze şi a tabelelor de decompresie tip NITROX*. Raport tehnic la C. C. Poziţia 124 din Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naţionale, Bucureşti, 2013.

DEGERATU, M. – *Analiza teoretică a curgerii gazelor prin ajutaje şi conceperea unui stand experimental de preparare a amestecurilor de gaze în flux continuu.* Raport tehnic la C. C. Nr.A3312/11.09.2014, Contract UTCB Nr. 208/2014, Bucureşti, 2014.

DINU, D., VLAD, C. – *Scafandri şi vehicule subacvatice.* Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti, 1986.

DINU, D., PÎNZARU, M., STANCU, C., VLAD, C. – *Tehnologii subacvatice. Autorizarea activităţilor subacvatice*. Ed. Tehnică, Bucureşti, 2000.

FRUCTUS, X., SCIARLI, R.L. – *La plongée santé et securité*. Editions Maritimes et d'Outre-Mer, Paris, 1980.

GARDETTE, B. – *HYDRA IV and HYDRA V, human deep hydrogen dives 1983-1985. In hydrogen as a diving gas*. 33-rd Under sea and Hyperbare Medical Society Workshop. Ed. BRAUER R. W., 1987.

HALDANE, J.S., PRIESTLEY, J.G. – *Respiration.* 2nd ed. New Haven, Yale University Press, 1935.

HAUX, G. – *Tauchtechnik. Band I*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1969.

HEMPLEMAN, H.V., GARRARD, J.T., HARRIS, D.J., HAYES, P.A., HENNESSY, T.Y., NICHOLS, G., TOROK, Z., WINSBOROUGH, M.N. – *U.K. deep diving trials.* Phil. Trans. R. Soc. London, B304, pp. 119-141, London, 1984.

IAMANDI, C., DEGERATU, M. – *Studiu teoretic privind circuitul de injecţie a amestecului gazos aferent echipamentului de scufundare tip ASMA*. Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema "Contribuţii româneşti în ingineria şi tehnologia activităţilor subacvatice", Centrul de Scafandri, Constanţa, 1987.

JONES, H.S. – *Respiration System: Nitrogen Elimination*. Medical Physics, vol. II, Chicago Year Book Publishers, 1950.

LAMBERTSEN, C.J. – *Effects of Excesive Pressure of Oxygen, Nitrogen, Helium, Carbon Dioxide and Carbon Monoxide.* Medical Physiology. Ed. V.B. Mountcastle, vol. II, 1980.

LARN, R., WHISTLER, R. – *Commercial Diving Manual.* Ed. David & Charles, 1984.

LEMAIRE, C. – *Utilisation de l'oxigen en plongée.* C.E.H. COMEX, Marseille, 1977.

LUBITZSCH, W. – *Aspekte der modernen Tauchgeräte-technik.* Drägerheft, nr. 301, Lübeck, 1975.

PASTUCH, C.O. – *Testarea solicitării funcţiei respiratorii şi circulatorii în cursul adaptării şi muncii în mediul hiperbar*. Teză de doctorat, Institutul de Medicină şi Farmacie Cluj-Napoca, 1987.

PETRU, A. – *Aparate autonome de respirat sub apă.* Buletinul Marinei Militare, nr. 2, Constanţa, 1985.

PETRU, A., BEIU, V., DEGERATU, M. – *Studiu privind optimizarea rezervei de gaz pentru creşterea autonomiei în scufundare.* A II-a Sesiune de Comunicări Ştiinţifice cu tema "Inginerie, tehnologie şi medicină subacvatică", Centrul de Scafandri, Constanţa, 1985.

PETRU, A. – *Amestecuri respiratorii.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 3-4 , Bucureşti, 1987.

PETRU, A. – *Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis.* Buletinul Tehnica Militară, nr. 4, Bucureşti, 1989.

PETRU, A., DEGERATU, M., IONIŢĂ, S. – *Ghidul scafandrului autonom*. Editura Olimp-Press, Bucureşti, 1992.

PETRU, A. – *Hidraulica proceselor hiperbare*. Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcţii Bucureşti, 1993.

PENZIAS, W., GOODMAN, M.V. – *Man Beneth the Sea – A Review of Underwater Ocean Engineering*. Ed. Wiley-Interscience, New York, 1973

POULET, G., BARINCOU, R. – *La plongée*. Ed. Denöel, Paris, 1988.

VANN, R.D. – *Decompression theory and applications. The Physiology and Medicine of Diving.* 3-th edition. Ed. P.B. BENNETT & D.H. ELLIOT, pp. 353-380, London, 1982.

VLAD, C., DINU, D. – *Intevenţii subacvatice.* Editura Tehnică, Bucureşti, 1982.

WILLIAMS, S. – *Underwater Breathing Apparatus.* The Physiology and Medicine of Diving and Compresed Air Work, Ed. P.B. Bennett & Elliot D.H. Bailliere Tindal and Cassell, London, 1969.

WORKMAN, R.D. – *Calculation of decompression schedule for nitrogen-oxigen and helium-oxygen dives*. Report 6-65 US Navy Experimental Diving Unit, Washington D.C., 1965.

ZINKOWSKI, N.B – *Commercial Oil-Field Diving.* Ed. Cornelle Maritime Press, Centreville, Maryland, 1985.

* * * - *The NOAA Diving Manual-Diving for Science and Tehnology*. U.S. Government Printing Office, Washington, 1975.

* * * - *U.S. Navy Diving Manual*. U. S. Government Printing Office, Washington, 1975.

* * * - *Linde Gasekatalog.* Linde AG, Werksgruppe Technische Gase, München.