



UNIVERSITATEA "LUCIAN BLAGA" din SIBIU
FACULTATEA DE INGINERIE "HERMANN OBERTH"

TEZĂ DE DOCTORAT

**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND
FILTRAREA GAZELOR NATURALE ÎN CÂMP ULTRASONIC**

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL CONTRIBUTIONS
CONCERNING THE FILTERING OF NATURAL GASES IN
ULTRASOUND FIELD**

Conducator științific:

Prof. Univ. Dr. Ing. OPREAN CONSTANTIN

Doctorand:
Ing. Turc Dumitru

SIBIU
2013

CUPRINS

INTRODUCERE	5
CAPITOLUL 1	
GAZELE NATURALE ȘI CALITATEA ACESTORA. NECESITATEA FOLOSIRII ȘI PURIFICĂRII ACESTORA	9
1.1. GENERALITĂȚI	9
1.2. GAZELE NATURALE ȘI CALITATEA ACESTORA	9
1.3. CONCLUZII	13
CAPITOLUL 2	
STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR PRIVIND FILTRAREA GAZELOR NATURALE	14
2.1. GENERALITĂȚI	14
2.2. IMPURITĂȚILE SOLIDE ȘI RETINEREA LOR	16
2.3. SEPARAREA IMPURITĂȚILOR	29
2.3.1. Separarea impurităților solide și lichide din gaze. Instalații de separare	29
2.3.1.1. Principiul de funcționare a separatoarelor utilizate, în prezent în industria gazului metan	30
2.3.1.2. Separatoarele hidraulice	34
2.3.1.3. Separarea lichidului și particulelor solide din gaze, în conductele colectoare și de transport	36
2.3.1.4. Separarea lichidului și particulelor solide din gaze sub acțiunea forței centrifuge. Separatorul cu ciclon	37
2.3.1.5. Separarea lichidului și particulelor solide din gaze sub acțiunea combinată a forțelor centrifuge și gravitaționale. Separatorul orizontal cu țevă spirală	39
2.3.1.6. Separatorul orizontal îngropat (acumulatorul subteran de lichide)	40
2.3.1.7. Separatorul orizontal cu paravan de ceață	41
2.3.1.8. Separatorul vertical cu paravan de ceață din inele ceramice	41
2.3.2. Unele considerații privind îndepărtarea prafului prin filtrare	41
2.3.2.1. Decantarea	42
2.3.2.2. Separarea prin reducerea bruscă a vitezei	42
2.3.2.3. Eliminarea prafului prin spălare	44
2.3.2.4. Filtrarea în strat poros (totală)	45
2.3.2.5. Filtrele electrostatice	49
2.3.2.6. Separarea particulelor prin coalescență	51
2.4. COMPARAȚIA ÎNTRE SISTEMELE DE FILTRARE (DESPRĂFUIRE)	52
2.5. EXPLOATAREA LINILOR DE FILTRARE	53
2.5.1. Generalități	53
2.5.2. Exploatarea în regim de avarie a unei linii de filtrare	54
2.5.3. Studiu de caz- exploatarea în regim de avarie a filtrelor conice	54
2.6. ÎNTREȚINEREA FILTRELOR DIN CADRUL S.R.M.	56
2.7. VERIFICAREA FILTRELOR – CRITERII DE VERIFICARE	57
2.8. STUDIUL DE CAZ - ÎNTREȚINEREA FILTRELOR CONICE	58
2.9. CONCLUZII	59
CAPITOLUL 3	
CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA FILTRĂRII GAZELOR NATURALE FOLOSIND CÂMPUL ULTRASONIC	61
3.1. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND FILTRAREA CLASICĂ	61
3.2. CONTRIBUTII TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND CERINTELE DE PROIECTARE ALE UNEI INSTALATII DE FILTRARE	62

3.2.1. Contributii privind tipurile de filtre de gaze naturale cele mai utilizate	63
3.2.2. Calculul căderii de presiune pe filtre	64
3.2.3. Contribuții privind calculul vitezei de antrenare a prafului prin filtre și depunerea prafului	67
3.3. CONTRIBUTII TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND POSIBILITATILE DE UTILIZARE A UNDELOR ULTRASONICE IN PROCESUL DE FILTRARE A GAZELOR NATURALE	76
3.3.1. Principalele fenomene și efecte ce apar la propagarea undelor ultrasonice într-un mediu de gaze naturale	77
3.3.1.1. <i>Viteza de propagare a undelor ultrasonice în gazele naturale</i>	77
3.3.1.2. <i>Reflexia si refractia undelor plane</i>	81
3.3.1.3. <i>Undele staționare</i>	85
3.3.1.4. <i>Difracția și difuzia undelor ultraacustice</i>	87
3.3.1.5. <i>Atenuarea energiei ultraacustice</i>	89
3.4. CONTRIBUȚII ORIGINALE PRIVIND CONTRIBUȚIA ȘI PROIECTAREA UNOR FILTRE ULTRASONICE CARE CONDUC LA ÎMBUNĂȚĂȚIREA PROCESELOR DE FILTRARE A GAZELOR NATURALE	93
3.4.1. Elemente de proiectare și construcție pentru un filtru ciclon ultrasonic	94
3.4.2. Elemente de proiectare și construcție pentru un filtru vertical de gaze cu ultrasunete	100
3.4.3. Elemente de proiectare și construcție pentru un filtru conic orizontal ultrasonic	104
3.4.4. Elemente de calcul, construcție și proiectare pentru un filtru final de gaze cu ultrasunete	106
3.4.5. Alte tipuri de filtre la care se pot adapta sisteme ultraacustice corespunzătoare	111
3.5. CONCLUZII	115

CAPITOLUL 4

CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND CALCULUL ȘI PROIECTAREA SISTEMELOR ULTRAACUSTICE FOLOSITE LA CONSTRUCȚIA FILTRELOR ȘI SEPARATOARELOR PENTRU GAZE NATURALE	117
4.1. CONTRIBUȚII PRIVIND TIPURILE DE TRANSDUCTOARE ULTRASONICE, COMPUNEREA ȘI ELEMENTELE CONSTRUCTIVE SPECIFICE UTILIZĂRII LOR LA FILTRAREA ȘI PURIFICAREA GAZELOR NATURALE	117
4.2. MATERIALE FOLOSITE LA CONSTRUCTIA TRANSDUCTORILOR ULTRASONICI	118
4.3. CONTRIBUTII TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND ELEMENTELE DE CALCUL SI PROIECTARE A TRANSDUCTOARELOR MAGNETOSTRICTIVE FOLOSITE LA CONSTRUCTIA SISTEMELOR ULTRAACUSTICE	122
4.3.1. Transductoarele tip bară	122
4.3.2. Transductoare cilindrice	123
4.3.3. Parametrii de funcționare ai transductoarelor magnetostrictive	124
4.3.3.1. <i>Transductorul magnetostrictiv cilindric</i>	124
4.3.3.2. <i>Particularitățile fabricării transductoarelor magnetostrictive</i>	128
4.4. CONTRIBUTII TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND ELEMENTELE DE CALCUL SI PROIECTARE A TRANSDUCTOARELOR PIEZOCERAMICE COMPUSE FOLOSITE LA CONSTRUCTIA SISTEMELOR ULTRAACUSTICE DIN COMPONENTA FILTRELOR ULTRASONICE	129
4.4.1. Transductoare compuse polarizate mecanic	132
4.4.2. Transductoarele piezoceramice simple și transductoarele piezoceramice compuse nepolarizate mecanice	136
4.5. CONTRIBUTII PRIVIND ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A UNUI SISTEM ULTRAACUSTIC FOLOSIT LA FILTRAREA CU ULTRASUNETE A GAZELOR NATURALE	149

4.5.1. Consideratii teoretice	149
4.5.2. Modelarea cu elemente finite a piezoelementelor	151
4.5.3. Modelarea cu elemente finite a ansamblului piezoceramic	156
4.5.4. Modelarea cu elemente finite a sistemului ultraacustic	160
4.6. CONCLUZII	163

CAPITOLUL 5

CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND CALCULUL CONSTRUCȚIA ȘI EXECUȚIA CONCENTRATOARELOR DE ENERGIE ULTRASONICĂ FOLOSITE LA FILTRAREA CU ULTRASUNETE A GAZELOR NATURALE

5.1. GENERALITATI	165
5.2. CONTRIBUTII PRIVIND METODICA DE CALCUL SI CONSTRUCTIE A CONCENTRATOARELE DE ENERGIE ULTRASONICA FOLOSITE IN CONSTRUCTIA FILTRELOR DE GAZE NATURALE	165
5.3. CONTRIBUTII EXPERIMENTALE PRIVIND CALCULUL SI CONSTRUCTIA CONCENTRATOARELOR DE ENERGIE ULTRASONICA FOLOSITE LA FILTRAREA SI PURIFICAREA GAZELOR NATURALE	172
5.4. METODE DE PROIECTARE RAPIDA A CONCENTRATOARELOR DE ENERGIE ULTRASONICA	178
5.5. CONTRIBUTII TEORETICE SI EXPERIMENTALE PRIVIND ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A UNOR CONCENTRATOARE ULTRASONICE FOLOSITE LA FILTRAREA CU ULTRASUNETE A GAZELOR NATURALE	191
5.5.1. Modelarea cu elemente finite a ansamblului element intermediar-concentrator	191
5.6. VALORI EXPERIMENTALE	199
5.7. CONCLUZII	201

CAPITOLUL 6

CONCLUZII FINALE CONTRIBUTII ORIGINALE. TENDINTE SI PERSPECTIVE ALE CERCETARII IN DOMENIU

6.1. CONCLUZII FINALE	202
6.2. CONTRIBUTII ORIGINALE	206
6.2.1. Contribuții originale în domeniul cercetărilor teoretice	207
6.2.2. Contribuții originale în domeniul cercetărilor experimentale	208
6.3. TENDINTE SI PERSPECTIVE ALE CERCETARII IN DOMENIU	208

BIBLIOGRAFIE

209

INTRODUCERE

Omenirea este din ce în ce mai energofagă și materiofagă și cu un impact asupra mediului din ce în ce mai periculos, de aceea, preocuparea oricărui cercetător este găsirea de soluții privind economisirea de energie și materiale și reducerea impactului asupra mediului și a riscului tehnologic, adică dezvoltarea durabilă.

Utilizarea eficientă a gazelor naturale în toate domeniile unei economii presupune extragerea, transportul, purificarea, filtrarea, dozarea și exploatarea acestora în condiții de risc tehnologic minim, de asigurare a calității acestora corespunzătoare cu domeniul de utilizare și de sporire a gradului de siguranță.

Gazele naturale sunt amestecuri de gaze cu compoziția variabilă în funcție de depozitul subteran din care sunt extrase, în care componenta principală, cu o pondere procentuală de peste 90% este metanul (CH_4), iar celelalte componente sunt hidrocarburi gazoase precum: etanul (C_2H_6), propanul (C_3H_8), butanul (C_4H_{10}) și alte gaze: azotul, hidrogenul, oxigenul, argonul, heliul, dioxidul de carbon (CO_2), oxidul de carbon (CO), hidrogenul sulfurat (H_2S), compușii azotului (NO_x), compușii sulfului (SO_x), compuși organici volatili (COV), amoniac (NH_3). Gazele naturale mai conțin o cantitate însemnată de microparticule și particule de praf, de metale grele sau ușoare, de rocă și alte substanțe de diferite naturi.

