



UNIVERSITATEA MARITIMĂ DIN CONSTANȚA
ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIE MECANICĂ ȘI MECATRONICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND TRANSFERUL DE GAZE ÎN
TEHNOLOGIILE DE SCUFUNDARE
REZUMAT**

Autor: CSIII ing. Tamara STANCIU

Conducător de doctorat: Prof. univ. dr. ing. Dumitru DINU

Constanța, România

2018

CUPRINS

1. CAPITOLUL I INTRODUCERE	5
1.1 Importanța și oportunitatea lucrării	5
1.2 Obiectivele lucrării	7
2. CAPITOLUL II STADIUL ACTUAL AL TEHNOLOGIILOR DE SCUFUNDARE ȘI TRANSFERURILE DE GAZE IMPLICATE	9
2.1 Evoluția tehnologiilor de scufundare	9
2.2 Tipurile de scufundări	15
2.3 Stadiul actual al scufundărilor profesionale	26
2.4 Transferurile de gaze în timpul scufundărilor	38
3. CAPITOLUL III TERMOCINETICA TRANSFERULUI DE AMESTECURI RESPIRATORII	49
3.1 Generalități privind termodinamica gazelor	49
3.2 Termocinetica gazelor (Transmisia căldurii).....	56
3.3 Aerul umed	62
3.4 Stadiul actual al cercetărilor privind bilanțul termic al scafandrilor	65
3.5 Stabilirea ecuației de bilanț termic al scafandrilor în mediul hiperbar umed.....	74
4. CAPITOLUL IV CERCETĂRILE PRIVIND PIERDERILE TERMICE LA TRANSFERUL DE AMESTECURI RESPIRATORII PRIN CORPUL SCAFANDRULUI	83
4.1 Generalități privind determinările experimentale ale bilanțului termic al scafandrilor	83
4.2 Stadiul actual al cercetărilor experimentale privind bilanțul termic al scafandrilor	85
4.3 Scufundările unitare umede cu aer	89
4.4 Scufundările în saturație cu heliox	110
4.5 Validarea experimentală a ecuației de bilanț termic propusă	120
4.6 Concluziile privind pierderile de căldură la transferul de amestecuri respiratorii prin corpul scafandrilor	131
5. CAPITOLUL V TRANSFERUL GAZELOR PRIN APARATELE DE RESPIRAT ALE SCAFANDRILOR	135
5.1. Generalități privind curgerea gazelor prin aparatele de respirat	135
5.2 Modelarea matematică a curgerii gazelor prin restrictorii aparatelor de respirat.....	147
5.3 Mecanismele de admisie ale aparatelor de respirat și variantele constructive ale acestora.....	158
5.4 Calculul teoretic al parametrilor curgerii turbulente de gaz respirator prin mecanismele pneumatice studiate.....	162
5.5 Simularea CFD (Computational Fluid Dynamics) a curgerii turbulente de gaz	

respirator prin mecanismele pneumatice studiate	167
6. CAPITOLUL VI – VALIDAREA EXPERIMENTALĂ A CALCULELOR TEORETICE ȘI SIMULĂRII NUMERICE A CURGERII GAZELOR PRIN APARATELE DE RESPIRAT ALE SCAFANDRILOR	179
6.1 Obiectivele validării experimentale	179
6.2 Testarea	180
6.3 Interpretarea rezultatelor obținute prin calculul teoretic, prin simularea numerică cu CFD ANSYS Fluent și prin testările reale	185
7. CAPITOLUL VII – CONTRIBUȚIILE PERSONALE	191
7.1 Contribuțiile personale privind transferul de căldură prin corpul scafandrului	191
7.2 Contribuțiile personale privind transferul de masă la curgerea gazului prin aparatele de respirat ale scafandrilor.....	193
8. CAPITOLUL VIII – CONCLUZIILE GENERALE	195
8.1 Pierderile de căldură în timpul transferurilor amestecurilor respiratorii prin corpul scafandrului.....	195
8.2 Curgerea gazului prin aparatele de respirat ale scafandrilor.....	199
REFERINȚE BIBLIOGRAFICE	204

Capitolul I Introducere

Principalul obiectiv al tezei de doctorat este identificarea fenomenelor fizice care apar în activitatea de scufundare în timpul transferului de gaze respiratorii și influența lor asupra securității scafandrilor.

Am găsit două mari probleme care caracterizează circulația gazelor respiratorii:

1. Pierderile de căldură în timpul transferurilor amestecurilor respiratorii prin corpul scafandrilor, care conduc la o răcire accentuată a acestuia, până la deces, dacă nu sunt gestionate corespunzător.
2. Rezistența respiratorie externă, indusă la transferul de gaz prin aparatul de respirat (regulatorul de presiune) către sistemul respirator uman.

