

MIRCEA DEGERATU

Laureat al Premiului „Hermann Oberth” al
Academiei Oamenilor de Știință din România

ARON PETRU

SERGIU IONIȚĂ

CALCULUL APARATELOR SPECIALE DE RESPIRAT SUB APĂ



Editura Academiei Oamenilor de Știință din România
București, 2019

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

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
DEGERATU, MIRCEA

Calculul aparatelor speciale de respirat sub apă / Mircea Degeratu...,
Aron Petru, Sergiu Ioniță. - București : Editura Academiei Oamenilor de
Știință din România, 2019
Conține bibliografie
ISBN 978-606-8636-59-7

I. Petru, Aron
II. Ioniță, 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 Știință 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 și efectele acestuia	13
1.2.1.1. Caracteristicile oxigenului	13
1.2.1.2. Efectele oxigenului asupra scafandrilor	15
1.2.2. Azotul și efectele acestuia	21
1.2.2.1. Caracteristicile azotului	21
1.2.2.2. Efectele azotului asupra scafandrilor	23
1.2.3. Heliul și 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 și 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 și azot	30
2.2.1.2. Fabricarea unui amestec NITROX din oxigen și aer	31
2.2.1.3. Fabricarea unui amestec HELIOX din heliu și oxigen	32
2.2.1.4. Fabricarea unui amestec HELIOX din alte amestecuri HELIOX și 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 și instalații pentru prepararea amestecurilor respiratorii	37
2.4.1. Procedeu și instalație de preparare a amestecului respirator NITROX prin injecție succesivă de oxigen și aer	37

2.4.2. Procedeu și instalație de preparare a amestecului respirator NITROX prin injecție succesivă în două etape	38
2.4.3. Procedeu și instalație de preparare a amestecului respirator NITROX prin separarea azotului cu ajutorul membranelor	42
2.4.4. Procedeu și instalație de preparare a amestecului respirator NITROX prin omogenizarea continuă a gazelor componente	43
2.4.5. Procedeu și instalație de preparare a amestecului respirator TRIMIX prin omogenizarea continuă a gazelor componente	45
2.4.6. Procedeu și instalație de preparare a amestecului respirator în flux continuu prin injecția 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 ȘI ÎNCHIS

3.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit deschis. Generalități	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 suprafață	56
3.2.2.1. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață, PL 70 ...	57
3.2.2.2. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață K21 MOD 1	59
3.2.2.3. Aparatul cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață, ISAS	60
3.3. Aparate de respirat sub apă cu circuit închis. Generalități	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 funcționând în varianta cu oxigen în circuit închis	68
3.4.1.5. Aparatele cu circuit închis, cu oxigen, EMERSON RIG și 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 ȘI MIXT	87
4.1. Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis. Generalități	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 funcționând 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. Generalități	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 și 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 injecție, de compensare și de spălare	113
5.1.1. Curgerea izentropică prin ajutaje. Relația lui Hugoniot	113
5.1.2. Relația 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. Relațiile de calcul aferente sacului respirator	124
5.2.2. Relațiile de calcul pentru ajutajele de injecție și de spălare	128
5.2.3. Relațiile de calcul pentru ajutajele de compensare	128
5.2.4. Calculul teoretic al ajutajelor de injecție la debit masic constant	135
5.3. Concepția și calculul aparatelor de respirat sub apă speciale	137
5.3.1. Concepția și calculul aparatelor de respirat sub apă cu circuit închis cu oxigen, cu spălare automată a sacului respirator	137
5.3.1.1. Concepția 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. Concepția și calculul aparatelor de respirat sub apă cu circuit semiînchis	156
5.3.2.1. Concepția 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. Concepția aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis, de mare autonomie, pentru scufundări de sistem	189
5.3.3. Concepția și calculul aparatelor de respirat sub apă cu circuit mixt	195
5.3.3.1. Concepția 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. Comparatie asupra eficienței aparatelor speciale de respirat sub apă	214
BIBLIOGRAFIE	216

PREFAȚĂ

Scufundările militare și industriale, autonome sau cu alimentare de la suprafață, prin cerințele lor operaționale 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 și mixt cu mare autonomie și, 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 așa cum sunt amestecurile azot-oxigen (NITROX) și heliu-oxigen (HELIOX), cât și, uneori, amestecuri de gaze respiratorii ternare așa cum este amestecul heliu-azot-oxigen (TRIMIX).

Cartea este structurată pe cinci capitole, primele două capitole referindu-se la gazele și 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 și mixt, iar ultimul capitol referindu-se la calculul gazodinamic al circuitelor aparatelor speciale de respirat sub apă de tipul cu circuit închis, semiînchis și mixt.

Lucrarea, prima de acest gen din România, este rezultatul activităților de cercetare și proiectare efectuate în comun de Departamentul de Hidraulică și Protecția Mediului din Universitatea Tehnică de Construcții București și Centrul de Scafandri din Constanța din cadrul Forțelor Navale Române și al colaborării acestor unități de învățământ și cercetare-proiectare cu faimoasa firmă germană Dräger.

Cartea se adresează, în primul rând, specialiștilor în domeniul hiperbar, inginerilor specializați în proiectarea, realizarea și exploatarea aparatelor de respirat sub apă și scafandrilor profesioniști specializați în scufundarea militară și 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 și exploatarea aparatelor de respirat sub apă îl au gazele și amestecurile de gaze respiratorii utilizate în cadrul acestor aparate. Tipul gazului sau amestecului respirator utilizat este impus de tipul aparatului de scufundare folosit și de tehnologia de scufundare adoptată.

Pentru alegerea corectă a gazului sau amestecului respirator în cadrul diferitelor aparate de respirat sub apă și pentru stabilirea cu precizie a tehnologiei de scufundare, este necesară cunoașterea în detaliu a caracteristicilor fizice ale gazelor utilizate. De asemenea, pentru obținerea unor amestecuri de gaze cu participații volumice (concentrații) ale componentelor dorite, este necesară cunoașterea 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 implicații în revenirea scafandrului la presiunea atmosferică, impunând precauții severe pentru evitarea unor accidente datorate fie apariției unor stări anormale, fie unei decompresii necorespunzătoare.

Pentru evitarea acestor probleme, cunoscut fiind faptul că oxigenul este gazul indispensabil vieții și considerându-se că este "inofensiv", s-a încercat executarea de scufundări numai cu oxigen pur. Din păcate, utilizarea oxigenului pur deși 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 și uneori mortale, prin acestea infirmându-se "inofensivitatea" oxigenului respirat la presiuni mai mari decât presiunea atmosferică. Astfel, a reapărut necesitatea diluării oxigenului și realizării unor amestecuri respiratorii sintetice. De asemenea a apărut și 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 totuși generatoare de efecte biochimice cu atât mai evidente cu cât presiunea parțială a gazului inert, din amestecul gazos respirator, crește o dată cu creșterea 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 acțiunea fiziologică a unui amestec gazos respirator depinde de compoziția sa, de concentrațiile (participațiile volumice) ale gazelor care alcătuiesc amestecul, precum și

de presiunea la care este respirat. Ultimii doi factori, corelați cu acțiunea fiziologică a amestecului respirator, determină valoarea maximă admisă a presiunii parțiale a gazului inert astfel încât efectul narcotic să nu-și facă apariția.

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 funcție de solubilitatea lor în grăsimi raportată la solubilitatea lor în apă (coeficientul Mayer-Overton) și funcție, 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 și chiar la presiunea atmosferică cu xenon, pentru amestecuri cu 80% gaz inert. Din contră, deși este cel mai ușor 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 proprietățile 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 proprietăți ale gazelor zise "inerte", legate de puterea lor narcotică.

Tabelul 1.1

Câteva proprietăți ale gazelor zise "inerte"

Gaz	Masa molară [kg/kmol]	Densitatea [kg/m ³]*	Numărul Van der Waals** <i>a</i>	Solubilitatea [mℓ/ℓ]		
				în apă (la 37°C)	în grăsimi (la 37°C)	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 densităților sunt la 0°C și la presiunea atmosferică normală;

**Numărul lui Van der Waals *a* exprimă forța de atracție intermoleculară;

***Coeficientul Mayer-Overton = $\frac{\text{Solubilitatea în grăsimi}}{\text{Solubilitatea în apă}}$, în relație 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, absența 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 țesuturi.

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 și 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 și heliul.

1.2.1. OXIGENUL ȘI EFECTELE ACESTUIA

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

1.2.1.1. Caracteristicile oxigenului

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

Tabelul 1.2

Proprietățile fizice ale oxigenului

Mărimea	Valoarea	Mărimea	Valoarea
Volumul molar [m ³ / kmol]	22,403	$k / \mu c_v$	1,93
Masa molară [kg/ kmol]	31,999	$D\rho / \mu$	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Temperatura critică T_{cr} [K]	154,4	Constante Van der Waals: a – at/(l/mol) ² b – l/mol	1,36 0,0318
Temperatura de fierbere la 1,013 bar (sc.abs.) T_f [K]	90,2	Presiunea critică p_{cr} [ata]**	49,7
Conductibilitatea termică k [μcal / cm · s · K]	58,5	T_f / T_{cr}	0,58
Coeficientul de autodifuzie D [cm ² /s]	0,189	Diametrul moleculei [Å]***	3,62
Densitatea ρ [g/l]	1,429	Solubilitatea în apă [l/l]	0,0314
Coeficientul dinamic de viscozitate μ [micropoise]*	192,6	Solubilitatea în alcool etic [l/l]	0,1431
Căldura specifică masică la volum constant c_v [cal/g K]	0,157	Solubilitatea în benzen [l/l]	0,163

*1 micropoise = 10⁻³ poise = 10⁻³ g/(cm s) = dyn s/cm²; **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. Aceștia, echipați cu combinezoane grele, etanșe și cu aparate de respirat sub apă în circuit închis, au efectuat intervenții sub apă cu scop militar. Nu cunoșteau nimic despre toxicitatea oxigenului, motiv pentru care au avut pierderi chiar pe timpul antrenamentelor.

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

Tabelul 1.3

Consumul individual de oxigen funcție de activitatea subacvatică desfășurată de scafandru (NOAA Diving Manual)

Activitatea desfășurată de scafandru	Consum O_2 [l _N /min]	Ventilație pulmonară [l _N /min]
Repaus	0,4	8
Lucrări ușoare, înot cu viteză $v = 0,5 Nd^* = 0,257$ m/s	0,8	18
Lucrări moderate, înot cu viteză $v = 0,8 Nd = 0,411$ m/s	1,3	30
Lucrări intense, înot cu viteză $v = 1,0 Nd = 0,514$ m/s	1,7	40
Lucrări foarte grele, înot cu viteză $v = 1,2 Nd = 0,617$ 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 și a scufundărilor autonome cu plecare de la suprafață, în cadrul aparatelor de respirat sub apă, se utilizează de obicei amestecuri gazoase binare supraoxigenate. Utilizarea amestecurilor respiratorii cu concentrații mari de oxigen (cu participații 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 funcție de presiunea parțială a acestuia din amestecul respirator, cu alte cuvinte, pentru o adâncime dată, cu cât participația volumică a oxigenului în amestecul respirator, r_{O_2} , este mai mare, cu atât cantitatea de gaz inert ce se va dizolva în țesuturi va fi mai mică și 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} , și pentru un amestec de gaz azot-oxigen (NITROX) caracterizat prin participațiile volumice ale componentelor r_{O_2} și r_{N_2} , ($r_{O_2} + r_{N_2} = 1$), presiunile parțiale 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 proporție dorită, a două sau trei din gazele prezentate în capitolul 1, unul dintre ele fiind întotdeauna oxigenul.