Periculozitatea gazelor naturale este strict legată de compoziția lor chimică și, ca urmare, se poate identifica cu periculozitatea metanului, influențată uneori semnificativ, de prezența celorlalte componente.

Gazele naturale sunt transportate de la locul de exploatare la locul de utilizare printr-un sistem de conducte ce alcătuiesc Sistemul National de Transport al Gazelor Naturale – SNTGN.

SNTGN este alcătuit în prezent din 13110 km de conducte, magistrale de transport și racorduri de alimentare, acest sistem fiind prevăzut cu 21 stații de comandă a vanelor și/sau noduri tehnologice, 961 stații de reglare – măsurare și/sau măsurare a gazelor prelucrate prin import, 6 stații de măsurare amplasate pe conductele de tranzit, 6 stații de comprimare a gazelor, 857 stații de protecție catodică a conductelor, 575 instalații de odorizare a gazelor și milioane de consumatori.

SNTGN cuprinde trei sisteme de conducte: sistemul de conducte magistrale, proiectat pentru presiuni mari ($p \geq 40$ bari); sistemul de conducte regionale, proiectat pentru presiuni medii ($6 \text{ bari} \leq p < 40$ bari) și sistemul de conducte zonale, proiectat pentru presiuni mici ($p < 4$ bar).

În funcție de destinația ulterioară a gazelor, pe întreg traseul acestora ele sunt expuse unor operații importante de purificare și filtrare, operații extrem de importante în tehnologia de prelucrare și utilizare a gazelor naturale.

Având în vedere importanța operațiilor de filtrare pe întreg traseul de transport al gazelor naturale de la punctul de extracție la utilizatorul final, cercetările cuprinse în teza de doctorat și-au propus realizarea următoarelor obiective:

- ✓ sistematizarea cercetărilor privind filtrarea gazelor;
- ✓ stabilirea tehnologiei optime de filtrare funcție de concentrația de particule și microparticule, dimensiunile și forma particulelor, gradul necesar de reținere a particulelor, presiunea și debitul gazului natural, caracteristicile fizice și chimice ale prafului, pierderea de presiune, cerințele utilizatorului și metoda optimă de îndepărtare a particulelor precum și costurile anuale de întreținere;
- ✓ sistematizarea cercetărilor privind utilizarea ultrasunetelor în procesul de filtrare;
- ✓ stabilirea elementelor de calcul și proiectare a unor sisteme ultraacustice și a unor concentratoare ultrasonice folosite la filtrarea gazelor
- ✓ proiectarea și construcția unor filtre ultrasonice.

Pentru a rezolva aceste obiective se va face mai întâi o analiză amănunțită a compoziției gazelor naturale și a cerințelor utilizatorului final pentru a vedea treptele și etapele în care

trebuie intervenit pentru a obține calitatea cerută pentru etapa respectivă. Se vor analiza apoi principalele fenomene ce apar la propagarea ultrasunetelor prin gazele naturale și posibilitățile de utilizare a acestora în procesul de filtrare și de creștere a performanțelor unui filtru sau a unui separator.

Se vor proiecta câteva modele de filtre ultrasonice și se va insista pe sistemele ultraacustice folosite (elemente de calcul, construcție și proiectare) și pe concentratoarele ultrasonice folosite fie ca parte activă a filtrelor, fie ca element de creștere a eficienței filtrului respectiv. Se va face modelarea procesului folosind MEF și se vor ridica diagrame de variație a amplitudinii vitezei particulelor în întregul sistem ultraacustic.

Teza de doctorat cuprinde 6 capitole, redactate pe 208 pagini, conținând 147 figuri, 44 tabele, 382 relații matematice. Structura și obiectivele tezei de doctorat sunt prezentate în figura 0.1.

Pentru documentare, autorul a folosit 251 titluri de cărți, articole de specialitate, reviste de specialitate, brevete de invenție, contracte de cercetare și pagini web, iar bibliografia conține un număr de 4 lucrări științifice publicate ale autorului tezei de doctorat.

În **“Introducere”**, autorul prezintă importanța cercetărilor cuprinse în teza de doctorat, necesitatea și oportunitatea acestor cercetări, obiectivele propuse a fi realizate și metoda cercetării.

În capitolul 1, intitulat **“Gazele naturale și calitatea acestora. Necesitatea filtrării gazelor”**, autorul pornește de la compoziția gazelor naturale, utilizările acestora și arată necesitatea filtrării și purificării acestora.

În capitolul 2, intitulat **“Stadiul actual al cercetărilor privind filtrarea gazelor naturale”**, autorul pornește de la natura particulelor solide ce trebuie reținute, mărimea acestora și analizează principalele metode de filtrare și echipamentele corespunzătoare cu avantajele și dezavantajele lor (filtrele mecanice, camera de decantare, separatorul cu impact, filtrul ciclone și multi-ciclone, electrofiltrele uscate și umede, scrubere umede și uscate, filtre cu pat filtrant etc.). Face o comparație între diferitele sisteme de reținere a particulelor solide funcție de mărimea acestora, eficiența reținerii, pierderea de presiune și costul anual de întreținere.

În capitolul 3, intitulat **“Contribuții teoretice și experimentale privind îmbunătățirea filtrării gazelor folosind ultrasunetele”**, se pleacă de la principalele fenomene ce apar ca urmare a propagării undelor ultrasonice în gazele naturale de filtrat și propune o serie de soluții constructive pentru diferite filtre ultrasonice cu avantajele și dezavantajele lor.

În capitolul 4, intitulat **“Contribuții teoretice și experimentale privind construcția stemelor ultraacustice folosite la filtrarea gazelor”**, se prezintă cerințele tehnologice, mecanice și acustice ce trebuie îndeplinite de un astfel de sistem și se analizează două tipuri de sisteme ultraacustice: magnetostrictive și piezoceramice. Pentru fiecare tip de sistem ultraacustic sunt prezentate elementele de calcul și proiectare așa fel încât sistemul ultraacustic să lucreze în regim de rezonanță.

În capitolul 5, intitulat **“Contribuții teoretice și experimentale privind calculul și proiectarea concentratoarelor ultrasonice folosite în construcția filtrelor gazelor naturale”**, se prezintă principalele elemente de calcul și proiectare pentru patru tipuri de concentratoare de energie ultrasonică și posibilitățile utilizării acestora. Se face și modelarea folosind MEF pentru a găsi aprioric diagrama de variație a amplitudinii vitezei particulei în lungul sistemului ultraacustic și mai ales în partea finală, direct legată la filtru.

În capitolul 6, intitulat **“Concluzii finale. Contribuții originale. Tendințe și perspective ale cercetării în domeniu”**, se prezintă concluziile desprinse pe parcursul cercetărilor întreprinse în domeniul filtrării gazelor, contribuțiile personale, mai ales în domeniul filtrării gazelor în câmp ultrasonic și câteva tendințe ce se manifestă pentru viitor în domeniul cercetărilor privind filtrarea gazelor în câmp ultrasonic.

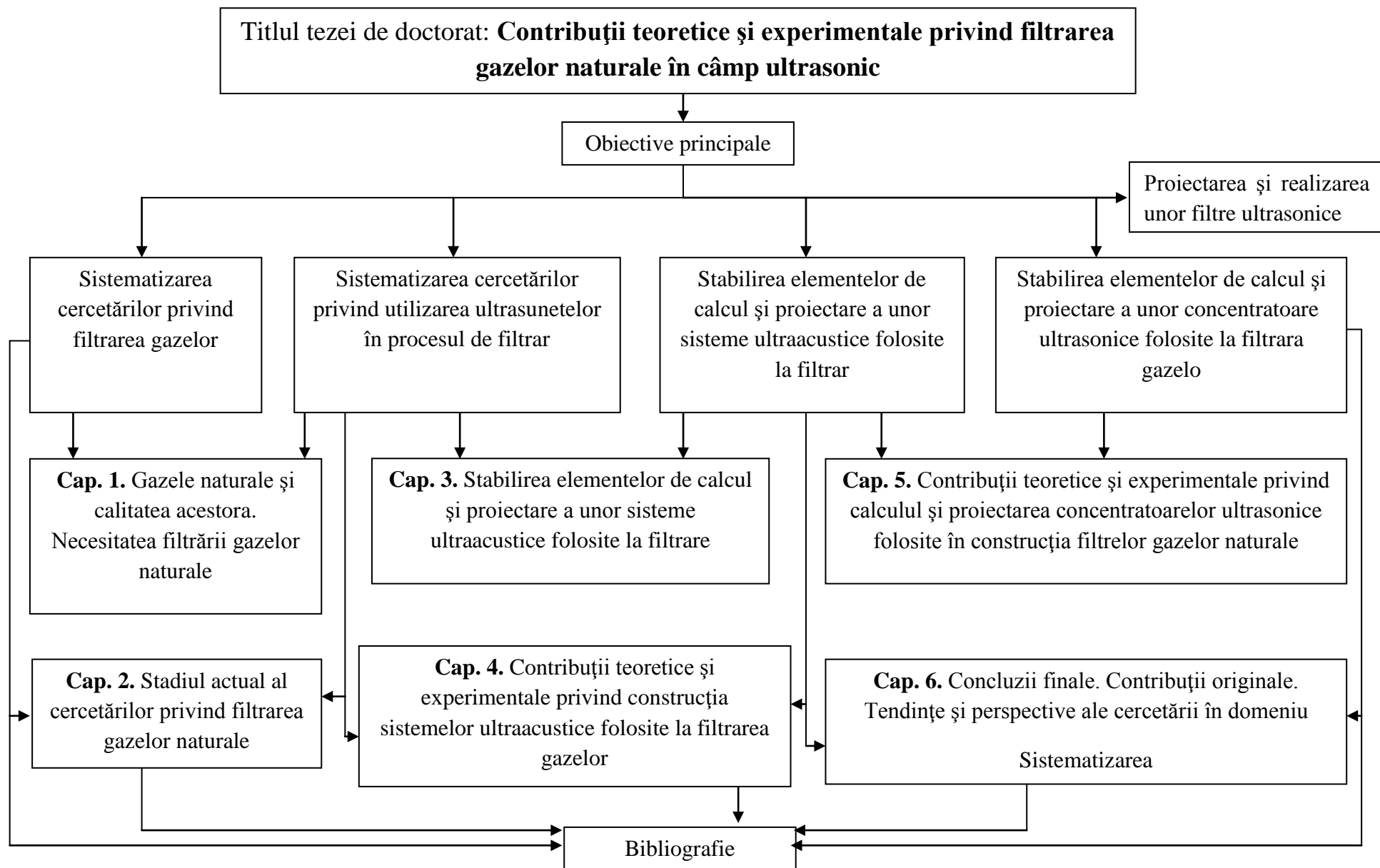


Fig. 0.1. Structura tezei de doctorat

Realizarea acestei teze de doctorat este urmarea unei activități de cercetare intensă desfășurată în ultimii 10 ani atât în întreprinderile de profil în care am lucrat și lucrez cât și în cadrul unor laboratoare de cercetare din Universitatea Lucian Blaga din Sibiu și Universitatea Politehnica din București, Catedra Tehnologia Materialelor și Sudare. De aceea țin să mulțumesc tuturor colegilor mei, care m-au ajutat de fiecare dată când le-am cerut ajutorul, colectivului catedrei TMS și conducerii Facultății de Inginerie Mecanică pentru încrederea și ajutorul acordat.