Adâncimea și durata scufundării sunt limitate de mai mulți factori, printre care confortul termic și respirator al scafandrilor. Indiferent dacă scufundarea este reală sau simulată, pierderile de căldură trebuie să fie evaluate, astfel încât alegerea sistemului de protecție termică și a temperaturii amestecului respirator să se facă în mod adecvat.

Gazul devine mai dens odată cu creșterea adâncimii (presiunii), determinând creșterea rezistenței respiratorii. Cunoașterea debitului respirator de gaz în diversele situații este necesară pentru controlul fenomenelor fizice și fiziologice implicate, pentru alegerea unui aparat de respirat care să reducă rezistențele externe și implicit efortul utilizatorului.

În consecință consider utilă tema de doctorat: “Cercetări privind transferul de gaze în tehnologiile de scufundare”, care abordată într-un mod original poate lărgi cunoștințele în domeniu.

Obiectivele tezei de doctorat sunt:

- Stabilirea mărimilor fizice și a ecuațiilor care caracterizează cele două fenomene, respectiv pierderile termice prin corpul scafandrilor și curgerea gazelor prin circuitul respirator al echipamentului de scufundare.
- Identificarea ecuației de bilanț termic al scafandrilor și rezolvarea ei.
- Validarea experimentală a soluției ecuației diferențiale de bilanț termic al scafandrilor, prin scufundări simulate în Laboratorul hiperbar.
- Identificarea unui model matematic de calcul al debitului masic de gaz respirator, livrat de reductorul de presiune al aparatului de respirat la scufundare.
- Simularea CFD (Computational Fluid Dynamics) - ANSYS Fluent a curgerii gazelor prin SCUBA (aparat de respirat autonom, în circuit deschis, al scafandrilor).
- Validarea experimentală a calculelor teoretice și a simulării numerice (prin CFD – ANSYS Fluent), privind curgerea gazelor prin aparatele de respirat ale scafandrilor.

Capitolul II Stadiul actual al tehnologiilor de scufundare și transferurile de gaze implicate

Teza cuprinde o analiză a stadiului actual al tehnologiilor de scufundare și a transferurilor de gaze implicate. După trecerea în revistă a principalelor realizări din domeniu, am făcut o clasificare a tipurilor de scufundări și a echipamentelor utilizate. Această clasificare a pus în evidență principalele circuite de gaz respirator și transferurile de gaze în timpul scufundărilor.

Am stabilit că transferul de căldură prin *conducție* și prin *convecție* guvernează pierderile termice ale scafandrilor în activitatea sa și în consecință am identificat legile care trebuiesc aplicate.

Pentru reducerea efortului respirator indus de aparatul de respirat, am studiat transferul de masă al gazelor, prin circuitele specifice ale echipamentelor de scufundare. În lucrare am prezentat și un Echipament subacvatic de intervenții în apă contaminată, în concepție proprie, proiectat și testat la Centrul de Scafandri din Constanța.

Așa cum se observă, efortul de susținere a vieții scafandrilor în condiții optime, în timpul activităților lor, se bazează pe descoperirile științifice anterioare, din domenii foarte largi: fizica,

chimia, fiziologia, ingineria. Părerile specialiștilor nu sunt unanime nici astăzi în ceea ce privește domeniul hiperbar, lăsând loc programelor de studii teoretice și experimentale, pentru îmbunătățirea tehnologiilor specifice.

Cel mai important element rămâne gazul respirator. Acesta este fabricat ca amestec al oxigenului cu unul sau două gaze diluante, presurizat pentru depozitare, transferat prin instalațiile specifice către circuitul respirator sau cel de presurizare al barocamerelor.

În procesul respirației hiperbare gazul respirator este transportat până la gură, apoi este preluat prin inspirație până la alveole, unde este transmis oxigenul din amestec și apoi în sens invers sunt preluate produsele metabolismului celular: bioxidul și monoxidul de carbon, reluându-se această circulație până la eliberarea în apă sau în atmosferă, în cazul scufundărilor simulate.

Capitolul III Termocinetica transferului de amestecuri respiratorii

Studiul transferului de gaze în timpul scufundărilor se face prin metode teoretice și experimentale. Din această cauză am fundamentat riguros termocinetica transferului de amestecuri respiratorii.

Am pornit de la ipoteza că putem asimila corpul scafandruului cu un cilindru multistrat (mușchi, piele, costum, apă). Pentru aceasta am studiat ecuația Fourier pentru conducția termică, câmpul de temperatură care străbate doi pereți cilindrici paraleli și aplicarea condițiilor de unicitate, convecția liberă în spații deschise. Am stabilit criteriile de similitudine care se aplică pentru determinarea coeficientului α de transfer termic convectiv.