2.1. AMESTECURI RESPIRATORII BINARE ȘI TERNARE

După numărul componentelor principale din amestecurile respiratorii, acestea se împart în: amestecuri binare (cu două componente) și 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 și amestecurile heliu-oxigen denumite amestecuri HELIOX. Pentru scufundările autonome, aceste tipuri de amestecuri sunt standardizate din punct de vedere al conținutului de oxigen. Cele mai frecvente amestecuri respiratorii utilizate în scufundări autonome sunt cele caracterizate prin următoarele concentrații ale oxigenului: 30% (uneori 32% sau 32,5%), 40%, 50% și 60%, deci prin următoarele participații volumice ale oxigenului r_{O_2} în amestec: 0,30 (0,32 sau 0,325); 0,40; 0,50 și 0,60. În ultimii ani se utilizează, în mod experimental, și amestecuri binare hidrogen-oxigen (HIDROX) cu concentrații ale oxigenului mai mici de 4% ($r_{O_2} < 0,04$).

Pentru scufundări cu amestecuri respiratorii se ține seama nu numai de concentrația oxigenului din amestec ci și 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 și aceste amestecuri sunt standardizate. În general, concentrațiile heliului și azotului sunt egale, iar concentrația oxigenului este funcție de limitele impuse la utilizarea acestuia. Amestecurile ternare se folosesc și în scufundări profunde. La astfel de scufundări, se utilizează amestecurile HELIOX în care se injectează azot necesar pentru ameliorarea S.N.I.P., obținându-se în acest fel amestecuri ternare cu concentrații 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 parțială 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 $(p_{N_2})_{max} = r_{N_2} \cdot p_{am} = 0,79 \cdot 4 = 3,16$ bar (sc. abs.).

În cadrul experimentărilor de laborator, se mai utilizează și 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 injecție succesivă și controlată a gazelor componente în recipiente cu volum constant, urmărindu-se presiunea din recipienti, 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 proporția dorită, utilizându-se pentru aceasta dispozitive prevăzute cu ajutoare 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 recipienti cu volume cunoscute. Dacă se lucrează la temperatură constantă, cantitățile de gaz comprimate în recipient se pot determina prin măsurarea variațiilor 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 și analizorul de oxigen. La analiza oxigenului din amestecul fabricat trebuie să se țină 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 corecții de calcul rezultate din temperatură. Deci, amestecurile gazoase respiratorii se fabrică în recipienti cu volume cunoscute și la o temperatură constantă, respectiv temperatura ambiantă, ce permite aplicarea legii Boyle-Mariotte:

$$pV = \text{const.} \quad (2-1)$$

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

Amestecuri de gaze utilizate la aparatele speciale de respirat sub apă

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

iar legea lui Amagat se scrie:

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

Presiunea parțială a unui gaz component dintr-un amestec de gaze se obține prin înmulțirea presiunii amestecului de gaze cu participația volumică r_{g_i} a gazului component considerat:

$$p_{g_i} = p_{am} r_{g_i}. \quad (2-4)$$

Pentru a se putea calcula mai ușor un amestec de gaze în vederea fabricării acestuia, se propune o schemă simplă. Astfel, se reprezintă recipientul în care se dorește prepararea amestecului cu un dreptunghi (fig. 2.1) și 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 parțiale finale ale fiecărui gaz sau amestec gazos component $p_{g_i, f}$ și presiunea finală a amestecului $p_{am, f}$ exprimate în scară manometrică, iar în stânga se notează participațiile volumice $r_{g_i}^{(j)}$ ale gazului pur i din amestecurile injectate prin fiecare tranșă de injecție (j), precum și concentrația finală dorită a acestui gaz $r_{g_i, f}$ din amestecul care este propus a fi obținut în recipient.

Participații volumice pentru gazul g_i		Presiuni finale		
Finală	Pe tranșă		Presiuni parțiale	Presiunea amestecului
$r_{g_i, f}$	$r_{g_i}^{(n)}$	Tranșă (n) $r_{g_1}^{(n)} + r_{g_2}^{(n)} + \dots + r_{g_i}^{(n)} + \dots + r_{g_n}^{(n)} = 1$	$p_{g_n, f}$	$p_{am, f}$
	$r_{g_i}^{(3)}$	Tranșă (3) $r_{g_1}^{(3)} + r_{g_2}^{(3)} + \dots + r_{g_i}^{(3)} + \dots + r_{g_n}^{(3)} = 1$	$p_{g_3, f}$	
	$r_{g_i}^{(2)}$	Tranșă (2) $r_{g_1}^{(2)} + r_{g_2}^{(2)} + \dots + r_{g_i}^{(2)} + \dots + r_{g_n}^{(2)} = 1$	$p_{g_2, f}$	
	$r_{g_i}^{(1)}$	Tranșă (1) $r_{g_1}^{(1)} + r_{g_2}^{(1)} + \dots + r_{g_i}^{(1)} + \dots + r_{g_n}^{(1)} = 1$	$p_{g_1, f}$	

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

Pe baza schemei din figura 2.1 și a relațiilor prezentate mai sus se poate exprima presiunea parțială finală a unui gaz component astfel:

$$p_{g_i, f} = p_{am, f} r_{g_i, f} =$$

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

unde exponentul $(j)[(j) = (1), (2) \dots (n)]$ reprezintă numărul tranșei de injecție de gaze în recipient. Pentru o mai bună înțelegere, 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 și azot

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

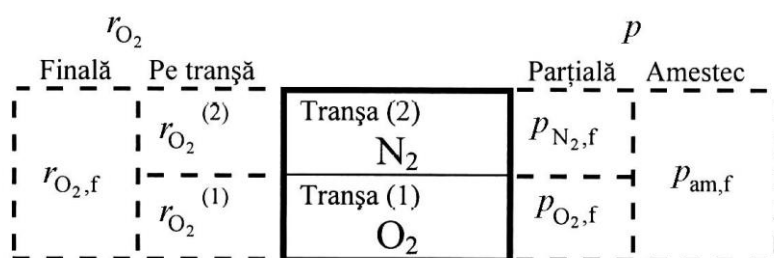


Fig. 2.2. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX pornind de la oxigen și azot.

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

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

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

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

de unde rezultă $x = 60$ bar (sc. man.) care reprezintă atât valoarea presiunii parțiale finale a oxigenului cât și presiunea la sfârșitul primei tranșe de presurizare a recipientului prin injecție de oxigen pur.

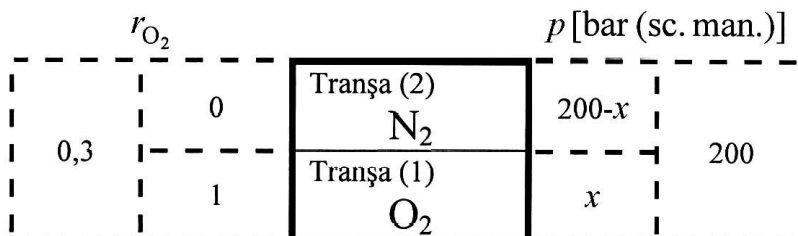


Fig. 2.3. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen și azot.

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 și aer

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

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

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

adică:

$$200 \cdot 0,7 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 0,79, \quad (2-9)$$

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.).

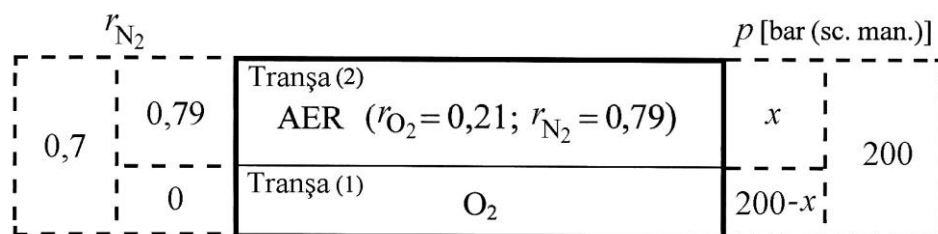


Fig. 2.4. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator NITROX 30/70 din oxigen și aer.

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

Tabelul 2.1

Fabricarea amestecurilor NITROX prin injectarea succesivă de oxigen și aer

Amestec NITROX [%O ₂ / %N ₂]	Presiunea din recipient după presurizarea cu oxigen pur [bar (sc. man.)]	Creșterea 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% O₂) și aer respirator corespunzător normativelor în vigoare (21% O₂ și 79% N₂).

2.2.1.3. Fabricarea unui amestec HELIOX din heliu și oxigen

Datorită diferenței mari de densitate dintre cele două gaze, întotdeauna se injectează oxigenul peste heliu și 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 și 80% heliu) la 200 bar (sc. man.), schema recipientului va fi cea din figura 2.5, iar ecuația corespunzătoare va fi:

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

adică:

$$200 \cdot 0,2 = (200 - x) \cdot 0 + x \cdot 1, \quad (2-11)$$

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

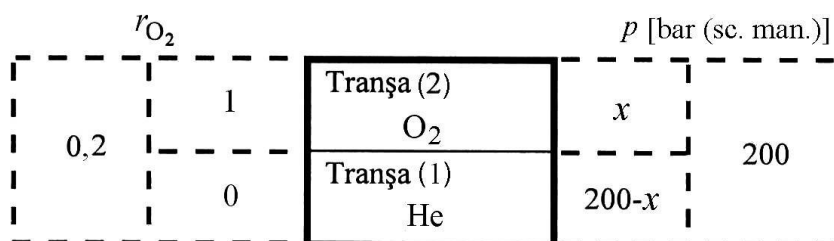


Fig. 2.5. Schema de calcul pentru fabricarea unui amestec respirator HELIOX 20/80 din heliu și oxigen.

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 și gaze pure

Metoda de fabricare a unui amestec HELIOX din alt amestec HELIOX, se utilizează atunci când se dorește economisirea heliului. Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 10/90 (10% O₂ și 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 20 bar (sc. man.) și un amestec HELIOX 14/86 (14% O₂ și 86% He) aflat într-un alt recipient la presiunea de 160 bar (sc. man.) și se dorește ca să se fabrice un amestec HELIOX 12/88 (12% O₂ și 88% He) la 200 bar (sc. man.). Inițial, nu se cunoaște dacă trebuie adăugat heliu sau oxigen pur și, de aceea, schema inițială a recipientului de calcul va fi cea din figura 2.6, iar ecuația corespunzătoare va fi:

$$200 \cdot 0,12 = x \cdot 1 + 160 \cdot 0,14 + (200 - 160 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0,10 \quad (2-12)$$

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

$$200 \cdot 0,12 = x \cdot 0,14 + (200 - 20 - x) \cdot 0 + 20 \cdot 0,10 \quad (2-13)$$

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

Amestecuri de gaze utilizate la aparatele speciale de respirat sub apă

r_{O_2}		p [bar (sc. man.)]	
0,12	1	O ₂	x
	0,14	HELIOX 14/86 ($r_{O_2}=0,14$, $r_{He}=0,86$)	160
	0	He	$200-160-20-x$
	0,10	HELIOX 10/90 ($r_{O_2}=0,10$, $r_{He}=0,90$)	20

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

r_{O_2}		p [bar (sc. man.)]	
0,12	0,14	HELIOX 14/86 ($r_{O_2}=0,14$, $r_{He}=0,86$)	x
	0	He	$200 - 20 - x$
	0,10	HELIOX 10/90 ($r_{O_2}=0,10$, $r_{He}=0,90$)	20

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

Deci, amestecul HELIOX 12/88 la 200 bar (sc. man.) se obține astfel: recipientul conținând 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 amestec 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 aceeași metodă ca cea prezentată la fabricarea amestecurilor binare. Astfel, pentru fabricarea amestecurilor ternare heliu-azot-oxigen (TRIMIX) se pot utiliza fie heliu și aer, fie heliu și 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 participațiilor gazelor componente ale amestecurilor cu ajutorul unor analizoare de gaze specializate și corectarea acestora în vederea obținerii amestecurilor dorite.