Îmi exprim profunda recunoștință și considerație față de conducătorul științific al acestei lucrări – Prof. Univ. Dr. Ing. Constantin OPREAN – pentru îndrumarea de înalt profesionalism acordată pe durata efectuării cercetărilor cuprinse în teză, pentru răbdarea cu care m-a îndrumat, pentru înțelegerea prietenească pe care mi-a arătat-o, pentru entuziasmul pe care mi l-a insuflat la fiecare întâlnire și pentru încurajarea permanentă care m-a făcut să nu renunț la realizarea acestei lucrări.

Nu în ultimul rând, mulțumesc familiei mele pentru susținerea morală, răbdarea și înțelegerea manifestată în toți acești ani de muncă.

CAPITOLUL I

GAZELE NATURALE ȘI CALITATEA ACESTORA. NECESITATEA FOLOSIRII ȘI PURIFICĂRII ACESTORA

1.1. GENERALITĂȚI

Gazele naturale (g.n.) sunt amestecuri de gaze cu compoziție variabilă, în funcție de depozitul subteran din care sunt extrase, în care componenta principală (de peste 90%) este metanul CH_4 , iar celelalte componente sunt hidrocarburile gazoase precum etanul (C_2H_6), propanul (C_3H_8), butanul (C_4H_{10}) și altele. Pe lângă aceste hidrocarburi gazoase, gazele naturale mai conțin și alte gaze precum azotul, hidrogenul, oxigenul, argonul, heliul, dioxidul de carbon, hidrogenul sulfurat, compuși organici volatili, oxizi ai azotului, oxizi ai sulfului și alte categorii de gaze în proporții mai mici.

Pe baza analizei mai multor buletine de analiză cromatografică a rezultat că gazele naturale transportate pe conductele sistemului național de transport (SNTGN) au compoziția chimică prezentată în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Compoziția chimică a gazelor naturale transportate pe conductele SNTGN

Nr. Crt.	Componenta	Conținutul exprimat în %			
		% volumice	% molare	% masice	$\text{g/m}^3\text{N}$
1	Metan	97...99	97...99	95...97	690...710
2	Etan	0,4...1,0	0,4...1,0	0,7...0,2	5...14
3	Propan	0,15...0,35	0,15...0,35	0,45...1,00	2,5...7,5
4	Butani	0,06...0,15	0,06...0,15	0,25...0,50	1,8...3,5
5	Hexani	0,03...0,08	0,03...0,08	0,15...0,50	1,2...3,5
6	Azot	0,30...0,80	0,30...0,80	0,5...1,3	3,5...3,2
7	Dioxidul de carbon	0,1...0,15	0,1...0,15	0,30...0,45	2,2...3,2
8	Hidrogenul sulfurat	0,15...0,35	0,15...0,35	0,30...0,65	2,1...3,5

1.2. GAZELE NATURALE ȘI CALITATEA ACESTORA

Gazele naturale antrenează în faza de extracție elemente din noroiul de foraj (barită) și particule neconsolidate din roca magazin. De aceea, o primă filtrare mecanică trebuie să se realizeze la instalația sondei sau în instalațiile de suprafață din câmpurile de producție, înainte de a ajunge în sistemul de conducte al SNTGN.

Particulele solide conținute în gazele naturale pot avea următoarea proveniență:

- ✓ nisip sau sfărâmaturi de rocă antrenate în strat în timpul erupției;
- ✓ nisip sau praf atmosferic depuse în diferite faze ale extracției și reparații ale conductelor;
- ✓ produși de coroziune (oxizi, sulfuri etc.) sau de eroziune, din timpul exploatării.

De exemplu, pe baza analizei mai multor mostre de probă dintr-o conductă magistrală de transport gaze naturale, la probele de sită fină (0,06...1,0mm) la unii consumatori, din analiza granulometrică a rezultat următoarea compoziție a impurităților solide (tab. 1.2).

Tabelul 1.2. Compoziția în impurități solide

Nr.	Impurități	UM	Sită 1 mm
1	SiO ₂	%	25...28
2	MnO	%	1,6...2,4
3	TiO	%	0,3...0,4
4	Al ₂ O ₃	%	1,9...3,9
5	CaO	%	2,4...5
6	MgO	%	1...2
7	Fe ₂ O ₃	%	52...54
8	Diverse	%	15,8...40,3
	Total	%	100...100

Cantitatea de impurități solide conținute în gazele naturale sunt variabile, în funcție de drenarea sondelor, execuția conductelor, durata de exploatare a acestora, agresivitatea gazelor etc.

Totuși, în permanență impuritățile solide sunt prezente în cantități relativ mari (STAS 3317, prevede 0,05 g/m³N conținut maxim, ceea ce înseamnă la 1 milion Nm³ poate să existe 50 kg impurități solide.

Impuritățile solide din gazele naturale provoacă sablarea (erodarea) conductelor și a instalațiilor tehnologice, uzarea prematură a ansamblului piston-cilindru și a rotoarelor compresoarelor de gaze, deranjarea proceselor tehnologice ale consumatorilor, prelucrarea lor în diverse procese chimice, scăderea eficienței transportării, creșterea riscului tehnologic atașat transportului pe conductele de g.n.

Periculozitatea gazelor naturale este strict determinată de compoziția lor chimică, dată mai ales de periculozitatea metanului, dar și de prezența celorlalte componente, inclusiv a componentelor solide.

În consecință se poate considera că periculozitatea gazelor naturale poate fi considerată din următoarele puncte de vedere:

- gazele naturale evacuate sau scăpate (intenționat sau accidental) în mediul înconjurător contribuie la poluarea aerului, deoarece metanul are un potențial radiativ pozitiv, contribuie la intensificarea efectului de seră și participă astfel la procesele nedorite de încălzire globală și modificare climatică;

- gazele naturale sunt considerate substanțe netoxice, dar cu potențial asfixiant (American Conference of Governmental Industrial Hygienists – ACGIH a caracterizat hidrocarburile ușoare prezente în gazele naturale ca fiind asfixiante simple, fără alte efecte fiziologice semnificative. Totuși, limitele expunerii ocupaționale pentru hidrocarburile ușoare prezente în gazele naturale sunt în prezent stabilite pe baza următoarelor reguli: concentrația maximă admisă CMA=0,1 din limita inferioară de explozie; concentrația volumică maximă pentru o

expunere de 15 minute: 1500 ppm; concentrația volumică maximă admisă pentru o expunere de 8 ore: 1000 ppm.). Toate precizările de mai sus se modifică substanțial dacă gazele naturale conțin și hidrogen sulfurat, substanță foarte toxică și potențial letal care modifică esențial caracterizarea toxicologică a g.n.;

- gazele naturale aparțin categoriei substanțelor cu inflamabilitate ridicată. Caracteristicile care descriu inflamabilitatea gazelor naturale sunt prezentate în tabelul 1.3.

Tabelul 1.3. *Caracteristicile principale privind inflamabilitatea gazelor naturale*

Caracteristica	UM	Condițiile	Valoarea
Punct de inflamare	$^{\circ}\text{C}$	1,013 bar	-188
Compoziție stoechiometrică	%vol	CH4 în aer	9,5
	g/m ³	CH4 în aer	68,8
Energia minimă de aprindere	mJ	CH4 în aer	3,0
Temperatura de autoaprindere	$^{\circ}\text{C}$	CH4 în aer	540
Limita inferioară de explozie – LEL	%vol	1,013 bar și 25 $^{\circ}\text{C}$	5
Limita superioară de explozie – UEL	%vol	1,013 bar și 25 $^{\circ}\text{C}$	15
Căldura de reacție	MJ/m ³	Compoziție stoechiometrică	3,4
Căldura de combustie	MJ/kg	-	50
Temperatura flăcării adiabatică	$^{\circ}\text{C}$	-	2148
Presiunea de combustie la volum constant	bar	Condițiile inițiale de amestec 1,013 bar și 25 $^{\circ}\text{C}$	8,94
Viteza flăcării laminare	m/s	-	3,5

Datorită inflamabilității ridicate, adică a capacității de a se aprinde în amestec cu oxigenul sau aerul, în prezența unei surse de aprindere, gazele naturale pot genera explozii cu consecințe dintre cele mai grave. Inflamabilitatea și potențialul exploziv în amestec cu oxigenul sau aerul reprezintă cele mai importante caracteristici de pericolozitate ale gazelor naturale. Ca urmare, scăpările de gaze din orice element al SNTGN reprezintă un posibil potențial major care poate conduce la accidente tehnice cu consecințe grave.

Acest aspect este evidențiat de schema din figura 1.1. care indică principalele evenimente care pot fi cauzate de producerea scăpărilor de fluide și de gaze din sistemul de conducte de transport.

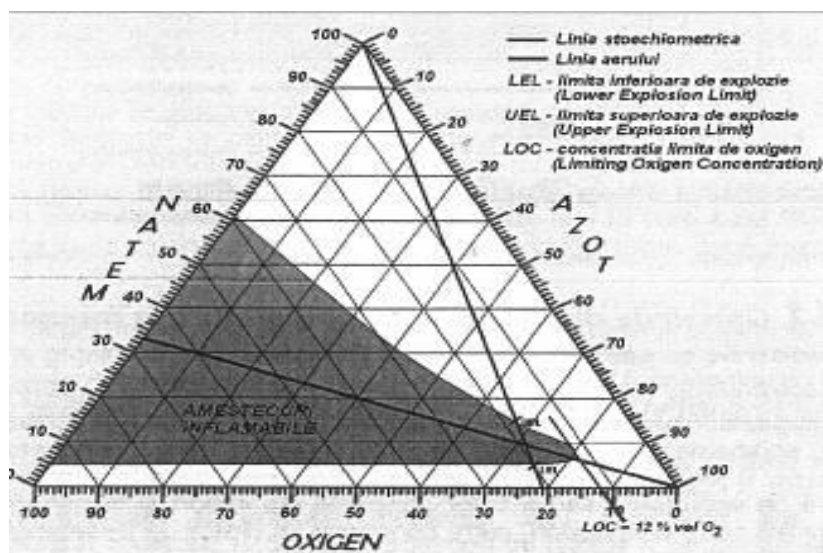


Fig. 1.1. Limitele de inflamabilitate/explozie ale amestecurilor de metan și oxigen (aer)

Sistemul național de transport al gazelor naturale este constituit în prezent din 13110 km de conducte magistrale de transport și racorduri de alimentare, fiind prevăzut cu 21 stații de comandă a vanelor și/sau noduri tehnologice, 961 stații de reglare-măsurare și/sau măsurare a gazelor prelucrate din exploatarea națională, 3 stații de măsurare a gazelor preluate din import, 6 stații de măsurare amplasate pe conductele de tranzit, 6 stații de comprimare a gazelor, 857 stații de protecție catodică a conductelor, 575 instalații de odorizare a gazelor și milioane de utilizatori.