Aerul stocat în buteliile presurizate este uscat și rece. În timpul procesului respirator, el este încălzit și umidificat de scafandru. Din acest motiv am studiat proprietățile aerului umed și fluxul de căldură primit în timpul vaporizării.

Pe plan internațional au fost rezolvate ecuațiile de bilanț termic ale corpului uman doar în mediul hiperbar uscat.

Ecuația de bilanț termic propusă pentru mediul hiperbar umed este un model simplificat al unui fenomen foarte complex. Au fost adoptate următoarele ipoteze:

- Pentru țesuturi s-a utilizat un model redus, în care rezistențele conductive ale straturilor de piele au valori dependente de constituția scafandruului și de efort.
- Radiația a fost neglijată datorită temperaturilor scăzute din apă.
- Corpul scafandruului este în contact direct cu apa din costumul umed, deci nu avem evaporare.

În mod clar ipoteza asimilării ansamblului corp scafandru – film de apă – costum - apă cu un cilindru multistrat, de lungime echivalentă cu înălțimea subiectului, în defavoarea ipotezei pereților cu fețe plane paralele, este mai apropiată de realitate. Acest studiu poate fi continuat cu o aproximare mai rafinată a corpului uman (segmentarea lui în cap, trunchi, membre, etc.), deci rezultatele vor fi mai exacte.

Studiul ecuației de bilanț termic al corpului scafandruului în mediul hiperbar umed a furnizat o soluție matematică ușor de utilizat pentru estimarea temperaturii corpului lui în funcție de timpul de staționare în imersiune.

Pierderile termice se adăugă energiei totale pierdute de scafandru în perioada activității de scufundare. Negestionate cu atenție, ele duc la scăderea temperaturii interne a individului sub limita admisă pentru menținerea siguranței și sănătății lui, ducând până la deces. Informația referitoare la bilanțul termic al scafandruului îi este folositoare acestuia, deoarece își poate evalua propriile pierderi de căldură și în consecință poate alege atât costumul de protecție (grosimea lui, materialul), cât și timpul de scufundare, în funcție de următoarele variabile:

- temperaturile corpului și a apei;
- presiunea apei, corespunzătoare adâncimii de scufundare;
- principalele trăsături fiziologice individuale;
- caracteristicile lui respiratorii (debit respirator ventilat);

- proprietățile gazului respirator.
O parte din aceste variabile depind de presiunea apei (adâncime).

Capitolul IV Cercetările privind pierderile termice la transferul de amestecuri respiratorii prin corpul scafandrilor

Cercetările privind pierderile termice la transferul de amestecuri respiratorii prin corpul scafandrilor s-au făcut prin scufundări unitare cu aer și în saturație cu heliox și au avut ca scop principal validarea experimentală a ecuației de bilanț termic furnizată anterior și a soluției ei.

Evaluarea pierderilor termice, atât la nivel cutanat, cât și respirator, s-a făcut prin testarea a 3 tipuri de subiecți: A (slab), B (normal) și C (corpulent), având costume de grosimi diferite, în condiții de scufundare diverse (temperatura apei, adâncimea de scufundare, timpul de expunere).

Urmărind rezultatele teoretice și cele obținute prin testări experimentale, se observă că între temperaturile calculate și cele măsurate există o diferență de $\approx 0,5$ [$^{\circ}\text{C}$] la scufundările cu aer și de ≈ 1 [$^{\circ}\text{C}$] la scufundările în saturație cu heliox. Am analizat ipotezele inițiale și am propus un factor de corecție, datorat ipotezelor simplificatoare, ținând cont și de faptul că testările s-au făcut în condiții de simulare, prin presurizarea chesoanelor cu o viteză ce influențează reacția organismului.

Soluția finală a ecuației $T(t)$ formula (4.37) este originală.

$$T_{(t)} = \left[T_0 - T_a - \frac{\dot{Q}_{m-l(p)} \rho_{(p)} x_{(p)} \dot{V}_{(p)}}{\frac{A}{R_{(p)}} + \rho_{(p)} c \dot{V}_{(p)}} \right] e^{\frac{\frac{A}{R_{(p)}} + \rho_{(p)} c \dot{V}_{(p)}}{mcc} t} + \frac{\dot{Q}_{m-l(p)} \rho_{(p)} x_{(p)} \dot{V}_{(p)}}{\frac{A}{R_{(p)}} + \rho_{(p)} c \dot{V}_{(p)}} + T_a - c$$

Factorii de corecție sunt: $c_{aer} = 0,5$ [$^{\circ}\text{C}$]; $c_{heliox} = 1$ [$^{\circ}\text{C}$].

Modelul matematic propus este valid pentru scufundările în mediu hiperbar umed, până la 60m adâncime, atât în cazul scufundărilor unitare cu amestec respirator aer, cât și în cazul scufundărilor în saturație, cu amestec respirator heliox 95/5. Variabila principală este timpul t [s].