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

2.3.1. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PEA SĂRAC ÎN OXIGEN

Se consideră că se dispune de un amestec HELIOX 10/90 (10% O₂ și 90% He) aflat într-un recipient la presiunea de 180 bar (sc. man.) și se dorește corectarea acestuia pentru obținerea unui amestec HELIOX 12/88 (12% O₂ și 88% He). În acest caz nu se cunoaște presiunea finală a amestecului dorit. Schema recipientului este cea din figura 2.8, iar ecuația corespunzătoare va fi:

$$x \cdot 0,88 = 180 \cdot 0,9 + (x - 180) \cdot 0, \quad (2-14)$$

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

Prin urmare, amestecul HELIOX 12/88 se obține 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.).

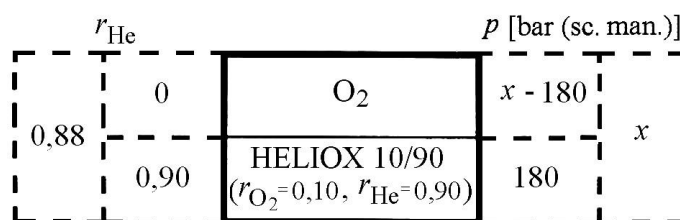


Fig. 2.8. Schema de calcul privind corectarea amestecului HELIOX 10/90 pentru obținerea amestecului HELIOX 12/88.

2.3.2. CORECTAREA UNUI AMESTEC HELIOX PEA BOGAT ÎN OXIGEN

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

Spre exemplu, se consideră un amestec HELIOX 12/88 (12% O₂ și 88% He) la presiunea de 150 bar (sc. man.) și se dorește corectarea acestuia în vederea obținerii unui amestec HELIOX 10/90 (10% O₂ și 90% He). Și în acest caz nu se cunoaște presiunea finală a amestecului dorit. Pentru o astfel de corectare pot fi folosite două variante: varianta utilizării unui compresor și a unei bașe recuperatoare și varianta utilizării unui supresor.

a. Dacă pentru fabricarea amestecului se folosește un compresor și o bașă recuperatoare, se poate utiliza întregul amestec HELIOX și schema recipientului de calcul este prezentată în figura 2.9.

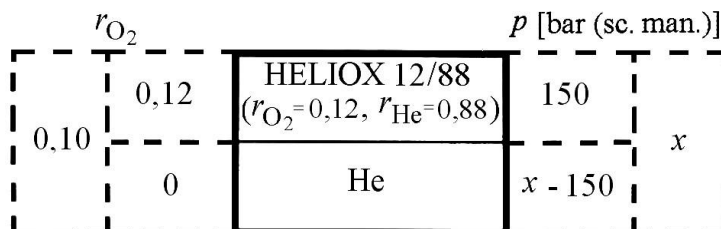


Fig. 2.9. Schema de calcul pentru fabricarea amestecului HELIOX 10/90 prin corectarea unui amestec HELIOX 12/88 (cazul utilizării unui compresor și a unei bașe recuperatoare).

3.

APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT DESCHIS ȘI ÎNCHIS

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

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis sunt aparatele la care întregul amestec gazos, rezultat din expirație, 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, și dintr-un regulator de presiune care asigură respirația la o presiune egală cu presiunea corespunzătoare adâncimii de imersie. Autonomia acestor aparate este relativ redusă. Atunci când se dorește 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 suprafață 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 și performanțele 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 și prevăzut cu o instalație de distribuție și control, care asigură întreaga cantitate de amestec respirator necesară scufundării pentru executarea unei scufundări. Optim pentru un aparat de scufundare înseamnă: timp mare în imersiune, adâncime cât mai mare și 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 inspirație, livrarea având o durată egală cu durata inspirației. În fazele de apnee și de expirație livrarea de amestec este întreruptă.

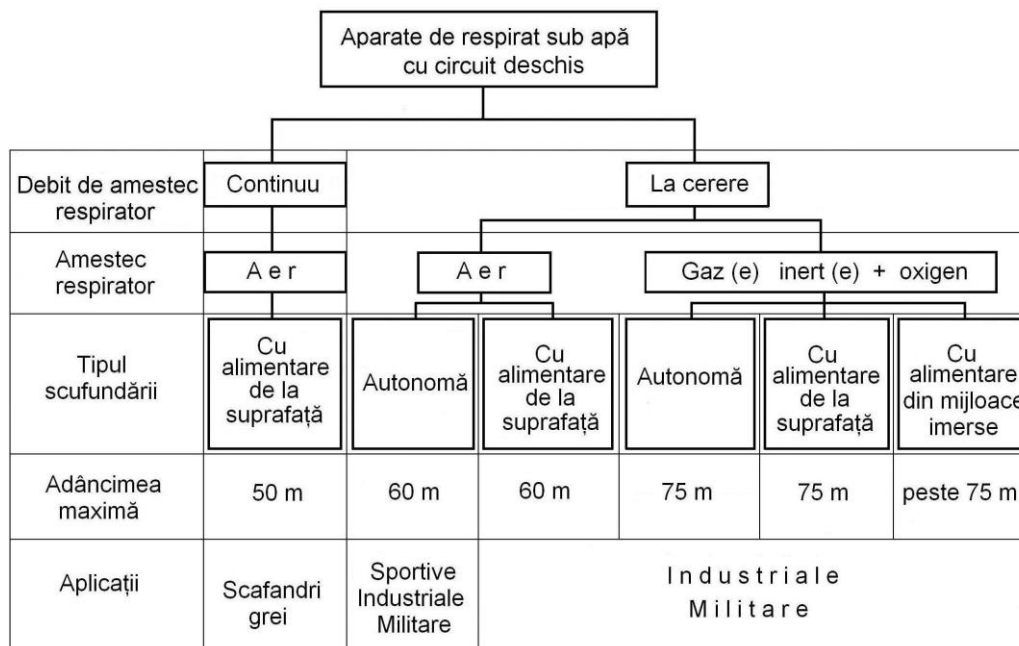


Fig. 3.1. Schema generală cu caracteristicile, performanțele și domeniile de aplicare pentru aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis.

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 componență și rezerva de gaz necesară respirației 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 profesioniști, atât militari cât și civili. Acest detentor, cu reducerea presiunii în două trepte, este fabricat de firma franceză COMEX și 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, așa numitul model standard. De o parte a membranei acționează forța dată de presiunea gazului din camera de medie presiune, iar de cealaltă parte, forța elastică a resortului de taraj împreună cu cea generată de presiunea hidrostatică a mediului exterior. La inspir, echilibrul se rupe, membrana se înalță și deschide clapetul de admisie. Gazul pătrunde până când presiunea medie atinge o valoare cu 8...12 bar peste presiunea mediului exterior și echilibrul se restabilește.

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

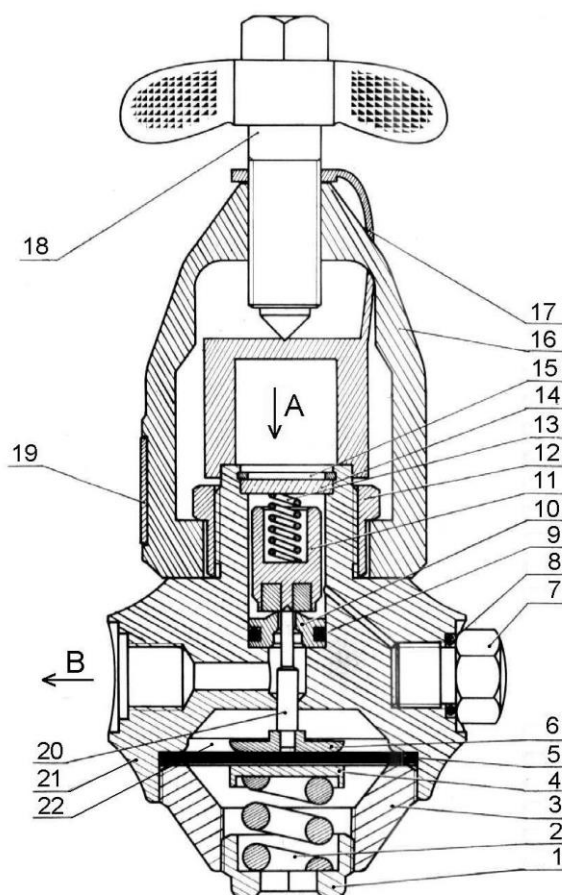


Fig. 3.2. Schema detentorului treapta I SUPER-PHYSALIE:

A. Alimentare cu amestec respirator la înaltă presiune;

B. Ieșire amestec respirator la medie presiune;

1- șurub de reglaj; 2- resort de taraj;

3- capac; 4- taler resort;

5- membrană; 6- taler tijă;

7- dop; 8,9- inele de etanșare;

10- scaun clapet; 11- clapet;

12- piuliță de fixare;

13- resort clapet; 14- filtru sinterizat;

15- inel de siguranță;

16- jug de fixare pe butelie;

17- dop de protecție;

18- șurub de fixare;

19- placă de inscripționare; 20- tijă;

21- corp detentor;

22- cameră medie presiune.

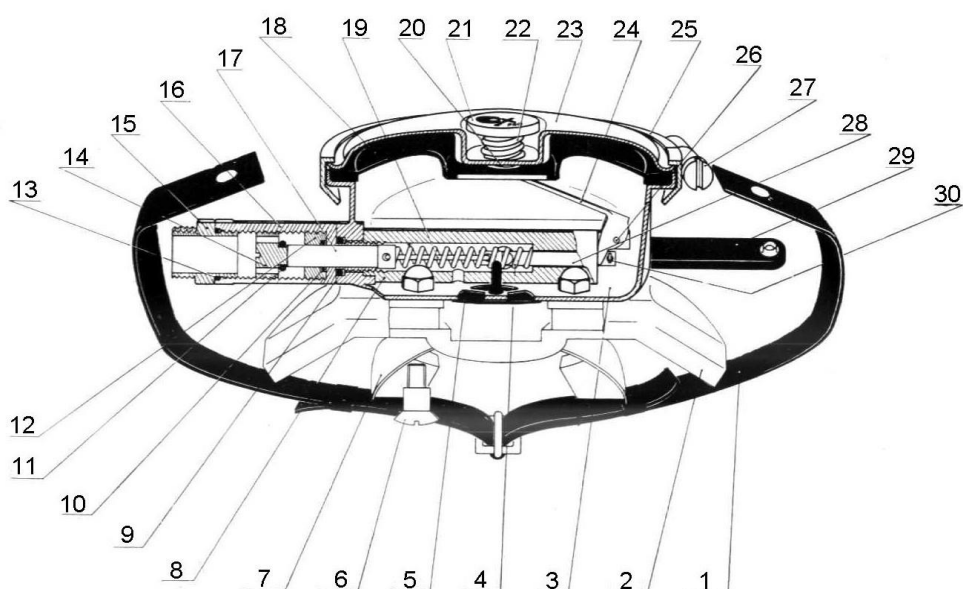


Fig. 3.3. Schema detentorului treapta a II-a SUPER-PHYSALIE:

1- baretă; 2- deflector; 3- cutie; 4- resort de rapel; 5- supapă expirație; 6- șurub; 7- piesă bucală; 8- corp joasă presiune; 9,10,11- garnituri oring; 12- suport oring; 13- oring; 14- scaun clapet; 15- manșon; 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- șurub; 28- tijă piston clapet; 29- bridă piesă bucală; 30- opritor.