Pentru o bună funcționare a întregului SNTGN, evitarea apariției accidentelor, pentru reducerea riscului tehnic atașat transportului și a distribuției gazelor naturale, pentru o utilizare și prelucrare eficientă, gazele naturale trebuie filtrate mai întâi și apoi purificate, sau o combinație logică dintre aceste operații cerută de procesul tehnologic.

Filtrarea este operația prin care se rețin substanțele solide transportate de curentul de gaze naturale de la locul de extracție până la locul de utilizare. Substanțele solide existente în curentul de gaze naturale nu sunt nici de aceeași mărime sau formă și nici nu au nici aceeași compoziție chimică. Cele mai mici particule suspendate au o mărime de aproximativ 0,002 μm (adică 2 nm) iar cele mai mari pot ajunge la ordinul milimetrilor sau chiar zecilor de milimetri. Deși puține dintre particulele solide au formă sferică, în continuare, în toate demonstrațiile făcute, acestea se vor considera sferice, diametrul lor fiind principala caracteristică.

Din acest punct de vedere calitativ, particulele individuale sunt clasificate în funcție de diametrul lor în grosolane (dacă diametrul lor este mai mare de 2,5 μm) și fine (dacă diametrul lor este mai mic de 2,5 μm). Particulele fine reprezintă o problemă tehnică destul de complicată privind reținerea lor deoarece rămân suspendate în gaz un timp aproape nedeterminat.

Particulele foarte mici se aglomerează, pentru a forma particule mai mari, de obicei tot din categoria celor de mărime fină și reprezintă aceeași problemă greu de rezolvat în anumite situații.

Uneori, aceste particule fine pot fi și periculoase, deoarece pot conține compuși toxici, cum ar fi metalele grele (mercurul) sau compușii lor cu anumiți poluanți organici persistenti (hidrocarburi aromatice policiclice), în funcție de granulația particulelor. Aceasta se datorează faptul că, mulți compuși toxici, aflați în stare de vapori în gazele naturale condensează pe particulele fine de praf, deja prezente.

De aceea, pentru reținerea impurităților solide din gazele naturale, se utilizează filtre separatoare de praf, care după principiu de funcționare pot fi:

- ✓ separatoare gravimetrice;
- ✓ separatoare centrifugale;
- ✓ separatoare prin reducerea bruscă a vitezei;
- ✓ separatoare prin spălare;
- ✓ filtre;
- ✓ separatoare în câmp electric;
- ✓ separatoare prin coalescență;
- ✓ separatoare speciale.

Pe lângă particulele solide de diferite forme și dimensiuni, gazele naturale mai conțin o serie de gaze ca hidrogenul sulfurat, amoniacul, dioxidul de carbon, mercaptanii, dioxidul de sulf și altele, care pentru evitarea poluării atmosferei, din necesitatea realizării de purități înaintate pentru unii reactanți și pentru recuperarea unor compuși valoroși necesită o purificare corespunzătoare.

Procedeele uzuale de purificare a gazele naturale pot avea la bază următoarele procese sau operații unitare:

- ✓ absorbția într-un lichid numit absorbant;
- ✓ absorbția pe un material solid numit absorbant;
- ✓ fracționarea;
- ✓ cristalizarea și filtrarea;
- ✓ conversia chimică a impurităților;
- ✓ procedee speciale.

Prin urmare, pentru o utilizare eficientă, o exploatare fără risc și o mentenanță ridicată a întregului sistem de transport și distribuție a gazele naturale este necesară purificarea și filtrarea gazelor la calitatea cerută de consumatorul final.

1.3. CONCLUZII

- Gazele naturale sunt amestecuri de gaze cu compoziția chimică variabilă, în funcție de depozitul subteran din care sunt extrase, în care componenta principală (de peste 90%) este metanul (CH_4), iar celelalte componente sunt hidrocarburi gazoase (etanul, propanul, butanul și altele);

- Pe lângă hidrocarburile gazoase, gazele naturale mai conțin și alte gaze precum: azotul, hidrogenul, oxigenul, argonul, heliul, dioxidul de carbon, hidrogenul sulfurat, compuși organici volatili, oxizi ai azotului, oxizi ai sulfului și alte gaze în proporții mai mici;

- În faza de extracție, gazele naturale antrenează elemente din noroiul de foraj și particule neconsolidate din roca magazin, de diferite forme și mărimi, de diferite naturi și compoziții chimice;

- Pentru o utilizare eficientă, pentru reducerea riscului tehnic atașat transportului și distribuției gazele naturale la consumatorul final, pentru exploatarea avantajoasă și fără pericolul apariției accidentelor este necesară filtrarea și purificarea g.n., la calitatea cerută de consumatorul final.

CAPITOLUL II

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND FILTRAREA GAZELOR NATURALE

2.1. GENERALITĂȚI

Siguranța funcționării întregului sistem național de transport al gazelor naturale depinde în primul rând de calitatea gazelor naturale, de construcția, exploatarea și întreținerea sistemului de transport și de puritatea gazului natural pe tot traseul lui de la extracție până la consumatorul final.

O primă problemă ce trebuie rezolvată pentru a crește siguranța întregului SNTGN este problema îndepărtării tuturor particulelor solide existente în gazele naturale, problemă rezolvată prin operația de filtrare. Această operație de filtrare depinde în primul rând de următorii factori: concentrația de particule; dimensiunile și forma particulelor; gradul cerut de reținere a particulelor; presiunea și debitul gazului natural; caracteristicile fizice și chimice ale particulelor solide; cerințele utilizatorului privind puritatea gazului; metoda dorită de îndepărtare a particulelor; productivitatea cerută și costul realizării operației.

În câmpurile de producție, la capul de extracție, gazele naturale sunt captate la o anumită presiune, antrenând o mare cantitate de particule solide de diferite forme și dimensiuni, particule care au în compoziția lor Al, Ca, Si, Fe, Mg, Hg, Se, As, Sb, Sn și O₂ sub formă de silicați, dintre care unii mai conțin și ionul de calciu. Pe lângă aceste elemente gazele naturale mai conțin și altele, funcție de natura rocii magazin și metoda de extracție.

Gazele naturale antrenează toate aceste particule în drumul lor prin sistemul de conducte având în primul rând o acțiune puternic corozivă asupra acestora. Efectul de coroziune depinde de: natura particulelor; densitatea particulelor; forma și rugozitatea suprafețelor acestora; viteza de antrenare; masa particulelor și presiunea gazelor naturale; temperatura mediului și existența mediilor lichide.

De aceea, este recomandat ca operația de filtrare să se execute cel puțin în următoarele etape: la capul de extracție; înaintea stațiilor de uscare a gazelor naturale; după stațiile de uscare a gazelor la care se utilizează desicant solid; înaintea stațiilor de comprimare a gazelor naturale; înaintea stațiilor de reglare și măsurare; la utilizatorii de gaze naturale cu procese tehnologice specific (chimizare, tratamente termice, industria sticlei și porțelanului, industria medicamentelor etc.)

Particulele transportate au dimensiuni cu atât mai mici cu cât se găsesc mai departe de locul din care au fost antrenate sau în care s-au format. Particulele se sparg și se corodează datorită ciocnirii cu pereții conductelor concomitent producând corodarea țevii și asupra acesteia.

Particulele mai fine sunt păstrate mai ușor în suspensie, pentru că viteza lor de depunere sub acțiunea accelerației normale a căderii libere (gravitației), scade cu reducerea diametrului conform relației, (2.1):

$$F_c = \frac{\pi D^3}{6} (\rho_p - \rho_g) g, \quad (2.1)$$

unde:

F_c - este forța de cădere, datorită accelerației normale a căderii libere (gravitaționale), în N;

D - diametrul particulei, considerându-le de formă sferică, în m;

ρ_p - densitatea particulei, în kg/m³;

ρ_g - densitatea gazelor, în kg/m³;

g - accelerația normală a căderii libere ($\sim 9,81 \text{ m/s}^2$).

În timpul căderii pe verticală, mișcarea particulei este uniform accelerată, existând o frecare cu particulele de gaz care determină o forță echivalentă egală cu o forță de semn contrar, a cărei valoare este dată de relația, (2.2):

$$F_f = \frac{1}{2} \lambda \cdot v^2 \cdot \rho_g \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (2.2)$$

unde:

F_f este forța de frecare a particulei solide cu particulele de gaze pe direcția vitezei particulele solide, în N;

λ - coeficientul de frecare (valorile lui se determină conform tabelului 2.1);

D - diametrul particulei, (considerată de formă sferică), în m;

ρ_g - densitatea gazelor naturale, în kg/m^3 .

Viteza v , nu este viteza gazului natural în conductă, ci viteza relativă a gazului în raport cu particulele de praf. Astfel, o particulă care cade sub acțiunea accelerației normale a căderii libere, într-un curent de gaz în mișcare turbulentă, poate avea o viteză v , care să conducă la un regim laminar iar pe peretele conductei poate avea, datorită frecării cu gazul (care se mișcă în regim laminar) o viteză v , care definește un regim turbulent.

Cu relațiile din tabelul 2.1, pentru regimurile laminar și turbulent, se pot determina forțele de frecare ce tind să antreneze particulele de praf depuse în conducte.

Tabelul 2.1. Căderea particulelor într-un curent de gaz, în conducte

Număr Reynolds	$Re < 2$	$Re > 500$	$2 < Re < 500$
Regimul	Laminar	Turbulent	Intermediar
Relația de calcul a coeficientului de frecare	$\lambda = \frac{24}{Re}$ Legea lui Stokes	$\lambda = 18,5 Re^{-0,6}$ Relația lui Allen	$\lambda = 0,44$ Legea lui Newton
Relația de calcul a forței de frecare care se exercită asupra unei particule de formă sferică	$F_f = 3\pi D V \eta$	$F_f = 2,3\pi D^{1,4} V^{1,4} \rho_g O^4 \eta^{0,5}$	$F_f = 0,5\pi D^2 V^2 \rho_g$

Pentru determinarea vitezei de depunere, se ține seama că atunci când forțele de sens contrar F_c și F_f sunt egale; $F_c = F_f$, se obține viteza limită uniformă de cădere, v_{lim} .