Capitolul V Transferul gazelor prin aparatele de respirat ale scafandrilor

A doua problemă de studiu propusă, rezistența externă indusă la transferul de gaz prin aparatul de respirat (regulatorul de presiune treapta a doua) către sistemul respirator uman, a fost rezolvată pornind de la stabilirea condițiilor de curgere.

Curgerea aerului prin aparatul de respirat treapta a II-a este staționară și turbulentă ($Re > 10000$), prin tuburi și ajutaje, cu doi restrictori principali: restrictorul variabil **A** (între scaun și pistonul cilindric) și restrictorul fix **B** (orificiul din pistonul cilindric). Modelarea matematică a curgerii prin restrictorii aparatelor de respirat a fost făcută urmărind noțiunile de teoria curgerii potențiale a gazelor prin tuburi și ajutaje.

Pentru studiu am stabilit un model simplificat al unui detentor clasic, cu admisie în aval, în care au fost luați în considerare doar cei doi restrictori de presiune **A** și **B**, montați în serie (vezi Fig. 5.21). La varianta 1 restrictorul fix **B** este cilindric iar la varianta 2 restrictorul fix **B** este o duză conică. Secțiunea variabilă a restrictorului **A** este critică, debitul este și el critic.

După stabilirea condițiilor de curgere, am determinat prin calcul debitul masic critic furnizat de aparat, pentru cele două modele alese. Am calculat rezistența externă la respirație, indusă de către aparatul de respirat treapta a II-a, la două presiuni diferențiale $\Delta p = 5$ [cmH_2O] și $\Delta p = 6.5$ [cmH_2O].

Pentru același model, debitul masic a crescut la presiunea diferențială $\Delta p = 6.5$ [cmH_2O], presiune ce a determinat creșterea deschiderii variabile x a restrictorului **A**. Geometria

restrictorului fix **B** a influențat și ea debitul masic furnizat de aparat. Duza conică a îmbunătățit parametrii detentorului: debitul a crescut și rezistența externă a fost mai mică.

Pentru o analiză comparativă a rezultatelor teoretice, s-a trecut la a doua metodă de cercetare a curgerii de gaz respirator prin mecanismele pneumatice studiate: simularea CFD (Computational Fluid Dynamics) Ansys Fluent. Simularea CFD este o metodă modernă, care permite reluarea calculului pe mai multe modele de duze și cu schimbarea condițiilor de curgere, astfel încât să se ajungă la o formă ideală. Programul utilizat are ca rezultat o imagine vizuală mai largă a variației mai multor mărimi fizice: presiunea, densitatea, viteza, debitul masic.

Pentru ambele variante constructive se constată:

- Presiunea de la intrare trece, după restrictorul variabil **A**, din domeniul $9 \cdot 10^5$ [Pa] la valori de $\cong 10^6$ [Pa] și scade brusc la $2 \cdot 10^5$ [Pa], fenomen specific ajutorului Laval.
- Densitățile scad și ele cu presiunea, de la 8-10 [kg/m^3] după primul restrictor **A**, la $\cong 2$ [kg/m^3] la restrictorul fix **B**. De la ieșirea din restrictorul **B** către muștiuc, aerul se mai destinde până la valoarea densității la presiunea atmosferică (1.23 [kg/m^3]).
- Vitezele au valori supersonice la restrictorul **A** și subsonice (200-300 m/s) la ieșirea din restrictorul **B**.
- Debitele masice sunt mai mici cu 13-18% decât cele calculate teoretic, simularea numerică CFD redă mai fidel fenomenul, sesizând și alte pierderi.

Capitolul VI Validarea experimentală a calculului teoretic și simulării numerice a curgerii gazelor prin aparatele de respirat ale scafandrilor

Pentru obținerea unor rezultate viabile în timpul experimentelor de laborator, am studiat testerele profesionale și metodele standardizate de verificare a aparatelor de respirat subacvatice autonome și am ales un stand profesional Scuba Tools, achiziționat în cadrul unui proiect din Planul Sectorial de Cercetare Dezvoltare al Ministerului Apărării Naționale, la care am lucrat.

Măsurătorile debitelor volumice s-au făcut inițial pe modelul original, varianta 1, concomitent cu presiunile diferențiale corespunzătoare. Am păstrat valorile de debit pentru cele două presiuni diferențiale $\Delta p = 5$ [cmH_2O] și $\Delta p = 6.5$ [cmH_2O], în condițiile descrise în teză. După modificarea duzei restrictorului **B** din cilindric în conic, am reluat măsurătorile de debite în aceleași condiții. Am calculat debitele masice corespunzătoare și rezistențele externe, induse de aparat. Au fost comparate debitele masice și rezistențele externe rezultate prin cele trei metode: calcul teoretic, simulare numerică și verificare experimentală.