Noutatea adusă de acest model este că scaunul supapei de admisie este mobil și nu clapetul, ca la modelele anterioare. Scaunul, care are forma unui cilindru, este mișcat axial prin intermediul pârgheii de către membrană. Scaunul urmărește mișcările alternative ale membranei, deschizând și închizând supapa după mișcările respiratorii ale scafandrului. Detentorul este prevăzut și 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 inspirație. 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 performanță cu două trepte legate între ele printr-un furtun de medie presiune. Detentorul treapta I este de tipul cu piston compensat care asigură o independență a presiunii medii la ieșirea din prima treaptă în raport cu scăderea presiunii din buteliile de stocaj. Detentorul treapta a II-a este conceput ținând cont de *principiul amonte*, asigurând o creștere a debitului la același efort de inspirație.

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

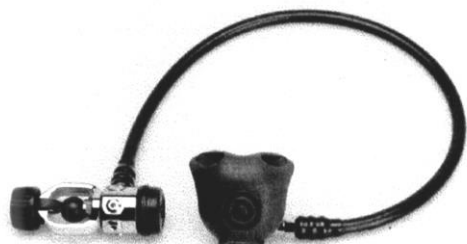


Fig. 3.4. Detentorul cu două trepte SHARK.

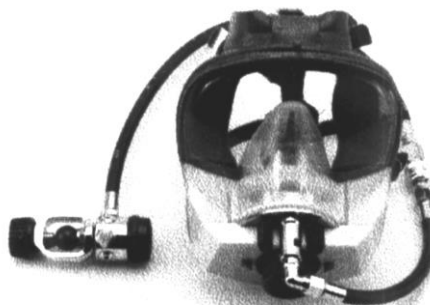


Fig. 3.5. Detentor treapta I SHARK racordat la detentor treapta a II-a integrat la masca facială ORCA.

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 și ca aparat de rezervă în cazul scafandrilor alimentați cu aer de la suprafață. Aparatul MODULAR 600 este compus din aparatul de bază BASIC 600 și din masca facială SECORA 600.

Aparatul de bază BASIC 600 constă din două butelii ($2 \times 4 \text{ l}$ la 300 bar (sc. man.), corespunzător unei rezerve de aer de 2800 l_N , sau $2 \times 6 \text{ l}$ la 300 bar (sc. man.), corespunzător unei rezerve de aer de 3500 l_N), un detentor treapta I robust și protejat contra înghețului și murdăriei și un detentor treapta a II-a direct integrat la mască protejat de asemenea contra formării de gheață și murdăriei.

Detentorul treapta I este prevăzut cu patru racorduri de presiune medie oferind suficiente posibilități de conectare la detentor treapta a II-a, la ventilul de siguranță, la sistemul de umplere a costumului cu volum constant etc. Detentorul treapta a II-a este caracterizat printr-o rezistență la respirație foarte scăzută, conferind aparatului un confort ridicat. Aparatul este prevăzut cu un echipament electronic de avertizare, scafandru primind un semnal optic în mască atunci când presiunea din butelii scade sub 50 bar (sc. man.). Totuși, aparatul este dotat și cu un manometru de control, independent de sistemul electronic de avertizare. Maska facială SECORA 600 este o mască cu un vizor astfel construit încât, prin sistemul antirefracție, 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 și permite o egalizare rapidă a presiunii.

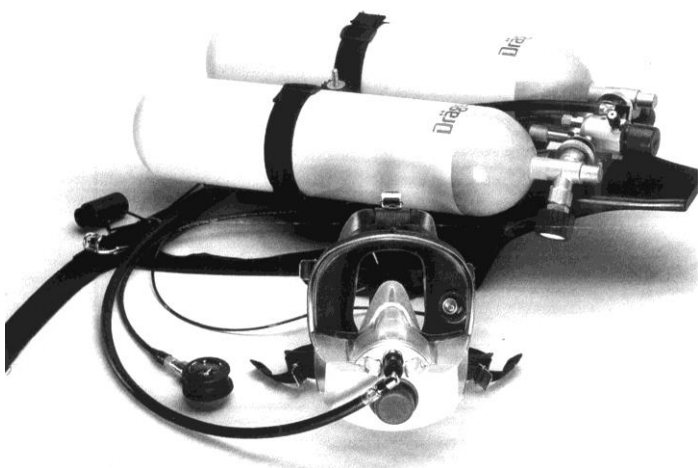


Fig. 3.6. Aparatul de respirat sub apă autonom cu circuit deschis și debit la cerere MODULAR 600.

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 și utilizat pentru intervenții 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 și anume PA 38/1600, PA 38/2800 și 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.

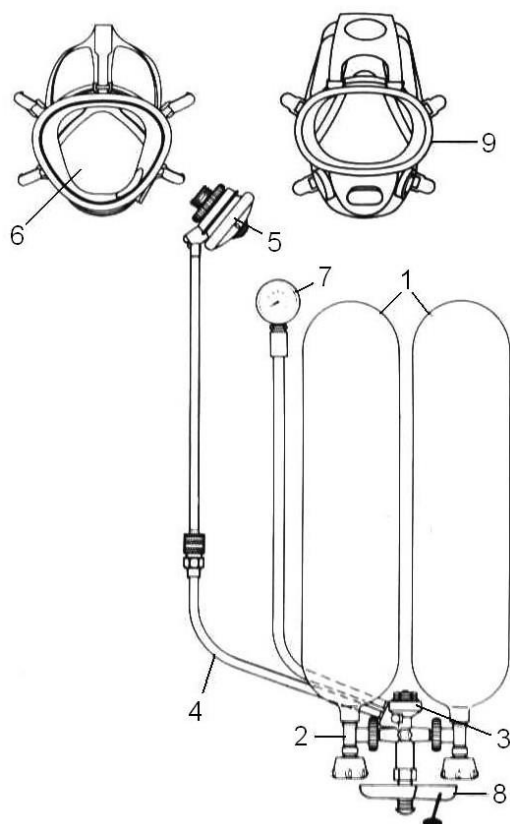


Fig. 3.7. Schema aparatului de respirat sub apă autonom și cu circuit deschis PA 38:

- 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 acționare 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 SUPRAFAȚĂ

Aparatele de respirat sub apă cu circuit deschis, cu debit la cerere, în varianta cu alimentare de la suprafață prin ombilical oferă scafandrului posibilitatea staționării 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 suprafață prin ombilical, se folosesc, de obicei, stații 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 condițiile unei nave suport specializate sau în condiții de laborator hiperbar, se mai pot utiliza și recipiente sferice 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 protecții termice foarte bune și unui sistem de comunicație permanentă cu suprafața.

Dezavantajul metodei constă într-o desfășurare înceată, într-o mobilitate redusă a scafandrului și în necesitatea unui suport logistic de suprafață foarte important.

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

Aparatul PL 70 este un aparat cu circuit deschis, alimentat de la suprafață, cu debit livrat la cerere, fabricat de firma DRÄGER. Acest aparat are o greutate mică și 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 și 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 suprafață la alimentarea din rezerva de securitate, fie acționat manual (PL 70 H), fie acționat automat (PL 70A).

Aparatul PL 70 este echipat și cu un detentor treapta a II-a identic cu cel al aparatului PA 38. Detentorul este o valvă de dozaj controlată de respirație care se deschide la inspirație și se închide la expirație. Acesta asigură livrarea, la cerere, a unui volum de aer necesar scafandrului în faza de inspirație. 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 prezentați doi scafandri echipați cu costume cu volum constant și alimentați cu aer prin intermediul aparatelor de respirat PL 70.

Atât la aparatul PL 68 cât și 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.) și 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.) și la un debit de circa $400 \text{ l}_N/\text{min}$, la care se cuplează un reductor de presiune la ieșire, 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.

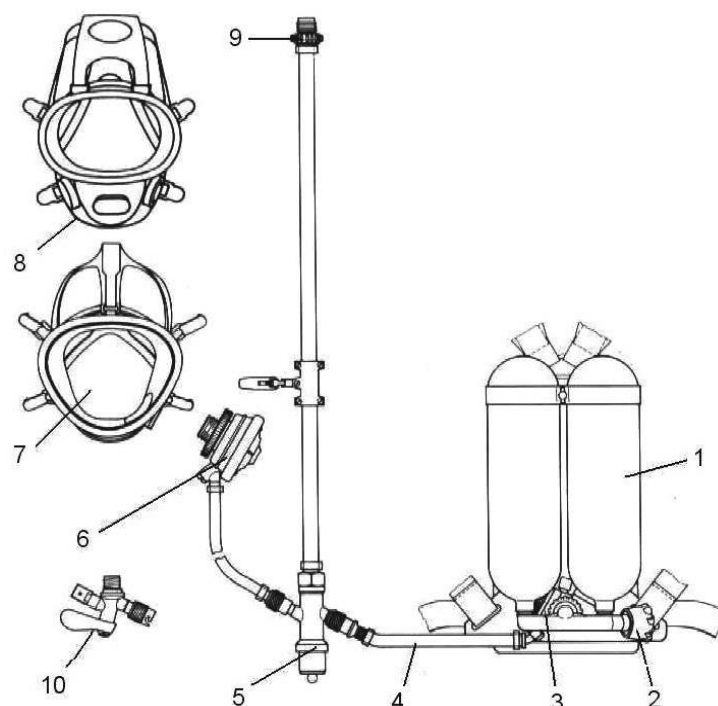


Fig. 3.8. Schema aparatului de respirat sub apă cu circuit deschis, cu alimentare de la suprafață, PL 70:

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 suprafață; 10- robinet de comutare manuală.



Fig. 3.9. Scafandri echipați cu aparate de respirat sub apă cu alimentare de la suprafață PL 70.

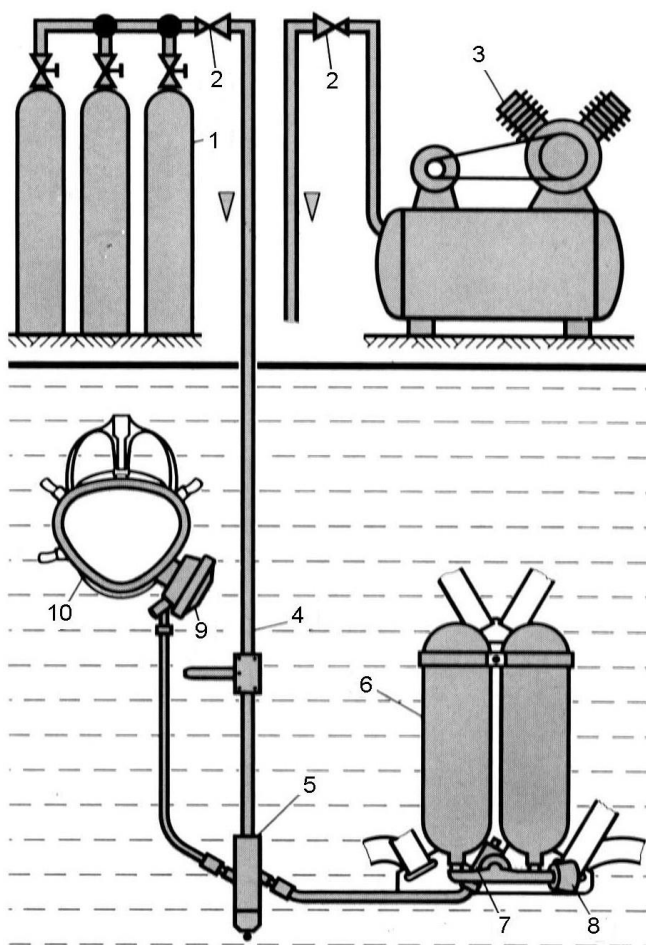


Fig. 3.10. Modalități de alimentare cu aer de la suprafață a aparatelor PL 70:

- 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 suprafață MK21 MOD 1

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

Echipamentul este compus din: cască asamblată, ansamblu ombilical și sistem de alimentare de urgență.