Astfel, în regimul laminar, egalând forța de frecare F_f , cu forța de sens contrar F_c , se obține:

$$\frac{\eta D^3}{6} (\rho_p - \rho_g) g = 3\pi D V \eta, \quad (2.3)$$

de unde rezultă viteza limită

$$v_{lim} = \frac{D^2 (\rho_p - \rho_g) g}{18\eta}, \quad (2.4)$$

iar, în regim intermediar, egalând forța de frecare cu forța de sens contrar F_c , se obține:

$$\frac{\pi D^3}{6} (\rho_p - \rho_g) g = \frac{1}{2} \lambda \frac{\pi D^2}{4} v^2 \rho_g, \quad (2.5)$$

de unde:

$$v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{D(\rho_p - \rho_g)g}{\lambda \rho_g}}, \quad (2.6)$$

În regim turbulent, egalând forța de frecare cu forța de sens contrar F_c , se obține expresia:

$$\frac{\pi D^3}{6} (\rho_p - \rho_g)g = 0,055 \pi D^2 v^2 \rho_g, \quad (2.7)$$

de unde rezultă:

$$v_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{1}{0,33} \frac{D(\rho_p - \rho_g)g}{\rho_g}}, \quad (2.8)$$

Pe baza rezultatelor experimentale, s-au stabilit următoarele relații de legătură:

$$v_a = 0,192 v_{\text{lim}}, \quad (2.9)$$

$$\text{și}$$

$$v_p = 0,7 v_{\text{lim}}, \quad (2.10)$$

Din relația (2.9) și (2.10) se obțin egalitățile:

$$\frac{v_a}{v_p} = 3,64, \quad (2.11)$$

și

$$\frac{w_p}{w_A} = 2,16, \quad (2.12)$$

unde:

v_a este viteza minimă de antrenare a particulelor de la care se produce antrenarea, în m/s;

v_p - viteza minimă a particulelor de la care acestea încep să plutească, în m/s; w_a - viteza medie de curgere, a gazului care poate provoca antrenarea particulelor de praf, în m/s;

w_p - viteza medie de curgere, a gazului, care poate provoca plutirea particulelor de praf, în m/s.

Experimental s-a constatat că viteza limită de cădere a particulelor solide este funcție de diametrul particulei și presiunea gazelor naturale (fig. 2.1).

Se observă că viteza medie a gazului pentru care particulele de praf încep să plutească este de aproximativ de două ori mai mare decât viteza de la care particulele de praf încep să fie antrenate (fig. 2.2).

2.2. IMPURITĂȚILE SOLIDE SI RETINEREA LOR

Impuritățile solide sunt de diferite forme și dimensiuni, depinzând în primul rând de locul unde se face analiza gazului natural de transportat, astfel:

- la capul de extracție există: nisip, noroi, sfărâmături de rocă și diferite lichide;
- pe traseul conductelor de transport: praf, particule lichide și solide, pulberi și oxizi;
- înainte de consumatorul final: particule și microparticule solide și lichide.

Pentru ca aceste impurități să aibă un efect negativ din ce în ce mai mic asupra eficienței transportului de gaze naturale și pentru a reduce riscul tehnic atașat conductelor de transport se face separarea și filtrarea lor.

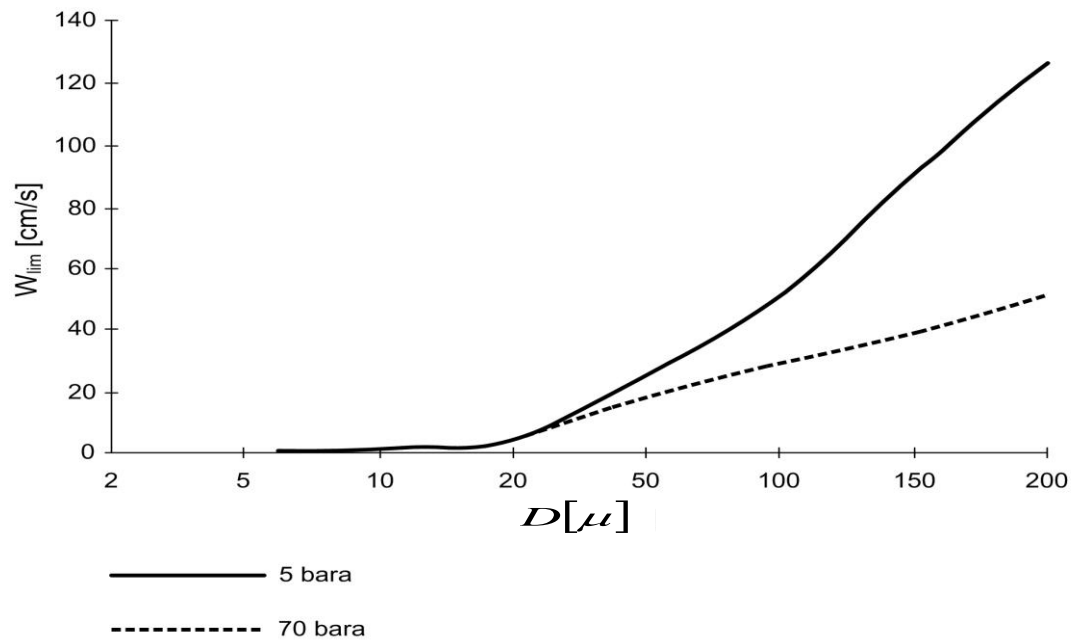


Fig.2.1. Viteza limită de cădere a particulelor de praf

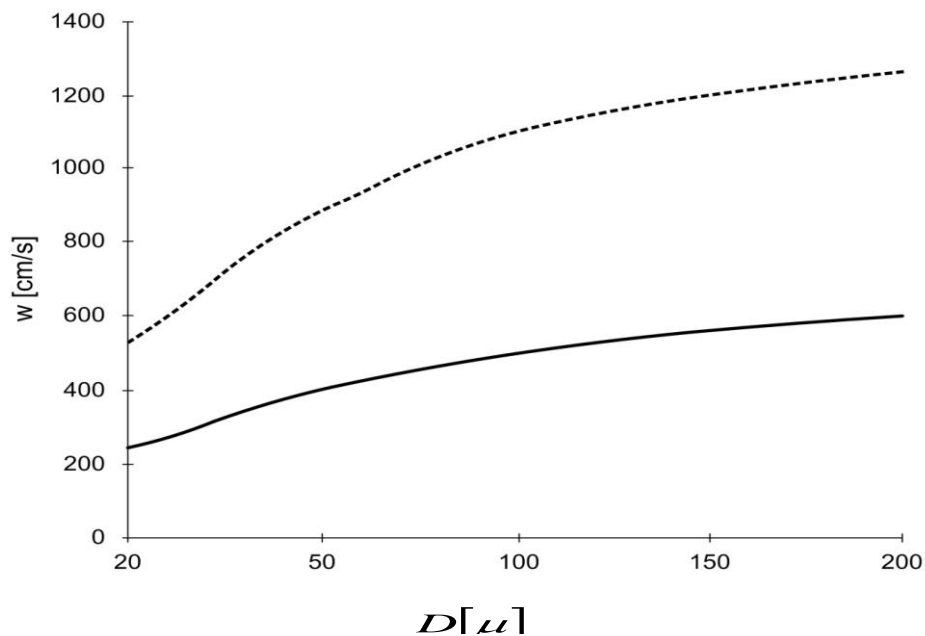


Fig.2.2. Viteza de început de antrenare și de plutire a particulelor de praf

Această separare și reținere se face cu ajutorul unor filtre care se caracterizează prin:

- debitul de gaze naturale care ies din sonda de extracție;
- presiunea de intrare în filtru a gazelor naturale;
- presiunea de ieșire din filtru a gazelor naturale;

- diametrul particulelor pe care poate să le rețină;
- temperatura maximă a gazelor la intrarea în filtru;
- gradul de reținere sau eficiența filtrului;
- pierderea de presiune în filtru;
- costurile anuale de întreținere.

Separatoarele de impurități solide și filtrele trebuie să fie montate cel puțin în următoarele locuri de pe traseul sistemului de exploatare a gazelor naturale:

- în câmpurile de producție, dacă e posibil la capul de extracție;
- înaintea stațiilor de uscare a gazelor;
- după stațiile de uscare a gazelor la care se utilizează desicant solid;
- înaintea stațiilor de comprimare a gazelor naturale;
- înaintea stațiilor de reglare și măsurare;
- la utilizatorii de gaze naturale cu procese tehnologice pretențioase (chimizare, tratamente termice, industria sticlei și porțelanului etc.)

Operația de filtrare constă în trecerea unui fluid printr-un mediu permeabil (filtru), pentru a reține impuritățile. Ca material filtrant poate fi utilizat de exemplu, un material textil cu fibre dispuse ordonat (țesături) sau dezordonat (fibre sau pâslă), sau un material granulat în care granulele pot fi libere și constituie umplutura filtrului.

Mecanismul filtrării într-un material filtrant este complex deoarece apar efecte de inerție, efecte de aderență, de difuziune, de natură electrostatică și efectul de sită.

Imaginea spectrului hidrodinamic la numere Reynolds mici (de ordinul unităților) la mișcarea în jurul unui cilindru (o fibră) este prezentat în figura 2.3.

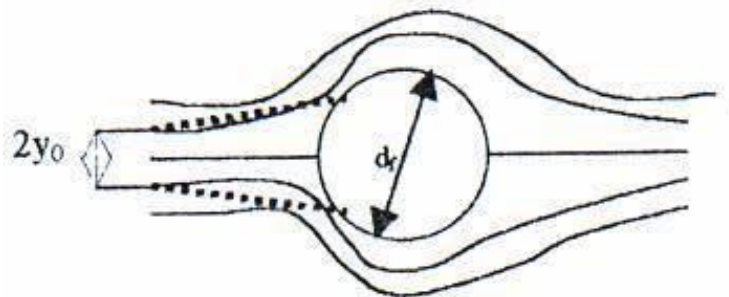


Fig. 2.3. Imaginea spectrului hidrodinamic la numere Reynolds mici la mișcarea în jurul unui cilindru (o fibră)

În curentul de gaz există particule în suspensie care sunt antrenate de curentul de gaz până în apropierea fibrei elementului filtrant unde liniile de curent se curbează.

Fie o particulă solidă având diametrul d și care se mișcă cu viteza v , egală cu cea a curentului de gaz (fig. 2.4).

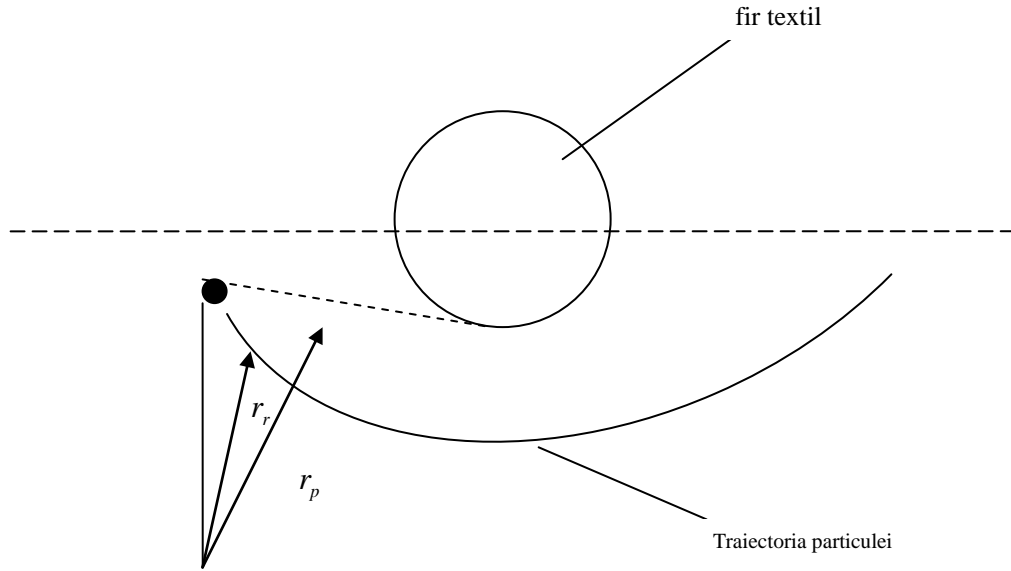


Fig. 2.4 Mișcarea particulelor de fluid în jurul unui fir de material textil

Forța centrifugă ce acționează asupra elementelor de gaz F_c , este dată de relația:

$$F_c = \rho_G \frac{\pi d^3}{6} \frac{v_c^2}{r_c} , \quad (2.13)$$

în care:

r_c este raza cilindrului prin care circulă gazul;
 v_c – viteza de curgere a gazului; ρ_G – densitatea gazului.