Concluziile referitoare la debitul masic:

- Valorile teoretice pentru debitul de aer au fost calculate în cazul gazului ideal, pentru un model simplificat, în care au fost luați în considerare doar doi restrictori de presiune: **A** și **B**, montați în serie.
- Suprafața primului limitator **A** este variabilă în timp, dar rămâne cea mai mică secțiune transversală a fluxului de aer, îndeplinind astfel condițiile pentru un debit critic.
- Curgerea este staționară, pentru aceiași parametri de mediu și ca urmare debitul masic de aer depinde doar de deschiderea x a restrictorului **A**, provocată de presiunea diferențială Δp .
- După ce s-au aplicat coeficienții de debit pentru pereți subțiri ($\alpha_1 = 0.7$ și $\alpha_2 = 0.8$) la debitele masice, cele mai mari valori rămân cele obținute prin calculul teoretic.
- Secțiunea conică a restrictorului **B** a determinat un debit puțin mai mare la toate cele trei metode (calcul teoretic, simulare numerică și verificare experimentală). Creșterea debitului masic de la varianta 1 la varianta 2 conică, este de 10 – 14%.
- Debitele masice teoretice sunt în toate cazurile cu până la 70-80% mai mari decât cele reale, determinate experimental, din cauza ipotezelor inițiale (gazul ideal, transformarea adiabată, modelul simplificat cu doar doi restrictori de presiune, etc.).
- Debitele masice rezultate prin simularea CFD ANSYS Fluent sunt cu 40-50% mai mari decât cele măsurate în condiții reale.

- Tehnicile performante utilizate în simularea numerică fac posibilă rafinarea calculelor și evidențierea influenței formei constructive a restrictorilor din circuitul gazului respirator prin aparat.

Concluziile referitoare la rezistența externă

- Rezistențele calculate teoretic și prin simulare numerică sunt mai mici decât cele rezultate din determinările experimentale.
- Pentru varianta 2 cu secțiunea conică a restrictorului B, rezistența este mai mică, pentru ambele valori ale presiunii diferențiale Δp .
- Toate cele trei metode: calcul teoretic, simulare numerică și verificare experimentală, evidențiază că duza conică a restrictorului fix B reduce rezistența R_E cu $\cong 10 - 15\%$ față de varianta 1 cu secțiunea cerc, prin reducerea treptată a vitezei.

Studiul a relevat o metodă practică de determinare a coeficienților reali de debit, la trecerea aerului prin restrictorii rezultați din orificiile minime în pereți subțiri, în cazul curgerii turbulente și cu diferențe mari de presiune, metodă descrisă în subcapitolul 6.3. În literatura de specialitate nu sunt indicați coeficienți de debit reali decât pentru rezistențe laminare sau pentru căderi mici de presiune $\approx 2[\text{bar}]$ [Petcu D., 1970]. Valorile reale ale coeficienților de debit sunt aproximativ aceleași pentru presiuni diferite, la aceeași formă a orificiului. Orificiul conic generează un coeficient de debit mai mare, deci un debit mai bun.

Capitolul VII Contribuțiile personale

1. Contribuțiile personale privind transferul de căldură prin corpul scafandrului

- O sinteză a abordărilor științifice, pe plan intern și internațional, referitoare la modelarea matematică și la validarea experimentală a cercetărilor privind bilanțul termic al scafandrului.
- Modelul cilindrului multistrat ales pentru corpul scafandrului, echipat în costum de neopren, cu un film de apă între piele și costum și care este scufundat în apă. Modelarea matematică a transferului de căldură, în timpul transportului de gaz respirator, de la rezervorul de stocare până la aparatul respirator uman, s-a făcut în mediul hiperbar umed.
- Determinarea a 2 valori ale căldurii specifice $c_c [J/kgK]$ a corpului scafandrului în imersie, echipat în costum de neopren, pentru 2 grosimi (5mm și 7mm) ale costumului. În literatura de specialitate găsim doar valoarea pentru corpul uman neechipat [Tarlochan F., 2005].
- Stabilirea ecuației diferențiale de bilanț termic al scafandrului în mediul hiperbar umed și rezolvarea ei. Ecuația cuprinde: fluxul metabolic produs de organism, fluxul de căldură conductiv și convectiv pierdut la nivelul pielii și fluxul de căldură pierdut la nivel respirator, pentru încălzirea și pentru umidificarea gazului.
- Rezolvarea teoretică a ecuației diferențiale de bilanț termic al scafandrului în mediul hiperbar umed, a condus la obținerea unei soluții originale a temperaturii $T_{(t)}$ (4.37).
- Validarea experimentală a ecuației diferențiale de bilanț termic al scafandrului în mediul hiperbar umed, prin utilizarea aerului atmosferic, în scufundări simulate unitare și în scufundări în saturatie, prin utilizarea amestecului respirator sintetic heliox, la Laboratorul hiperbar al Centrului de Scafandri, în apă caldă și în apă rece, cu subiecți având constituții fizice diferite și care au utilizat costume de scufundare de grosimi diferite.