Casca este rigidă și este echipată cu un detentor treapta a II-a de tip Kirby-Morgan alimentat de la suprafață 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 depresiurizează. 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 comunicația audio.

Ansamblul ombilical este alcătuit din furtunul de alimentare de la suprafață, cablul de comunicație audio și cablul de rezistență. Sistemul de alimentare pentru cazuri de urgență este compus dintr-o butelie cu detentor treapta I. Butelia are o capacitate de 2 l și presiunea maximă de încărcare de 150 bar (sc. man.). Scafandru deschide butelia de rezervă în cazul în care alimentarea de la suprafață este defectuoasă.

Echipamentul permite respirația în circuit deschis, cu un debit maxim de 300 l_N/min. Aparatul oferă un grad ridicat de siguranță în scufundare și de fiabilitate, dar libertatea de mișcare a scafandruului este mult limitată față de cea a unui scafandru autonom.

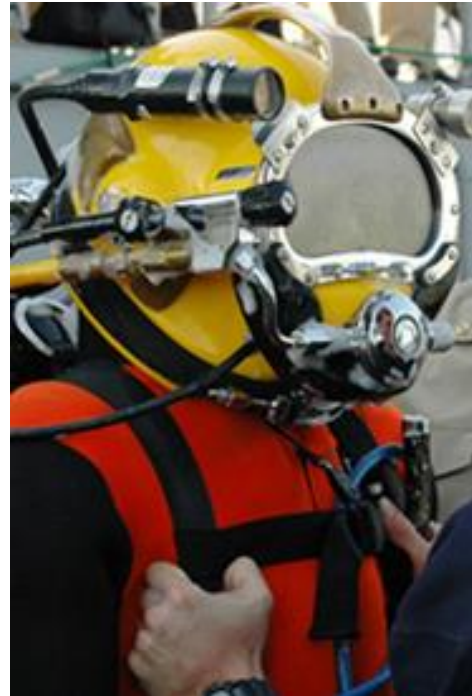
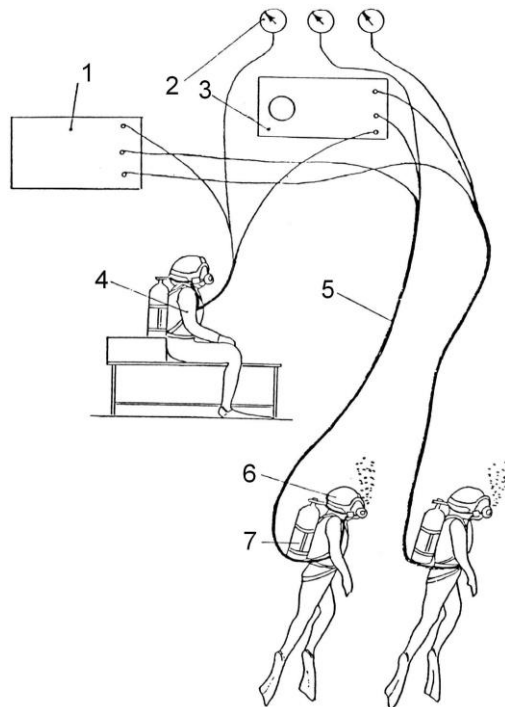


Fig. 3.11. Schema instalației de scufundare cu circuit deschis și alimentare de la suprafață MK 21 MOD 1 și cască rigidă aferentă: 1- instalație de alimentare cu gaz respirator; 2- pneumofazometre; 3- tablou comunicații; 4- scafandru însoțitor; 5- ombilical; 6- cască rigidă cu detentor treapta a II-a; 7- butelie cu rezervă de gaz pentru securitate.

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

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

Circuitul respirator al instalației de scufundare cu alimentare de la suprafață ca și instalația în ansamblul ei, au fost concepute de un colectiv de specialiști aparținând Centrului de Scafandri Constanța. Instalația este concepută să asigure desfășurarea scufundărilor cu aer, cu durată mare de imersiune, în șantieri situate la adâncimi de până la 18 m. Instalația, prezentată schematic în figura 3.12, cuprinde un rezervor de aer de mare capacitate, o mască facială, ombilicalul și butelia de rezervă.

a. Rezervorul de aer, aflat la suprafață, 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 și unul de joasă presiune, cu ajutorul cărora se urmărește evoluția presiunii gazului din rezervor și, respectiv, din furtunul de alimentare.

b. Ombilicalul (legătura între scafandru și instalațiile de suprafață) este compus din furtunul de alimentare cu aer, saula de rezistență și cablul de comunicații audio. Furtunul de alimentare este confecționat din cauciuc siliconic armat și rezistă la

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

c. *Masca facială* este executată din cauciuc și are o formă adecvată feței unui scafandru de talie mijlocie. Pe mască este montat detentorul treapta a II-a, prin care respirația se face la cerere, sau continuu, în funcție de opțiunea utilizatorului. Detentorul, tip SUPER-PHYSALIE, nu este prevăzut cu muștiuc, pentru ca scafandru să poată vorbi. Aerul este inspirat din mască, microfonul este amplasat în partea de jos a măștii, lateral. Spațiul din mască, prevăzut pentru posibilitatea comunicării, reprezintă un volum mort pentru respirație. El se adaugă volumului mort din camera de joasă presiune a detentorului treapta a II-a. Din această cauză, respirația prin mască cere scafandru un efort suplimentar față de respirația 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 atașat un detentor treapta I, a cărui funcționare este pilotată de presiunea hidrostatică. Această butelie este deschisă de scafandru în cazul în care, în mod accidental, s-a întrerupt alimentarea de la suprafață.

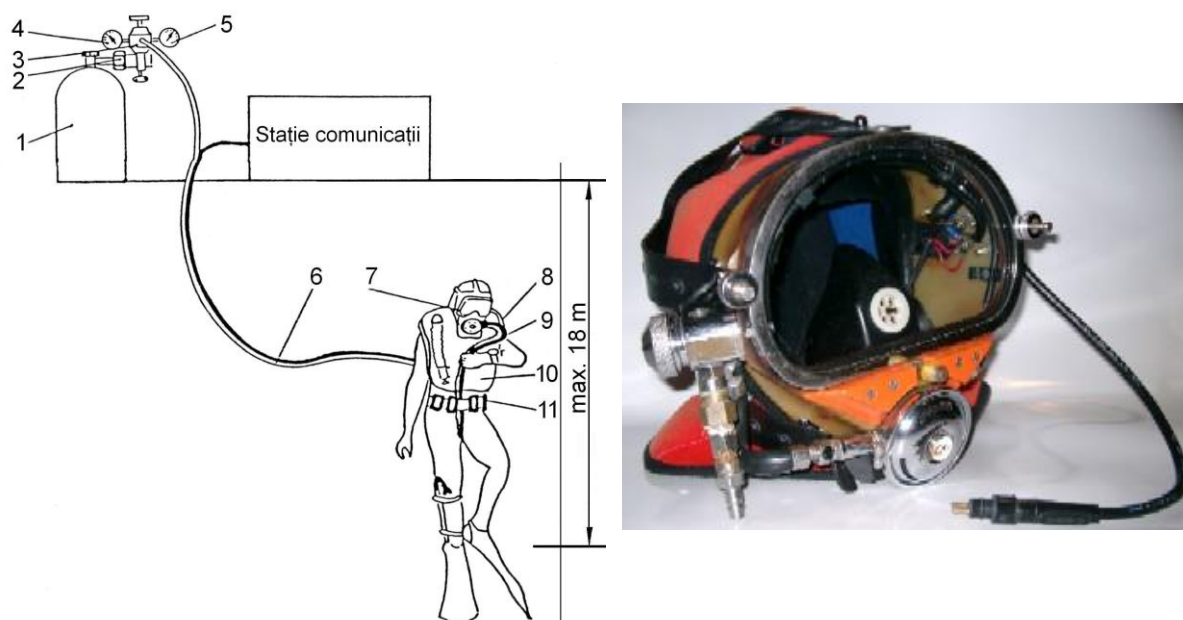


Fig. 3.12. Elementele componente ale instalației de scufundare cu circuit deschis și alimentare de la suprafață, ISAS și masca facială aferentă: 1- butelii de mare capacitate cu aer; 2- racord; 3- detentor treapta I; 4- manometru de înaltă presiune (0...200 bar); 5- manometru de medie presiune (0...25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

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

4.

APARATE DE RESPIRAT SUB APĂ CU CIRCUIT SEMIÎNCHIS ȘI MIXT

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

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 și reintrodusă în circuitul de respirație după ce a fost trecută, în prealabil, printr-un cartuș epurator unde este reținut dioxidul de carbon. Presiunea parțială a oxigenului din amestecurile utilizate este menținută în limitele de securitate, fără a se crește prea mult presiunea parțială 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–N₂–O₂ sau Ne–N₂–O₂), regulator de presiune treapta I, sac respirator și sistem de livrare automată a debitului de amestec respirator către consumator. Aceste aparate, atunci când sunt autonome, sunt caracterizate printr-o autonomie ridicată și printr-un randament al scufundării crescut. Atunci când se dorește un timp de scufundare mai ridicat, se procedează la alimentarea cu amestec respirator sintetic de la suprafață 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 și peste 54 m în cazul utilizării amestecurilor HELIOX sau TRIMIX. De asemenea și aceste aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis pot fi de două feluri funcție 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, funcție de modul de preparare a amestecului respirator, de două feluri:

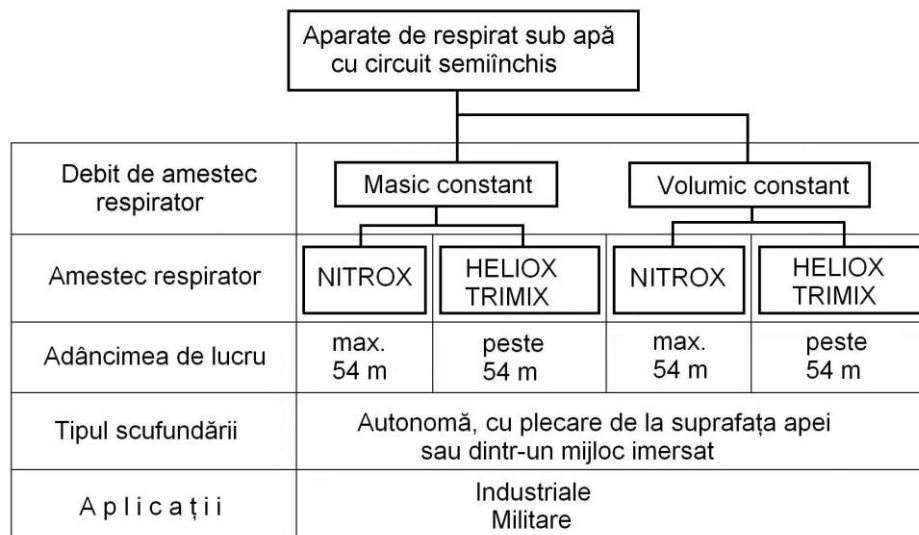
- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec prefabricat*;
- aparate cu circuit semiînchis, *cu amestec preparat local*.