Forța centrifugă ce acționează asupra particulelor solide F_p , este de forma:

$$F_p = \rho_p \frac{\pi d^3}{6} \frac{v_p^2}{r_p} , \quad (2.14)$$

în care:

r_p este raza particulei existentă în gazul purtător;
 v_p – viteza particulei;
 ρ_p – densitatea particulei solide.

Dacă se consideră că la momentul considerat cele două viteze sunt identice și că la momentul curbării traiectoriei raza interioară de curbură este aceeași, rezultă că raportul F_p/F_c are ordinul de mărime $\sim 10^3$, și $r_p > r_c$.

Prin urmare, particulele solide aflate în intervalul $2y_0$ vor lovi fibra. În acest fel, se poate defini un coeficient de coliziune de forma:

$$\varphi_c = \frac{2y_0}{d_f} , \quad (2.15)$$

O parte din particulele ce vor lovi fibra vor adera la aceasta și vor fi reținute de fibră, iar o parte vor aluneca pe suprafața fibrei și vor fi antrenate de curentul de particule. Particulele reținute de fibră sunt caracterizate de coeficientul de aderență φ_i , de forma:

$$\phi_i = \phi_c \phi_a = f(\Psi, \text{Re}, \rho_p / \rho_g) , \quad (2.16)$$

unde:

Ψ - este numărul lui Stokes;
 Re - numărul lui Reynolds;
 ρ_p/ρ_g - raportul densităților relative particule solide/gaz.
 Numărul lui Stokes ψ are expresia:

$$\psi = \frac{v_p d^2 \rho_p c_u}{18\eta df} , \quad (2.17)$$

în care:

C_u este numărul lui Cunningham, care ia în considerare efectul mișcării Browniene;
 Λ - lungimea pe care o parcurge liber o moleculă și rezultă expresia:

$$c_u = \frac{1}{1 + 2\Lambda/d} , \quad (2.18)$$

Numărul lui Stokes rezultă din raportul forțelor de inerție:

$$\frac{F_{in}}{F_{visc}} = \frac{\rho_p (\pi d^3 16) (v_p^2 / r_p)}{3\pi\eta R v_p} = \frac{\rho_p d^3 v_p^2}{18\eta \frac{d}{2} v_p \frac{df}{2}} = \frac{4\rho_p d^2 v_p}{18\eta df} ; \quad (r_p=df/2) , \quad (2.19)$$

Numărul ψ caracterizează raportul între forțele de inerție F_{in} și cele de frecare vâscoasă F_{visc} .

Din figura 2.5 se poate vedea că randamentul de separare, datorat inerției are valori crescătoare când ψ crește, adică atunci când valorile diametrului particulei d_p sunt mari. Aceasta înseamnă că la $d_p > 1$ efectul acestor forțe de inerție devine deosebit.

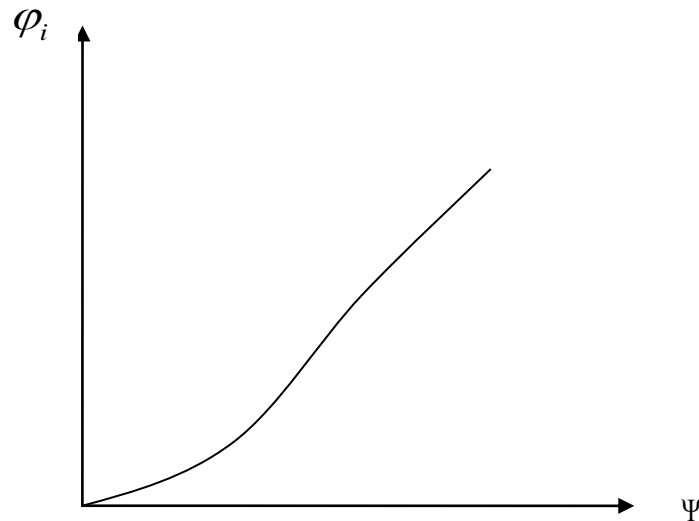


Fig. 2.5 Randamentul de separare

Influențele numărului lui Re și a raportului (ρ_p/ρ_g) sunt definite după diverși autori. La numere Re de ordinul sutelor, spectrul hidrodinamic arată ca în figura 2.6.

Deoarece în realitate există un număr de fibre, direcția curentului purtător de particule poate să nu fie cea normală la particulă putând fi diferită.

Aceasta înseamnă că particulele pot să intre în zonele din spatele fibrei și mișcările secundare pot să antreneze particula și să o lovească pe partea din spatele fibrei iar ϕ crește.

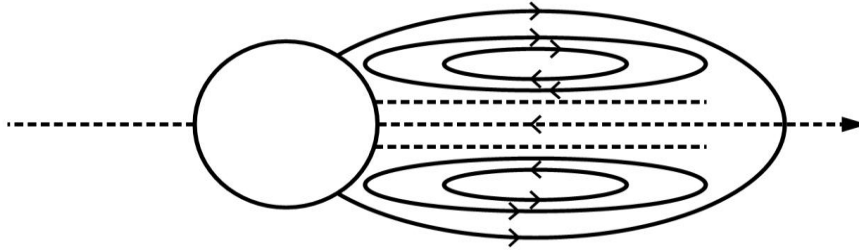


Fig. 2.6. Randamentul de separare în cazul numărului Re de ordinul sutelor

Pătrunderea în această zonă din spate se poate face atât datorită particulelor ce intră în spatele altei particule, cât și datorită unor fluctuații turbulente. Conform graficului $\varphi_i=f(\psi)$ din figura 2.5, rezultă că la diametre mici ale particulei d_p , φ_i este redus. Realitatea arată că la $d_p < 1\mu m$, φ_i crește din nou. Aceasta se datorează efectelor de difuziune. În acest caz, particulele fiind de dimensiuni mici, se va considera că asupra lor acționează efectul mișcării Browniene. Atunci, probabilitatea de lovire a suprafeței fibrei crește și în consecință și capacitatea de reținere se mărește substanțial. Această mișcare aleatoare este caracterizată printr-un coeficient de difuziune c_d , dat de relația:

$$c_d = \frac{KT}{3\mu\pi d_f} c_u, \quad (2.20)$$

unde:

$K = 1,38 \cdot 10^{-23}$, în J/K

K – constanta lui Boltzmann;

T – temperatura gazului purtător;

d_f – diametrul fibrei

Influența procesului de difuziune asupra randamentului de separare se prezintă în fig. 2.7.

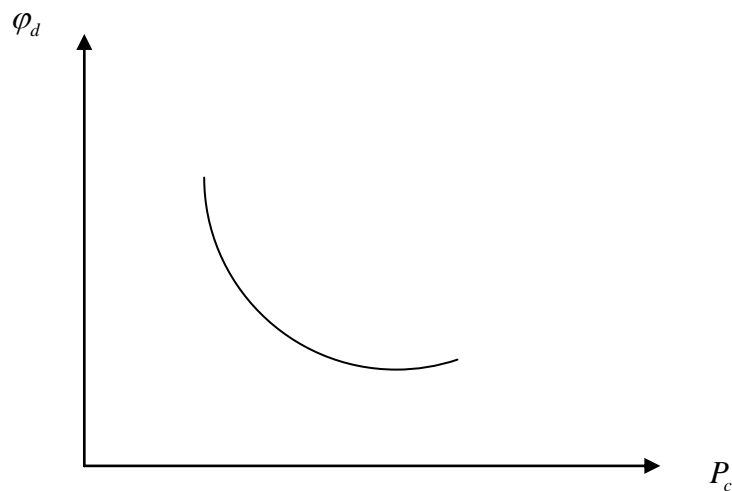


Fig. 2.7. Influența procesului de difuzie asupra randamentului de separare

Randamentul de separare crește substanțial prin efectul de difuziune la numere P_c mici, adică la valori mici ale curentului, valori mici ale df și coeficienți de difuziune mari, adică dp mici. P_c este criteriul lui Peclet și are forma:

$$P_c = \frac{v \cdot d_f}{D}, \quad (2.21)$$

Asupra particulelor care trec prin filtru își fac simțită prezența forțele electrostatice. Acest fenomen se datorează încărcării electrostatice a particulei și a fibrei din cauza frecării cu gazul.

Efectul de încărcare electrostatică își face simțită prezența la o viteză de curgere $v = 1,5 \dots 2$ m/s. Efectul lor este cu atât mai mare cu cât dimensiunile particulelor sunt mai mici. Un rol determinant în funcționarea filtrelor îl are aderența particulelor de fibră. Pentru a spori uneori această capacitate de reținere, se poate mări în mod suplimentar coeficientul de adeziune, fie umezind fibrele, fie dispunând de un strat de ulei.

Pentru particule, dacă se îndeplinește condiția $s > 3d$, acest efect nu apare. Dacă suprafețele sunt active, aceste punți pot apărea și în cazul $s > 3d$ dar sunt instabile, iar efectul de sită este intermitent. Acest efect de sită poate să apară numai pe suprafețele exterioare ale filtrelor. Se formează astfel un strat pe suprafața filtrului care la rândul lui reține particulele cu diametre mai mari ale impurităților solide.

Grosimea acestui strat este variabilă în timp conducând la creșterea căderii de presiune pe elementul filtrant, dată de relația:

$$C_i \cdot v \cdot S \cdot t = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_p \cdot S \cdot h, \quad (2.22)$$

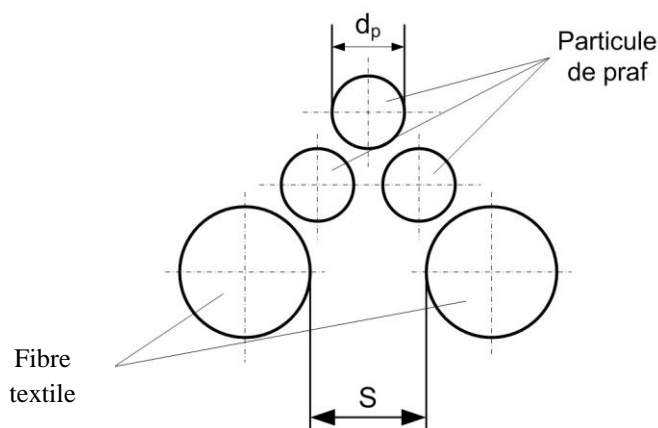


Fig. 2.8. *Dispunerea fibrelor de material textil și a particulelor de praf în interiorul unui filtru; d_p diametrul particulelor solide; s -distanța între două fibre textile*

În momentul în care presiunea pe stratul filtrant atinge o anumită valoare și căderea de presiune crește, stratul de praf este îndepărtat și filtrul este regenerat. În timpul regenerării este avantajos să se îndepărteze toată cantitatea de praf și să fie lăsat un strat de praf care să amorseze și să accelereze formarea stratului de praf filtrant pentru a reține particule din ce în ce mai mici.