Direcțiile de cercetare viitoare

- Studiul transferului termic prin corpul scafandrului în cazul utilizării altor amestecuri respiratorii (nitrox, hidrox, trimix).
- Evoluția ecuației de bilanț termic pentru alte tipuri de scufundări umede și uscate, de exemplu reacția organismului la presurizarea rapidă, cu viteze de 8-10 [m/min], față de viteza obișnuită de presurizare de 1[m/min].

CERCETĂRI PRIVIND TRANSFERUL DE GAZE ÎN TEHNOLOGIILE DE SCUFUNDARE

- Rafinarea modelului ales, respectiv cilindrul multistrat, prin împărțirea corpului în alte segmente geometrice (capul – sfere concentrice, trunchiul cilindru multistrat, membrele alți cilindri cu diametre mai mici).

2. Contribuțiile personale privind transferul de masă la curgerea gazului prin aparatele de respirat ale scafandrilor

- Calculul teoretic al parametrilor curgerii turbulente de gaz respirator prin mecanismele pneumatice studiate, cu focusarea pe debitul masic și pe rezistența externă indusă la inspirul din aparat.
- Modelarea geometrică a detentorului treapta a doua, cu mecanismele pneumatice alese pentru studiu, prin proiectarea asistată de calculator și simularea numerică a curgerii gazelor prin SCUBA (aparat de respirat autonom, în circuit deschis, pentru scafandri), utilizând CFD (Computational Fluid Dynamics) – ANSYS Fluent.
- Validarea experimentală a calculelor teoretice și a simulării numerice (cu CFD – ANSYS Fluent) a curgerii gazelor prin aparatele de respirat ale scafandrilor, prin utilizarea unui stand profesional, la Laboratorul hiperbar al Centrului de Scafandri și stabilirea unui plan de testare adaptat cerințelor de studiu.
- Soluția inovativă de reducere a rezistenței externe R_E la inspirul din aparat, prin modificarea geometrică a duzei restrictorului al doilea, fix (din circuitul detentorului treapta a doua), din cilindric în conic.
- Determinarea experimentală a coeficienților de debit reali prin orificiile în pereți subțiri, corespunzători curgerii potențiale a aerului, pentru căderi mari de presiune.

Direcțiile de cercetare viitoare

- Reluarea calculelor, simulărilor și a validărilor experimentale pentru anumite trepte de adâncime (presiuni de ieșire > 1 bar).
- Continuarea studiului, pentru obținerea unor coeficienți de debit reali mai mari, în cazurile studiate și pe alte modele de orificii în pereți subțiri.
- Abordarea cercetării prin modelarea curgerii, calculul teoretic, simularea numerică și validarea experimentală poate fi reluată și pe alte tipuri de reductoare utilizate în tehnologiile de scufundare, din cele descrise în Capitolul II, în vederea îmbunătățirii performanțelor lor.

Capitolul VIII Concluziile generale

1. Concluziile generale privind transferul de căldură prin corpul scafandrilor

Ipotezele adoptate: modelul cilindric cu straturi concentrice pentru corpul scafandrilor, în care rezistențele conductive ale straturilor de piele au valori dependente de constituția scafandrilor și de efort, radiația și căldura pierdută prin evaporare au fost neglijate.

Informația referitoare la bilanțul termic al scafandrilor îi este folositoare acestuia, deoarece își poate evalua propriile pierderi de căldură și în consecință poate alege atât costumul de protecție (grosimea lui, materialul), cât și timpul de scufundare, în funcție de următoarele variabile:

- temperatura lui inițială și cea a apei;
- presiunea apei, corespunzătoare adâncimii de scufundare;
- principalele trăsături fiziologice individuale;
- caracteristicile respiratorii ale scafandrilor (debit respirator ventilat);
- proprietățile gazului respirator.

Pierderile de căldură cele mai importante care trebuie luate în calcul, în cazul unui scafandru aflat în imersiune, sunt cele care au loc prin conducție și prin convecție. Orientativ ele pot fi comparate cu valorile recomandate de literatura de specialitate: [Hedge Alan, 2008]

- $\alpha_c \approx 230[W/m^2C]$ pentru staționarea în apă;
- $\alpha_c \approx 580[W/m^2C]$ pentru deplasarea în apă.