Din prima categorie fac parte aparatele la care stocajul de amestec de gaz este realizat în instalații 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 și stocajul de gaz inert (gaz diluant al oxigenului), fiecare din cele două gaze fiind înmagazinate în butelii separate. Amestecarea celor două gaze, în vederea obținerii amestecului respirator dorit, se realizează local, în interiorul aparatului, alimentarea circuitului de respirație cu acest amestec efectuându-se prin intermediul unui dispozitiv de dozare complex, de construcție specială.

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

În figura 4.1 este prezentată o schemă conținând caracteristicile generale și performanțele 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 caracteristicile, performanțele și domeniile de aplicație 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 instalații 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 scufandru și curățat de dioxidul de carbon, formând astfel amestecul respirat în mod efectiv de către scufandru. Acest amestec trebuie să

îndeplinească condițiile privind limitele impuse presiunii parțiale a oxigenului din amestec pentru evitarea fenomenelor de hipoxie sau hiperoxie, urmărind totodată ca presiunea parțială 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 și timpul de decompresie, dictat de presiunea parțială 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 și cartuș 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 aplicații militare, care asigură stabilitatea compoziției amestecului respirat efectiv, prin eliminarea din circuit a unui volum de gaz proporțional cu ventilația. Conform schemei de funcționare din figura 4.3, scafandru respiră din aparat prin intermediul unei piese bucale (muștiuc), 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 și anume din sacul respirator mare (4) și sacul respirator mic (5). La expirație, amestecul gazos traversează cartușul epurator (2) și se repartizează în cele două burdufuri proporțional cu volumele acestora. În burduful mic, gazul intră printr-o supapă de transfer (8). În momentul inspirației, plămânul artificial își micșorează volumul, iar gazul din burduful mic este evacuat în exterior printr-o supapă de evacuare (6) de construcție specială. Deci, evacuarea este proporțională cu raportul volumelor celor două burdufuri.

Împrospătarea cu gaz se face la cerere. Atunci când cantitatea de gaz în mișcare diminuează datorită evacuării, consumului de oxigen și fixării dioxidului de carbon de către calcea sodată, partea superioară a sacului respirator acționează 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 funcție de adâncime, amestecurile supraoxigenate folosite sunt:

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

Scufundările cu amestecuri NITROX supraoxigenate sunt prin excelență 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.

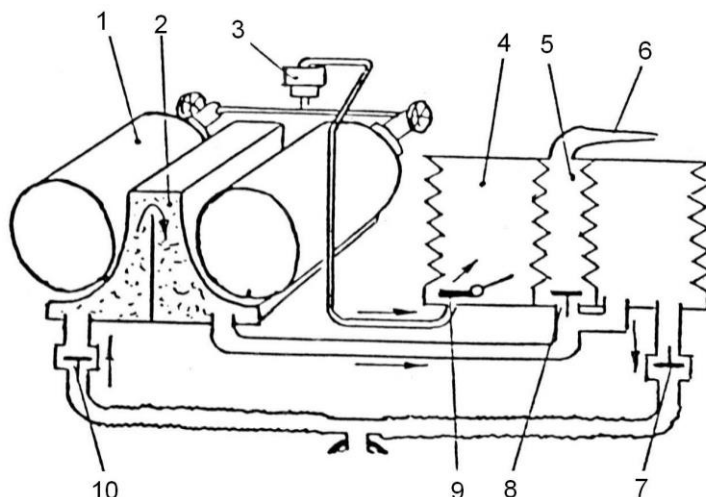


Fig. 4.3. Schema de principiu a aparatului cu circuit semiînchis DC 55.

Un alt aparat din aceeași categorie, dar mai performant datorită în special cartușului filtrant, este aparatul de respirat sub apă MIXGERS 78 fabricat de firma FENZY. Construit pe același principiu, acest aparat permite utilizarea unui amestec respirator ternar TRIMIX alcătuit din 23% oxigen, 37% azot și 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 păărăsească muștiucul său.

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

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

Pentru varianta de funcționare în circuit semiînchis, se utilizează amestecul de gaze standard NATO, NITROX B (60% O₂, 40% N₂) 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 și 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 reținerea dioxidului de carbon din amestecul gazos expirat se utilizează un cartuș epurator care constă dintr-o canistră ce conține o masă absorbantă (calce sodată) de tipul DiveSorbPro cu volumul de 2,5 l pentru o scufundare. La o temperatură cuprinsă între -2°C și +40°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, lățimea de 300 mm și grosimea de 170 mm. Greutatea aparatului este de aproximativ 15 kg în aer și 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 (funcționare 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 activități cu caracter militar la adâncimi cuprinse între 0 m și 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 și o amprentă acustică redusă, conform normelor NATO, ceea ce îl face utilizabil pentru operațiuni speciale.

Aparatul asigură o autonomie a scufundării de până la trei ore în funcție de nivelul de efort al activității subacvatice depusă de scafandru. De asemenea, aparatul este cu dimensiuni reduse, este compact, ușor de utilizat și de întreținut.

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

- Principiul de funcționare: 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% O₂, 40% N₂);
 - NITROX C (40% O₂, 60% N₂);
 - NITROX D (32,5% O₂, 67,5% N₂).
- Calcea sodată: Drägersorb 400, aprox. 3,5 ℓ pentru o scufundare;
- Dimensiunile: 660 mm lungime, 465 mm lățime, 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 folosește amestecuri respiratorii azot-oxigen (NITROX) supraoxigenate. Amestecul respirator NITROX este furnizat la debit constant și această livrare este suplimentată de un detentor treapta a II-a pentru consum de oxigen mai mare în cazul unei activități subacvatice mai intense. Aparatul DOLPHIN I, care este un aparat de respirat sub apă utilizat în scufundări civile profesionale, prezintă multe avantaje față de aparatele în circuit deschis cum ar fi:

- consum de gaz respirator cu până la 95% mai puțin;
- timp de scufundare fără decompresie mai lung;
- decompresie efectuată în condiții de mai mare siguranță;
- echilibru termic mai lung datorită căldurii generate în cartușul 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 cartușul epurator și sacul respirator, furtunurile respiratoare cu piesa bucală, detentorul treapta a II-a integrat sacului respirator, reductorul de presiune pentru gazul din butelie, harnașamentul și vesta de salvare cu lest integrat, butelia cu amestec NITROX de diferite mărimi și butelia de securitate.

În continuare sunt prezentate datele tehnice semnificative ale aparatului:

- Principiul de funcționare: aparat cu circuit semiînchis cu dozaj constant, cu sac respirator și cartuș filtrant;
- Substanță absorbantă pentru dioxidul de carbon: DiveSorb, aprox. 2,7 l pentru o scufundare;

Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis și mixt

- Sacul respirator: variație de volum între inspirație și expirație de circa 4,5 l, volumul total fiind de 10,5 l;
- Dimensiuni: 520 mm lungime, 370 mm lățime și 235 mm grosime;
- Greutatea aparatului: 15 kgf pe uscat și aproximativ neutră în apă;
- Volum interior butelie: 4 l;
- Presiune de încărcare butelie: 200 bar (sc. man.);
- Material butelie: oțel;
- Adâncimea scufundării/timp de scufundare:
 - 0...20 m pentru NITROX 60/40 (O₂/N₂)/125 min.;
 - 0...24 m pentru NITROX 50/50 (O₂/N₂)/95 min.;
 - 0...30 m pentru NITROX 40/60 (O₂/N₂)/67 min.;
 - 0...45 m pentru NITROX 32/68 (O₂/N₂)/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 cântărește 15 kg pe uscat și 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.) și este concepută astfel încât să garanteze o durată a scufundării de 110 min. la adâncimi cuprinse între 0 m și 20 m.

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



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

Conținutul 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 proporțiile componentelor de 40% oxigen și 60% azot. Aparatul de respirat sub apă ATLANTIS I poate fi utilizat și 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 aplicații militare. Acest aparat a fost unul dintre aparatele standard ale U.S. Navy, utilizat pentru operațiuni militare de către scafandri deminori. Aparatul poate utiliza atât amestec heliu-oxigen (HELIOX), cât și amestec azot-oxigen (NITROX).

Aparatul MK 6 utilizează o injecție la debit constant de gaz. Aparatul are în componență două butelii pentru gazul respirator (NITROX sau HELIOX) și, într-o anumită configurație, o butelie cu oxigen, pentru efectuarea decompresiei în caz de urgență. Buteliile cu amestec gazos au fiecare capacitatea de 2400 l_N de amestec și 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 funcție de temperatura apei și 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 peșteri, scufundări la epave, scufundări civile la mare adâncime și scufundări cu caracter științific.

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 cerințelor metabolice ale scafandrului, printr-o injecție la debit masic constant. În consecință, 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 și în circuit deschis în caz de urgență, scafandrul respirând direct amestecul respirator din același 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 construcție și funcționare 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 concentrație de oxigen de 32%, 40% și 50%:

- cu amestec NITROX cu 50% O₂ , adâncimea maximă este de 18 m;
- cu amestec NITROX cu 40% O₂ , adâncimea maximă este de 25 m;
- cu amestec NITROX cu 32% O₂ , 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% O₂ / 68% N₂: 15,6 l/min;
- pentru amestec NITROX cu 40% O₂ / 60% N₂: 9,6 l/min;
- pentru amestec NITROX cu 50% O₂ / 50% N₂: 6,6 l/min.

Aparatul este prevăzut cu două butelii ce pot fi încărcate cu două amestecuri diferite de NITROX, unul pentru coborâre, urcare și 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 Sodlime;
- Durata de scufundare: 2,5 ore pentru NITROX 32% și 4 ore pentru NITROX 60%);

- Temperatura optimă a apei: -1° + 35 °C;
- Greutate: 27 kg cu absorbant; flotabilitate neutră în apă.

Varianța AZIMUTH AF comercializată din anul 2002 în EU, folosește și amestec TRIMIX și poate fi utilizat până la adâncimea maximă de 120 m în funcție 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 construcție și funcționare cu recirculatoarele DRÄGER ATLANTIS, DRÄGER RAY și AZIMUTH. Este certificat CE fiind folosit și 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) și 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 și blocul cu sacul respirator. Primele două blocuri au în componență unul, două sau trei ajutaje: de injecție AI, de compensare AC și 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 și relațiile de calcul aferente elementelor fiecărui bloc din componența acestor aparate.