Variația căderii de presiune pe un element filtrant este prezentată în graficul din fig. 2.9.

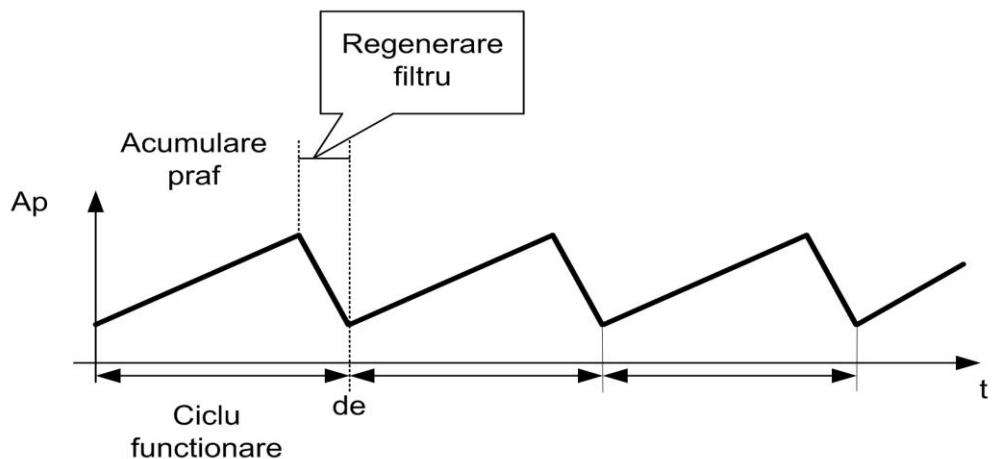


Fig. 2.9. Ciclurile de funcționare ale dispozitivului de filtrare

Analizând în final randamentul global de separare, rezultă că la viteze mici sunt preponderente efectele de difuziune și filtrele din această categorie lucrează la viteze foarte mici.

Efectele de inerție sunt specifice unei categorii de filtre care lucrează la viteze mai mari.

La viteze foarte mari, apare o suflare a prafului și o reflectare a particulelor datorită ciocnirii cu fibrele (fig.2.10), pierderile de presiune fiind mai mici.

Desprăfuitoarele prin spălare au un foarte bun randament de separare, dar trebuie să funcționeze într-un regim strict delimitat de debite și viteze. În cazul că viteza gazului depășește limita prescrisă, există riscul ca uleiul cu praful colectat, să fie antrenat dincolo de șicanele de dezuleiere, cu pierdere de ulei și cu scăderea eficacității de desprăfuire. Dacă viteza este sub limita prevăzută, spălarea, respectiv reținerea prafului, se face cu un randament nesatisfăcător.

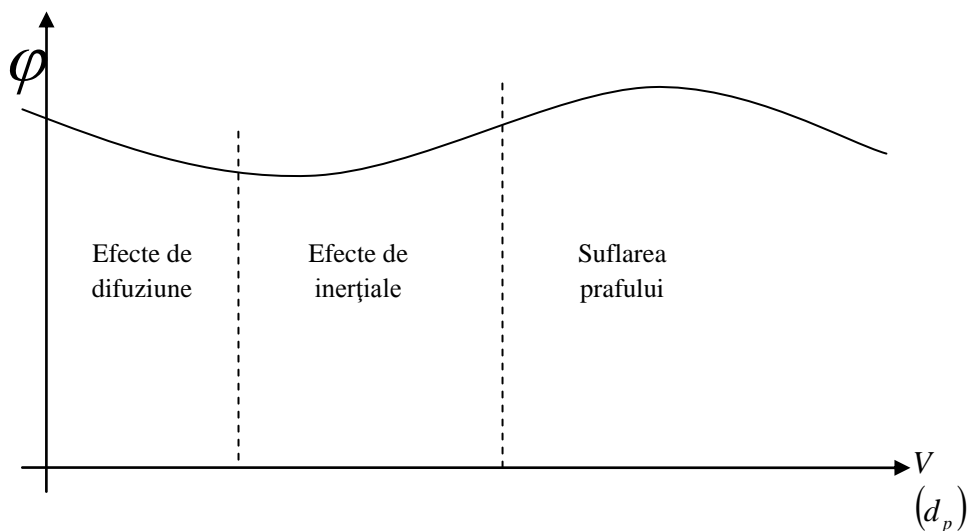


Fig. 2.10. Ciclurile de funcționare ale dispozitivului de filtrare

Filtrarea gazelor prin medii poroase

Reținerea pulberilor sau prafului se face prin *desprăfuire* cu ajutorul unor *filtre* care se caracterizează prin următoarele elemente:

- debitul de gaze transportate și care sunt preluate de filtre;
- diametrul particulelor pe care poate sa le reținută;
- temperatura maxima a gazelor, aduse in filtre;
- gradul de retinere sau eficienta filtrului;
- pierderea de presiune in filtru;
- costurile anuale de intretinere.

Principalele caracteristici de exploatare ale sistemelor de desprăfuire cel mai des utilizate sunt date in tabelul 2.2, iar domeniul specific de aplicare, functie de dimensiuni, in figura 2.11.

Tabelul 2.2. Caracteristicile de exploatare ale sistemelor de desprăfuire

Metoda de reținere	Echipamentul tehnologic	Avantaje	Inconveniente
Mecanice	Camera de decantare Sac de praf Separator cu impact (jaluzele) Ciclon Multiciclon	Rezistența materialelor	Inadaptarea la particule fine(de exemplu mai mici de 5μm pentru ciclu)
Electrostatice	Electrofiltre uscate Electrofiltre umede	Scăderea consumului de energie Eficacitate in filtrare	Inadaptarea la variații bruște ale rezistivității prafului si caracteristicilor de flux gazos
In strat poros (totale)	Filtru textil de tip sac	Eficacitate in filtrare Posibilitatea de captare a anumitor poluanți gazoși	Consum mare de energie. Sensibilitatea mediului filtrant la temperatura
	Filtru cu nisip		Domeniu de aplicare limitat
Hidraulice	Turn de spălare; Scruber de tip șoc (cu pulverizare); Scruber Venturi; Scruber uscat;	Posibilitatea de tratare a gazelor fierbinți; Posibilitatea de captare a anumitor poluanți gazoși	Consum mare de energie(mai ales cu tubul Venturi). Riscul transportului poluanților către apă și sol.

Filtrarea gazelor este operația în care reținerea particulelor de praf se realizează prin trecerea gazelor prin suprafețe poroase, ale căror interstiții (pori) au dimensiuni stabilite în funcție de adâncimea de separare (gradul de reținere) dorită, particulele fiind reținute pe suprafața poroasă a elementului filtrant.

După materialul folosit ca element filtrant se disting: filtre cu diferite tipuri de țesături, filtre cu fetru, filtre ceramice etc.

Diametrul[μm]	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ¹	10 ²	10 ³
Echipamentul tehnologic							
Camera de decantare							

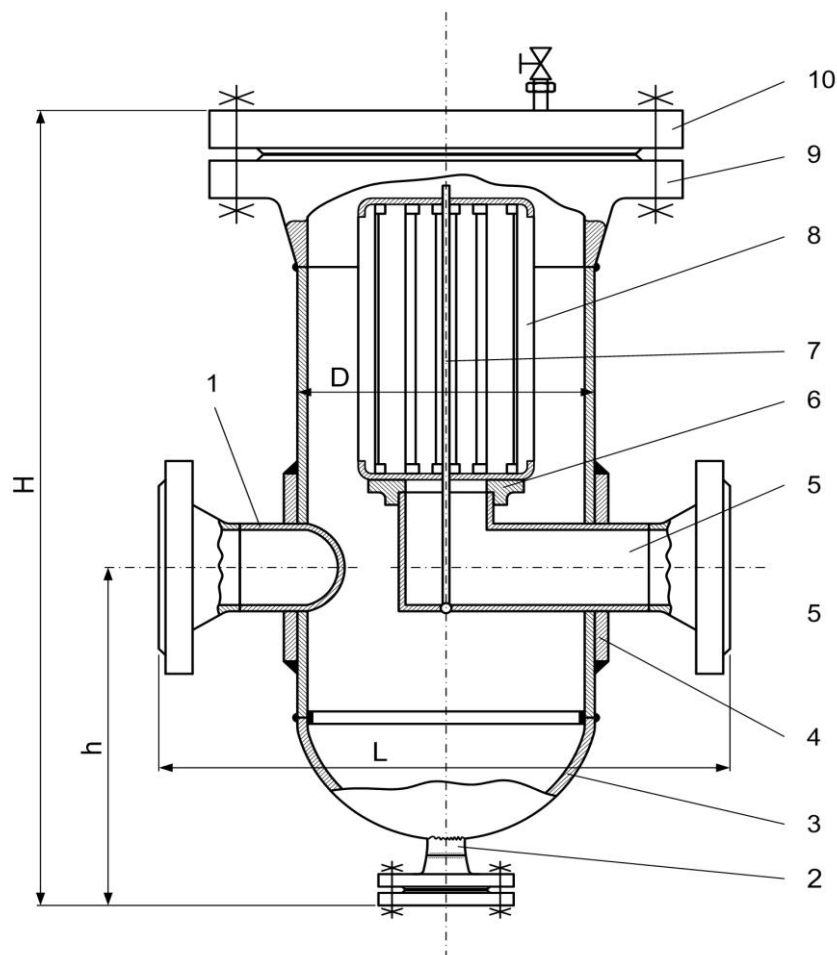


Fig. 2.12 Filtru de gaze naturale:
 1-racord intrare; 2-racord curățire; 3-fund elipsoidal; 4-corpul filtrului; 5-racord de ieșire; 6-suport cartuș; 7-tijă de susținere; 8-cartuș filtrant; 9-flanșă oarbă; 10-racord de aerisire.

Căderea de presiune prin țesătura cartușului, este dată de relația:

$$\Delta P = K \cdot V_0 \cdot \mu, \quad (2.23)$$

unde:

- ΔP este căderea de presiune, în mm col apă;
- v_0 - viteza gazelor în raport cu suprafața filtrantă, presupusă goală, în m/s;
- K - vâscozitatea dinamică a gazelor, în kg/ms;
- η – coeficientul de frecare.

Ținând seama de faptul că porii țesăturii sunt înfundați de primele particule de praf reținute, vâscozitatea dinamică a gazelor K , va crește foarte repede putând ajunge la valori de peste 10 ori mai mari decât cele din tabel. În acest caz este necesară îndepărtarea cartușului colmatat și înlocuirea lui cu unul curat.

Curățarea se poate realiza după scoaterea din funcțiune a filtrului prin scuturare sau suflare cu aer în sens invers față de curentul de gaz, operație ce presupune timp și întreruperea sistemului de transport al gazelor naturale.

Cartușele din fetru au de regulă formă cilindrică, gazele intrând prin interiorul cartușului. Fetrul pentru cartuș poate fi confecționat din fibre de bumbac, lână, naylon, sticlă, acrilat etc., ale căror caracteristici specifice, le fac utilizabile după caz, în medii neutre, în medii corozive, acide sau alcaline, în medii abrazive etc.