Modelul matematic propus (ecuația 3.132) a fost validat pentru scufundările în mediu hiperbar umed, până la 60m adâncime. El a fost aplicat utilizând atât aer cât și amestec respirator heliox 95/5, în aceleași condiții de temperatură a apei și de adâncime, pentru a compara rezultatele obținute în cele două cazuri. Variabila principală este timpul t [s].

Alt aspect care trebuie să fie subliniat este răcirea mai rapidă a corpului scafandruului la utilizarea amestecului sintetic heliox 95/5, din cauza căldurii specifice la presiune constantă a amestecului sintetic de aproape 5 ori mai mare decât a aerului. [Goldman, 1971]

În ambele tipuri de scufundări temperatura corpului scade abrupt în primele minute, dar în timp scăderea este mai lină, pentru ca după 2-3 ore temperatura să se stabilizeze. Diagramele au prezentat situațiile cele mai nefavorabile, cu scăderile cele mai rapide de temperatură a corpului. În practică scafandrii se mișcă, producția de căldură metabolică este mai ridicată și confortul termic asigurat este de durată mai mare. În funcție de planul de scufundare se poate aprecia temperatura $T(t)$ la care ajunge corpul scafandruului, după timpul de staționare t [s] propus și se poate aplica o strategie de protecție termică corespunzătoare.

Modul de îndeplinire al obiectivelor propuse

- A fost făcută modelarea matematică a transferului de căldură prin corpul scafandruului în mediul hiperbar umed.
- Modelul ales, cilindrul multistrat, este original și rezultatele obținute prin validarea experimentală confirmă valabilitatea studiului.
- Au fost stabilite mărimile fizice și ecuațiile de transfer termic care caracterizează fenomenul studiat.
- Ecuația de bilanț termic al scafandruului în mediul hiperbar umed (simulat și real) identificată este complexă și urmărește căile principale de pierdere a căldurii produse de organism (căldura metabolică):
 - a. conducție și convecție în contact cu apa rece;
 - b. încălzirea și umidificarea aerului prin respirație.
- Soluția ecuației de bilanț termic a fost validată experimental, prin scufundări simulate, cu două amestecuri respiratorii: aer și heliox.

2. Concluziile generale privind curgerea gazului prin aparatele de respirat ale scafandrilor

Curgerea aerului prin aparatul de respirat treapta a doua este staționară și turbulentă ($Re > 10000$), prin tuburi și ajutaje, cu doi restrictori principali: restrictorul variabil **A** (între scaun și pistonul cilindric) și restrictorul fix **B** (orificiul din pistonul cilindric) – Fig. 5.21. Rezolvarea reducerii rezistențelor externe s-a făcut prin alegerea unei variante constructive modificate a restrictorului fix **B** din cilindric în conic. Cele două modele au fost comparate teoretic, prin simulare și experimental. Ipotezele generale ale studiului sunt:

- Condițiile de curgere sunt staționare în secțiunea minimă de trecere a curentului de aer prin circuitul treptei a II-a.
- Aria critică de la restrictorul variabil **A** trebuie să fie mereu mai mică decât secțiunea finală de trecere a restrictorului fix **B**: $A_c < A_f$.
- Diametrul cilindric din restrictorul **A** este egal cu diametrul secțiunii de trecere din restrictorul **B**.
- Curgerea este staționară, pentru aceiași parametrii de mediu, deci debitul masic de aer depinde doar de deschiderea x a restrictorului **A**, provocată de presiunea diferențială Δp .

La calculul teoretic s-a constatat :

- Debitul masic furnizat de varianta 2 a aparatului (duză conică) este mai mare decât debitul masic furnizat de varianta 1 (duză cilindrică), pentru ambele valori ale depresiunii de inspir Δp .
- Calculele au fost făcute în cazul gazului ideal, pentru un model simplificat, în care au fost luați în considerare doar doi restrictori de presiune: **A** și **B**, montați în serie, de aici

diferențele mari de debit dintre valorile reale și cele teoretice sau cele rezultate prin simularea numerică.

- Rezistența externă la inspir este mai mică la varianta 2 decât la varianta 1, pentru ambele valori ale presiunii de inspir.
- Calculul teoretic și simularea numerică pentru determinarea debitelor și rezistențelor respiratorii externe au fost validate experimental.