5.1. CURGEREA GAZELOR RESPIRATORII PRIN AJUTAJELE DE INECȚIE, DE COMPENSARE ȘI DE SPĂLARE

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

5.1.1. CURGEREA IZENTROPICĂ PRIN AJUTAJE. RELAȚIA LUI HUGONIOT

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

Ținând cont de ipotezele de mai sus și apelând la ecuația de bilanț energetic scrisă pentru unitatea de masă, deci cu mărimi specifice, sub forma:

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

se poate scrie ecuația diferențială:

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

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

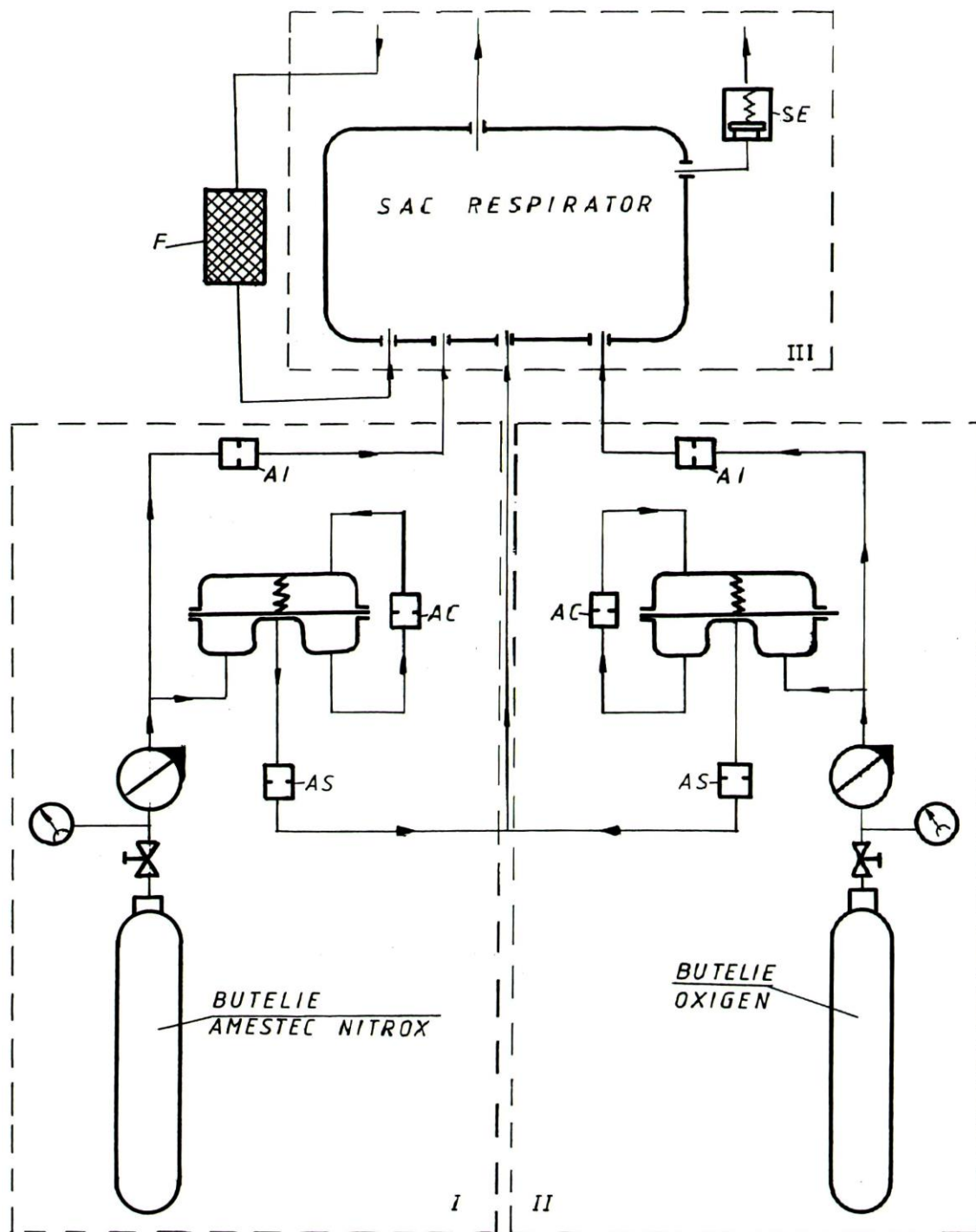


Fig. 5.1. Schema de principiu, simplificată, a aparatului de respirat sub apă cu circuit mixt: I – bloc de alimentare cu amestec respirator NITROX; II – bloc de alimentare cu oxigen; III – bloc cu sac respirator; SE – supapă de evacuare; AI – ajutoraj de injecție; AC – ajutoraj de compensare; AS – ajutoraj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

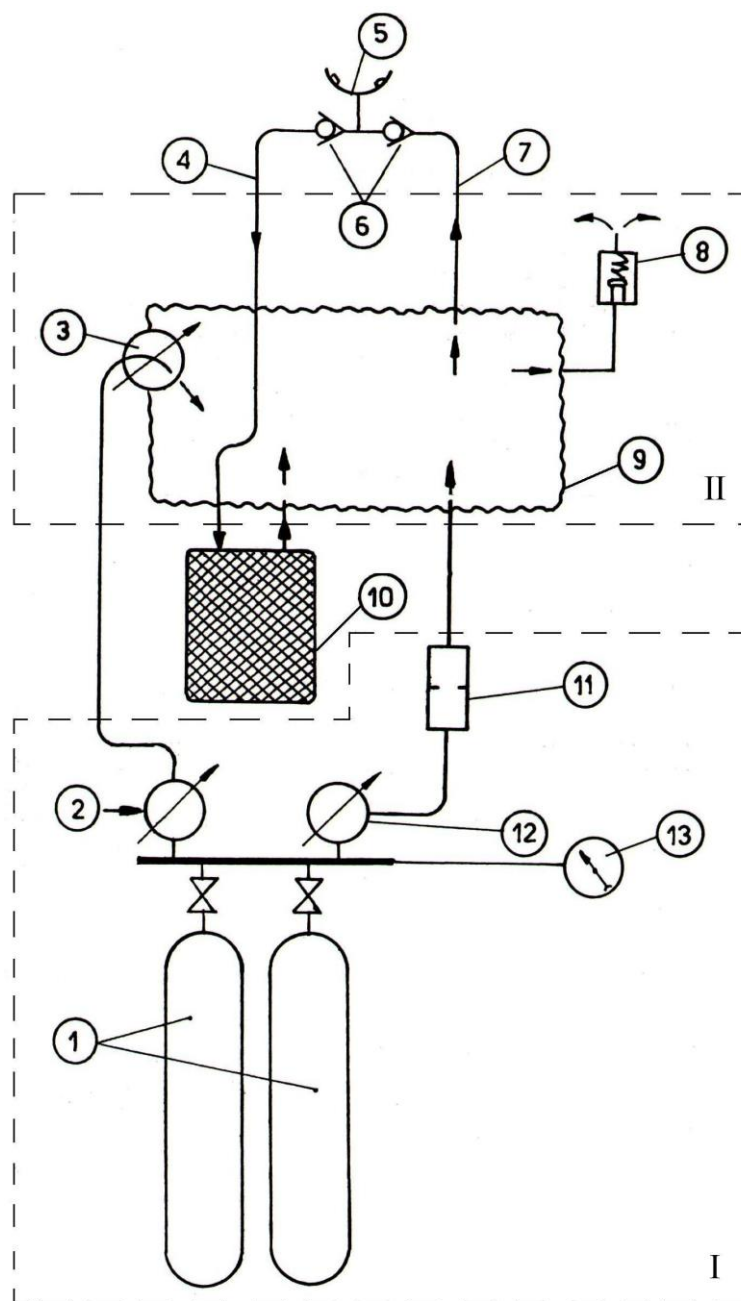


Fig. 5.2. Schema de principiu a aparatului de respirat sub apă cu circuit semiînchis: I – bloc de alimentare cu amestec respirator; II – bloc cu sac respirator; 1 – butelii stocare amestec respirator; 2 – reductor de presiune treapta întâi pilotat; 3 – reductor de presiune treapta a doua; 4 – furtun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

Termenii ecuațiilor de mai sus sunt, din punct de vedere dimensional, viteze la pătrat $[L^2 T^{-2}]$, iar din punct de vedere energetic, energii specifice raportate la masa de fluid. Pentru studierea curgerii prin ajutor, pe lângă ecuația 5-2 sunt necesare ecuații suplimentare și anume:

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

$$\frac{p}{\rho} = R T, \quad (5-3)$$

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

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

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dv}{v} + \frac{dA}{A} = 0, \quad (5-4)$$

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

– ecuația energiei pentru fluidul perfect (legea lui Bernoulli) a cărei formă diferențială este:

$$d(gz) + d\left(\frac{v^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} = 0. \quad (5-5)$$

Ținând cont de ecuațiile 5-2 și 5-5 se poate scrie expresia variației de entalpie în condițiile ipotezelor de calcul adoptate:

$$dH = \frac{dp}{\rho}. \quad (5-6)$$

Pentru gazul perfect se poate scrie:

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

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

Rezultă relația:

$$dH = \frac{k}{k-1} d\left(\frac{p}{\rho}\right) = \frac{k}{k-1} \left(\frac{dp}{\rho} - p \frac{d\rho}{\rho^2}\right), \quad (5-8)$$

de unde:

$$\frac{dp}{\rho} = \frac{k}{k-1} \frac{dp}{\rho} - \frac{k}{k-1} p \frac{d\rho}{\rho^2}. \quad (5-9)$$

Integrând ecuația 5-9 se regăsește ecuația transformării adiabaticice:

$$\frac{p}{\rho^k} = ct. \quad (5-10)$$

După cum se cunoaște, o transformare adiabatică reversibilă este în același timp și izentropică.

Pentru a pune în evidență relațiile diferențiale între presiune p , viteză v și aria secțiunii A , se pornește de la ecuația 5-5 în care se neglijează termenul corespunzător forțelor masice (de greutate, $d(gz) = 0$) rezultând:

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

Viteza sunetului (celeritatea) pentru procesele izentropice este:

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \text{ și, deci, } dp = a^2 d\rho \quad (5-11)$$

de unde rezultă relația:

$$v dv = -\frac{dp}{\rho} = -a^2 \frac{d\rho}{\rho}. \quad (5-12)$$

Eliminând $d\rho/\rho$ din ecuațiile 5-4 și 5-12 rezultă relația diferențială între A și v , care poartă denumirea de *relația lui Hugoniot*:

$$\frac{dA}{A} + \frac{dv}{v} \left(1 - \frac{v^2}{a^2}\right) = 0, \quad (5-13)$$

sau

$$\frac{dA}{A} + \frac{dv}{v} (1 - M^2) = 0, \quad (5-14)$$

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

Se poate scrie și relația diferențială între v și p sub forma:

$$\frac{dv}{v} + \frac{1}{M^2 k} \frac{dp}{p} = 0. \quad (5-15)$$

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

a) Dacă $v < a$, ($M < 1$ – viteze subsonice), viteza variază în sens invers cu secțiunea: $dv > 0$ dacă $dA < 0$.

b) Dacă $v > a$, ($M > 1$ – viteze supersonice), viteza variază în același sens cu secțiunea: $dv > 0$ dacă $dA > 0$.

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

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

Pornind de la ecuația 5-2 și neglijând termenul corespunzător forței masice se obține:

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

iar prin integrare rezultă:

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

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

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

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

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

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 ajutoraj fiind izentropică și deci:

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

rezultă următoarea expresie a vitezei locale în lungul ajutorajului, în funcție de parametrii amestecului gazos la intrarea (p_0 și ρ_0):

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

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

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

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

unde a_0 este celeritatea corespunzătoare condițiilor de alimentare a ajutorajului.