Simularea numerică CFD ANSYS Fluent este o metodă modernă, care permite reluarea calculului pe mai multe modele de duze și cu schimbarea condițiilor de curgere, astfel încât să se ajungă la o formă ideală. Pentru stabilirea condițiilor geometrice favorabile reducerii rezistențelor respiratorii externe ale aparatelor de respirat, am utilizat toate cele 5 părți ale programului, respectiv: Geometria, Discretizarea, Setarea, Soluția și Rezultatele. Soluțiile calculate au fost cu atât mai bune, cu cât s-a făcut o discretizare mai fină și cu cât s-au dat mai multe iterații de calcul (vezi Fig. 5.30). În această diagramă se remarcă coeficienții k care se referă la variația energiei cinetice turbulente și ε care caracterizează rata de difuziune a turbulenței. Ei sunt dați de ecuațiile de mișcare specifice energiei cinetice turbulente. La mecanismul varianta 2 cu secțiunea conică a restrictorului fix B, valorile k și ε scad, indicând scăderea turbulenței. Odată stabilită geometria aparatului în program, prin simularea numerică se schimbă ușor condițiile inițiale și se face o verificare rapidă a rezultatelor, pentru a putea alege varianta optimă. Valorile obținute din simulare sunt similare cu cele calculate teoretic, doar că debitele sunt cu aproximativ 13% mai mici. Simularea numerică a reflectat mai bine condițiile reale de curgere a aerului respirator prin circuitele studiate, decât calculul teoretic.

Pentru validarea calculelor teoretice și a simulării numerice, a fost utilizat un Stand de testare detentoare, care este un complet profesional de la Scuba Tools. S-a constatat:

- Debitele cresc progresiv, până la atingerea valorii critice.
- La presiunea diferențială mai mare (6.5 cmH₂O) debitul este mai mare decât cel obținut pentru același aparat, la o presiune diferențială mai mică (5 cmH₂O).
- Pentru varianta 2 (duza conică) debitul este mai mare decât cel rezultat cu varianta 1 (duza cilindrică), la aceeași presiune diferențială.
- Rezistența externă la aceeași presiune de inspir, este redusă în cazul variantei 2 comparată cu varianta 1, pentru ambele valori ale presiunii diferențiale analizate.
- Debitele masice sunt semnificativ mai mici decât cele rezultate prin calculul teoretic și prin simularea numerică.

Modul de îndeplinire al obiectivelor propuse

- S-a stabilit un model simplificat al mecanismului pneumatic al reductorului de presiune treapta a II-a, al aparatului de respirat pentru scafandri, cu doi restrictori de presiune înseriați: unul variabil A (la pătrunderea aerului în pistonul cilindric) și altul fix B (la ieșirea aerului din pistonul cilindric) – vezi Fig.5.21.
- A fost modelată matematic curgerea gazelor respiratorii prin mecanismele pneumatice studiate și a fost făcut calculul teoretic al parametrilor curgerii potențiale prin aceste mecanisme.
- A fost comparat debitul masic de aer furnizat de aparatul de respirat, pentru două variante constructive ale secțiunii restrictorului fix B: cilindrică și conică, pentru 2 presiuni diferențiale $\Delta p = 5[cmH_2O]$ și $\Delta p = 6.5[cmH_2O]$.
- S-a făcut simularea CFD (Computational Fluid Dynamics) – ANSYS Fluent a curgerii turbulente de gaz respirator prin mecanismele pneumatice studiate, de unde au rezultat și debitele masice ale variantelor 1 și 2, pentru presiunea diferențială $\Delta p = 5[cmH_2O]$.
- Testarea executată la Laboratorul hiperbar pe cele două modele 1 și 2, a validat rezultatele obținute prin calculul teoretic și prin simularea CFD ANSYS Fluent.

Metoda de lucru pentru determinarea coeficienților de debit reali, rezultată din combinarea calculelor teoretice și a rezultatelor experimentale, metodă descrisă la sfârșitul subcapitolului 6.3., poate fi utilizată și în cazul altor aplicații, în care curgerea potențială de gaz

prin mecanismele pneumatice se face prin restrictori (orificii în pereți subțiri) care induc o cădere mare de presiune, cu un număr $Re > 10000$. Concluziile rezultate din studiile teoretice, din simularea numerică și din experimentele efectuate, permit fundamentarea unei metodologii de abordare a problemelor ingineresti privind curgerea gazelor prin aparatele de respirat ale scafandrilor.

În concluzie, obiectivele propuse la începutul lucrării, au fost îndeplinite:

- Am găsit o soluție originală pentru ecuația de bilanț termic al scafandrului.
- Am rezolvat problema reducerii rezistenței externe la inspir a detentorului, prin modificarea duzei restrictorului fix din cilindric în conic.

Rezultatul cercetărilor, respectiv soluția originală, validată, a ecuației bilanțului termic al scafandrului, permite o planificare inteligentă a scufundărilor, prin alegerea costumului de scufundare adecvat, a timpului de scufundare și a măsurilor de protecție termică, astfel încât să se evite disconfortul termic și în nici un caz să nu se ajungă la hipotermie (28°C).

Informațiile furnizate de prezenta lucrare de doctorat constituie un material bibliografic util pentru proiectarea și optimizarea reductoarelor de presiune studiate, pentru creșterea eficienței aparatelor de respirat ale scafandrilor.