Debitul masic printr-un ajutoraj cu condiții de alimentare $v_0 = 0$, p_0 și T_0 se obține înlocuind în relația debitului masic $q_m = \rho A v$ expresia vitezei v dată de relația lui Barré de Saint-Venant:

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

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

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

Introducând viteza maximă $v_{\max}$ conform relației 5-19 și notând:

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

se poate scrie expresia debitului masic prin ajutoraj:

$$q_m = \rho_0 A v_{\max} Y. \quad (5-23)$$

Se observă că pentru parametrii corespunzători alimentării ajutorajului (p_0 , ρ_0 și T_0) constanți, debitul masic variază cu produsul AY . Considerând că pentru un anumit fluid exponentul adiabatic k este o constantă, se poate analiza variația lui Y funcție de raportul p / p_0 :

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

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

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

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

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

$$dq_m = YdA + AdY = 0.$$

Pentru Y maxim, $dY = 0$, de unde rezultă că $dA = 0$ și deoarece Y este maxim, q_m fiind constant, rezultă că secțiunea A este minimă. Rezultă deci, că valoarea lui Y maxim ($Y = Y_{cr}$), care se obține pentru:

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

nu poate fi realizată decât în secțiunea minimă a ajutorajului (în colul ajutorajului: $A_{min} = A_{cr} = A_{col}$). Pentru această secțiune minimă, A_{cr} , se pot scrie relațiile:

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

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

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

Exprimând viteza sunetului a_{cr} în condițiile corespunzătoare secțiunii critice $A_{cr}(p_{cr}, \rho_{cr}, T_{cr})$ se poate demonstra că

$$v_{cr} = a_{cr} = \sqrt{k R T_{cr}} = \sqrt{k \frac{p_{cr}}{\rho_{cr}}} \quad (5-28)$$

și deci

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

iar debitul masic are expresia:

$$Q_m = q_{cr} = \rho_{cr} A_{cr} v_{cr}. \quad (5-30)$$

Astfel, pentru aer și amestecuri NITROX, la care exponentul adiabatic este $k = 1,405$, se obține:

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

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

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

Când presiunea din aval scade, debitul masic prin ajutoraj crește corespunzător relației 5-23.

Dacă detenta pe ajutoraj este redusă, raportul p / p_0 fiind apropiat de valoarea 1 pe toată lungimea ajutorajului, 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 ajutoraj.

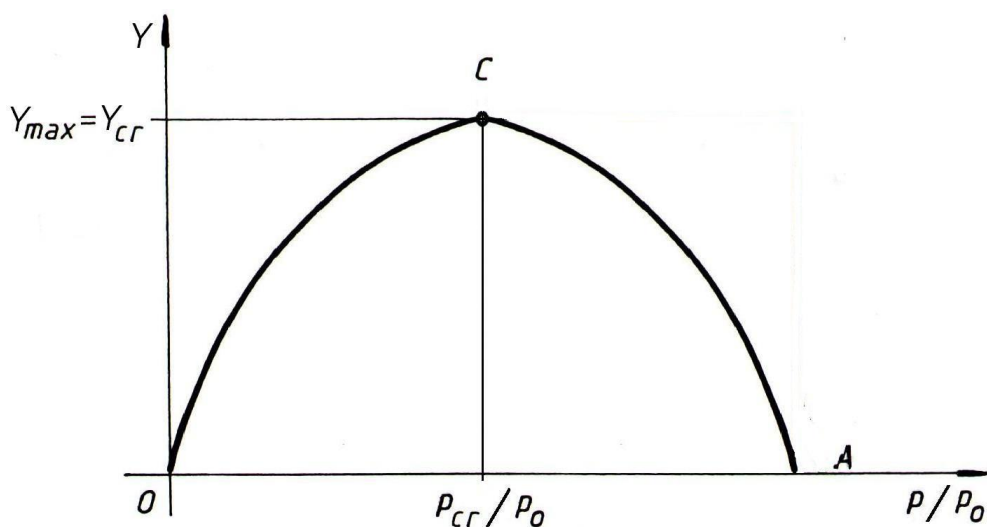


Fig. 5.3. Variația lui Y în funcție de raportul p / p_0 .

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

- a) situația unde $p > p_{cr}$ (ramura CA) curgerea fiind subsonică;
- b) situația unde $p < p_{cr}$ (ramura OC) curgerea fiind supersonică.

Această curgere se obține în mod obligatoriu.

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

secțiunea 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 și *debit în regim de blocaj*.

5.1.3. CURGEREA GAZELOR PRIN AJUTAJE CONVERGENTE

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

Se notează cu p_0 , ρ_0 , T_0 și v_0 parametrii amestecului gazos sau oxigenului în amonte de ajutaj și 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 și $v_e = 0$, parametrii gazului la ieșire, iar cu $A_1 = A_{cr}$ secțiunea colului ajutajului (secțiunea minimă). Toți parametrii din această secțiune se notează cu indicele 1 (fig. 5.4). Fiind vorba de un ajutaj convergent, $dA < 0$.

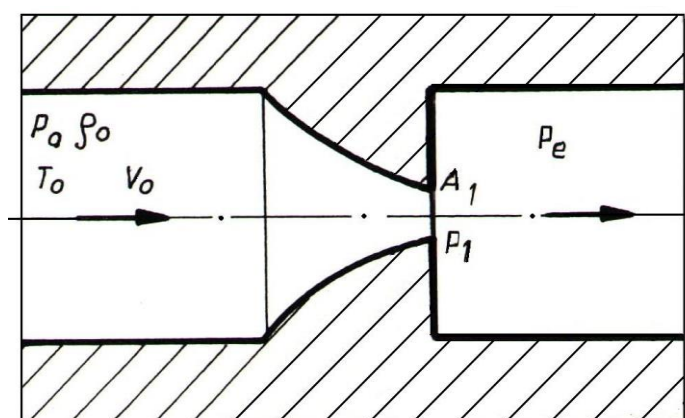


Fig. 5.4. Schema ajutajului convergent.

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

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

Această relație 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 secțiunea minimă A_1 este egală cu presiunea din aval datorită formării unui jet cilindric la ieșirea din ajutoraj.

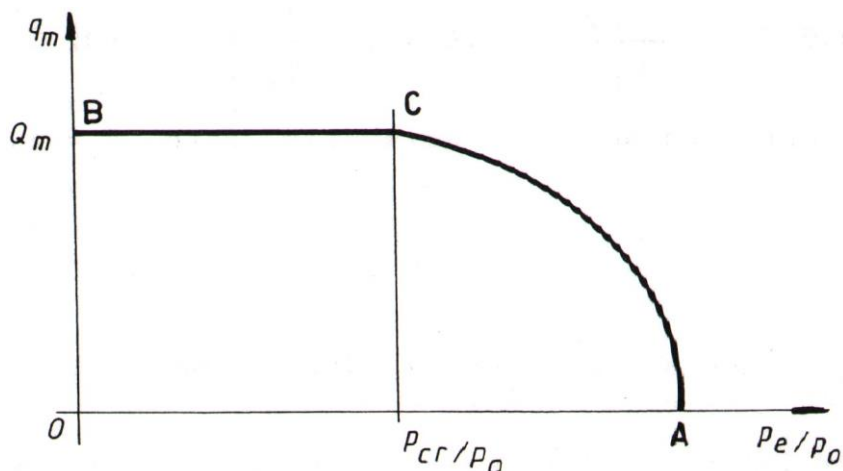


Fig. 5.5. Variația debitului masic q_m în funcție de raportul p_e / p_0 , pentru ajutoraj convergent.

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

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

în secțiunea minimă A_1 a ajutorajului se obține viteza sunetului, v_{cr} și corespunzător rezultă parametrii critici p_{cr} , ρ_{cr} și T_{cr} , iar debitul masic de amestec gazos prin ajutoraj atinge valoarea maximă Q_m dată de expresia 5-30. Înlocuind în această relație expresia vitezei v_{cr} (5-28) se obține:

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

dar, conform relațiilor 5-29:

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

rezultă:

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

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

BIBLIOGRAFIE

- ATANASIU, T., GRAD, V., MIHAI, C., GEORGESCU, ȘT. – *Acțiunile scafandrilor deminori în viziunea flotelor occidentale*. Editura EX PONTO, Constanța, 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, București, 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 sickness*. Springer Verlag, pp. 4-62, Berlin, 1984.
- BÜHLMANN, A.A. – *Untersuchungen zur Dekompression bei erniedrigtem 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 și mijloacele de protecția respirației, în procese hiperbare*. Tează de doctorat, Universitatea "Ovidius" Constanța, 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 injecție masică constantă pentru amestecuri binare*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 45/1986, I.C.B., București, 1986.
- DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a fenomenelor gazodinamice specifice unui sistem cu injecție la debit masic constant pentru amestecuri respiratorii binare*. A II-a Sesiune de Comunicări științifice cu tema Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanța, 1988.
- DEGERATU, M. – *Simularea teoretică a funcționării aparatului de scufundare ASMA cu amestec Helium-Oxigen*. A IV-a Sesiune de Comunicări Științifice cu tema Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică, Centrul de Scafandri, Constanța, 1989.
- DEGERATU, M. – *Modelarea matematică a proceselor gazodinamice din cadrul aparatelor de scufundare utilizând oxigen pur și amestec binar*. Catedra de Hidraulică, Raport tehnic la C.C. nr. 73/1989, I.C.B., București, 1989.
- DEGERATU, M. – *Calculul termohidraulic al circuitelor aferente echipamentelor de scufundare ASMAR-AMOX*. Catedra de Hidraulică și Protecția Mediului, Raport tehnic la C.C. nr. 108/1991, I.C.B., București, 1991.
- DEGERATU, M., PETRU, A., IONIȚĂ, S. – *Manualul scafandrului*. Ed. Per Omnes Artes, București, 1999.

Bibliografie

- DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Șt. – *Aparate de respirat sub apă*. Ed. MATRIX ROM, București, 2003.
- DEGERATU, M., PETRU, A., GEORGESCU, Șt., IONIȚĂ, S. – *Tehnologii hiperbare pentru scufundări unitare și în saturație*. Ed. MATRIX ROM, București, 2003.
- DEGERATU, M. – *Studii de optimizare a activităților de scufundare prin utilizarea amestecurilor de gaze și a tabelelor de decompresie tip NITROX*. Raport tehnic la C. C. Poziția 124 din Planul sectorial de cercetare-dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale, București, 2013.
- DEGERATU, M. – *Analiza teoretică a curgerii gazelor prin ajutaje și 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, București, 2014.
- DINU, D., VLAD, C. – *Scafandri și vehicule subacvatice*. Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986.
- DINU, D., PÎNZARU, M., STANCU, C., VLAD, C. – *Tehnologii subacvatice. Autorizarea activităților subacvatice*. Ed. Tehnică, București, 2000.
- FRUCTUS, X., SCIARLI, R.L. – *La plongée santé et sécurité*. 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 injecție a amestecului gazos aferent echipamentului de scufundare tip ASMA*. Sesiune de Comunicări Științifice cu tema "Contribuții românești în ingineria și tehnologia activităților subacvatice", Centrul de Scafandri, Constanța, 1987.
- JONES, H.S. – *Respiration System: Nitrogen Elimination*. Medical Physics, vol. II, Chicago Year Book Publishers, 1950.
- LAMBERTSEN, C.J. – *Effects of Excessive 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 funcției respiratorii și circulatorii în cursul adaptării și muncii în mediul hiperbar*. Teză de doctorat, Institutul de Medicină și Farmacie Cluj-Napoca, 1987.
- PETRU, A. – *Aparate autonome de respirat sub apă*. Buletinul Marinei Militare, nr. 2, Constanța, 1985.

- PETRU, A., BEIU, V., DEGERATU, M. – *Studiu privind optimizarea rezervei de gaz pentru creșterea autonomiei în scufundare*. A II-a Sesiune de Comunicări Științifice cu tema "Inginerie, tehnologie și medicină subacvatică", Centrul de Scafandri, Constanța, 1985.
- PETRU, A. – *Amestecuri respiratorii*. Buletinul Tehnica Militară, nr. 3-4 , București, 1987.
- PETRU, A. – *Aparate de respirat sub apă cu circuit semiînchis*. Buletinul Tehnica Militară, nr. 4, București, 1989.
- PETRU, A., DEGERATU, M., IONIȚĂ, S. – *Ghidul scafandrului autonom*. Editura Olimp-Press, București, 1992.
- PETRU, A. – *Hidraulica proceselor hiperbare*. Teză de doctorat, Universitatea Tehnică de Construcții București, 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. – *Intevenții subacvatice*. Editura Tehnică, București, 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-oxygen 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.