În filtrele cu cartușe de fetru, vitezele pot atinge 2,5...15 m/s, dar viteza optimă este de 7...8 m/s, iar căderile de presiune trebuie să fie sub 10 mbar.

Aceste filtre pot reține particule fine de praf, dar nu se recomandă folosirea lor la gazele cu conținut mare de praf sau umede, pentru că aceasta ar duce la colmatarea foarte rapidă a cartușelor și la multe întreruperi în funcționare.

Filtrele ceramice beneficiază de randamente înalte de filtrare, putând elimina practic totalitatea particulelor de praf conținute în gaze. Au de asemenea avantajul că particulele de praf nu pătrund în profunzimea materialului ceramic, ceea ce ușurează curățirea care se poate face prin spălare cu apă sub forma unui jet puternic, curățirea cu peria și uscarea cu aer și acestea presupun scoaterea din filtru și spălarea lor.

Căderea de presiune într-un filtru ceramic depinde atât de dimensiunile porilor cât și de structura granulometrică a materialului din care este confecționat, ele utilizându-se în mod curent pentru debite relativ mici.

Studii privind separarea particulelor lichide și solide

Cel mai răspândit mijloc de reținere a impurităților solide și lichide din gazele naturale este separatorul mecanic, construit în nenumărate variante, perfecționat încontinuu, și totuși cu eficiență limitată față de cerințele crescânde pentru puritatea gazelor.

Pentru a explica eficiența limitată a acestor dispozitive se vor analiza forțele care acționează asupra particulelor aflate în curentul de gaze din separator. Se presupune că asupra particulelor solide din curentul de gaze naturale acționează următoarele forțe:

- forțele de inerție F , definite prin legea a II-a lui Newton, în forma redată de d'Alambert și care rezultă din ecuația:

$$F - m \frac{dv}{dt} = 0, \quad (2.24)$$

în care: m este masa particulei;

v – viteza particulei.

Pentru picăturile mici, termenul $\frac{dv}{dt}$ rezultă din schimbări ale direcției mișcării, iar în

cazul forțelor centrifuge devine $m \frac{v^2}{r}$. Această forță este luată în considerare doar la separatoarele centrifuge;

- forțele de frânare F_v , datorită vâscozității gazului, exprimate în forma:

$$F_v = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (2.25)$$

în care: η este vâscozitatea gazului.

Aceste forțe pot fi cuprinse într-o expresie generală, de forma:

$$F_v = K \cdot D_p^n \cdot v^n \cdot \eta^{2-n} \cdot \rho^{n-1}, \quad (2.26)$$

în care: coeficientul K depinde de caracterul curgerii și de forma particulei; n - valoarea exponentului, care depinde numai de caracterul curgerii.

Astfel, în mișcarea laminară, când particula se deplasează fără a forma vârtejuri în vecinătatea ei, valoarea exponentului n este egală cu unitatea și ecuația are forma cunoscută de legea lui Stokes, dată de impulsia:

$$F_v = K \cdot D_p \cdot \nu \cdot \eta, \quad (2.27)$$

Pentru particule sferice, unde $K = 3\pi$, relația (2.27) devine:

$$F_v = 3\pi \cdot D_p \cdot \nu \cdot \eta, \quad (2.28)$$

În cazul mișcării turbulente, când deplasarea particulei formează turbion în jurul ei, valoarea exponentului este 2 și ecuația este cunoscută sub legea lui Newton de forma:

$$F_v = K \cdot D_p^2 \cdot V^2 \cdot \rho_0, \quad (2.29)$$

care pentru sfere, unde $K = \frac{\pi}{16}$, devine:

$$F_v = \frac{\pi D_p^2 v^2 \rho_0}{16}, \quad (2.30)$$

Pentru particule foarte mici, forța este definită de relația Stokes-Cunningham, de forma:

$$F_v = 3\pi \cdot D_p \cdot V \cdot \eta \cdot \frac{1}{1 + b \frac{\lambda}{D_p}}, \quad (2.31)$$

în care: λ este drumul liber mediu al moleculelor gazului; b - constanta care depinde de compoziția gazului.

- forțele gravitaționale F_g , care depind de greutatea particulei având expresia:

$$F_g = \frac{\pi \cdot D_p^2 \cdot \rho \cdot g}{6}, \quad (2.32)$$

în care: ρ este densitatea particulei;

D_p – diametrul particulei;

g – accelerația gravitațională

- forțele de plutire F_p , având expresia:

$$F_p = \frac{\pi \cdot D_p^2 \cdot \rho_0 \cdot g}{6}, \quad (2.33)$$

unde: ρ_0 este densitatea gazului;

- forțele de difuziune, rezultate din mișcarea browniană a moleculelor;

- forțele termice F_t , care se nasc în zonele unde există un gradient termic, ce tind să transporte particula din zona caldă spre cea rece și care sunt independente de curenții de convecție ai gazului.

Expresia acestor forțe este de forma:

$$F_t = \frac{9\pi D_p H_0}{2H_0 + H_p} \cdot \frac{\eta^2}{2\rho_0 T} \cdot \frac{dT}{dy}, \quad (2.34)$$

în care: H_0 este conductivitatea termica a gazului; H_p conductivitatea termica a particulei.

- forțele adezive, care provoacă lipirea particulelor de pereți.

Cunoscând natura forțelor care acționează asupra unei particule se poate determina drumul pe care îl va parcurge aceasta.

Descrierea forțelor și a drumului parcurs de particule s-a făcut în scopul de a arăta că nu este posibil de realizat un separator cu eficiență totală, deoarece în nici un caz practic nu se poate cunoaște, mărimea, distribuția, forma, frecvența, mișcarea particulelor antrenate de curentul de gaz, de aceea, fiecare separator va avea un anumit domeniu de funcționare optimă, care de cele mai multe ori nu corespunde cu condițiile în care este pus să funcționeze.

2.3. SEPARAREA IMPURITĂȚILOR

Cea mai importantă funcțiune a instalației tehnologice de suprafață, la o sondă de extracție a gazelor naturale, este separarea și reținerea impurităților lichide și solide, aduse din strat odată cu gazele sau rezultate prin condensare din cauza scăderii temperaturii pe țevile de extracție și prin laminare.

2.3.1. Separarea impurităților solide și lichide din gaze. Instalații de separare

Pentru separarea gazelor s-au construit și experimentat mai multe tipuri de separatoare, bazate atât pe forțele gravitaționale, cât și pe cele centrifuge și de adeziune.

Experimental s-a constatat că se produce o separare mai eficientă dacă gazele care ies din separator conțin circa 20% mai multă umiditate decât cea de saturație.

În multe cazuri, această performanță este suficientă, ca să asigure o desfășurare normală a utilizării gazelor, mai ales când conductele sunt scurte și presiunea nominală este coborâtă, astfel încât scăderea presiunii pe traseu să compenseze scăderea temperaturii, iar la punctul final, datorită mărimii volumului specific al gazului, acesta să devină nesaturat.

În alte cazuri însă, când presiunile de plecare sunt ridicate (> 4 Mpa) și căderea de temperatură este mult mai importantă decât căderea de presiune, simpla separare în schelă nu este suficientă și de aceea se impune o deshidratare a gazelor.

În funcție de parametri de exploatare a sondelor, de distanța dintre sonde și de calitatea și cantitatea lichidelor reținute, separarea și deshidratarea se poate face la fiecare sondă în parte sau într-un punct central.

Curățirea gazelor de impurități mecanice (nisip, noroi, sfărâmituri de rocă) și lichide, după ieșirea din sondă, se efectuează în recipiente metalici sub acțiunea următorilor factori:

- ✓ forța gravitațională;
- ✓ schimbarea bruscă a direcției curentului de gaze;
- ✓ forțe centrifuge, în cazul mișcării circulare a curentului de gaze;
- ✓ contactul dintre curentul de gaze și o suprafață lichidă sau una solidă umedă;
- ✓ trecerea gazelor prin filtre, membrane etc..

Eficiența procesului de separare depinde de:

- ✓ tipul și dimensiunile separatorului;
- ✓ construcția separatorului (folosirea dispozitivelor de deflegmare, modul de introducere a gazelor etc);
- ✓ viteza curentului de gaze;
- ✓ proprietățile fizice ale gazelor;
- ✓ regimul tehnologic de separare (presiune, temperatură, debit).

2.3.1.1. Principiul de funcționare a separatoarelor utilizate, în prezent în industria gazului metan

Se bazează pe depunerea particulelor aflate în stare de suspensie în următoarele grupe de separatoare:

- ✓ gravitaționale (separatoarele verticale și orizontale);
- ✓ inerțiale (separatoarele cu ciclon);
- ✓ mixte (separatoarele cu intrare tangențială a gazelor).

Separarea gravitațională a lichidelor și a particulelor solide din gaze este cea mai veche tehnologie și are la bază forțele gravitaționale.

Separatorul gravitațional se prezintă în figura 2.13. Pentru dimensionarea acestui tip de separator se ia în considerare viteza limită de cădere a particulelor solide sau lichide, care se află în suspensie în gazele care pătrund în separator.

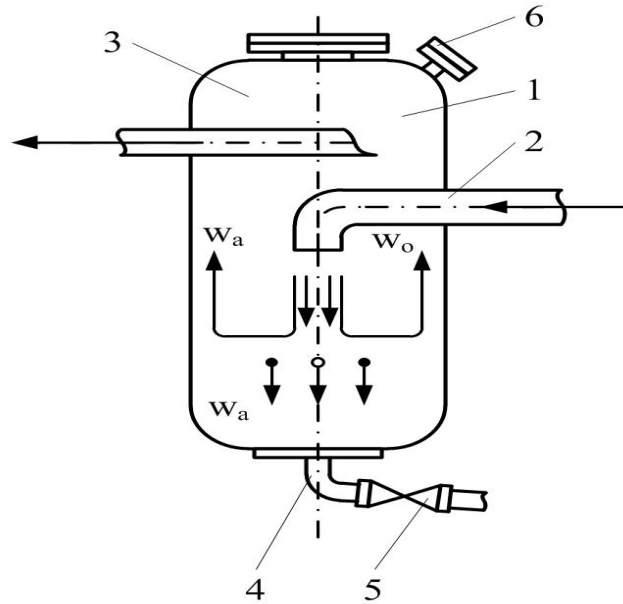


Fig. 2.13. Schema separatorului gravitațional:
1-corpul separatorului; 2-intrarea gazelor impure;3-ieșirea gazelor fără impurități; 4-țeavă de scurgere; 5-robinet de scurgere spre colectorul de praf; 6-supapă de siguranță.

Prin viteza limită de cădere se înțelege viteza constantă de cădere a particulei, care se realizează la puțin timp după începerea căderii prin mediul gazos.

Pentru ca particulele, care se găsesc în suspensie în gaze să înceapă să cadă, trebuie ca viteza ascensională a curentului ω_a , să existe într-o anumită relație cu viteza de cădere ω_o , astfel:

- la $\omega_o > \omega_a$ - particulele se depun pe corpul decantorului;
- la $\omega_o = \omega_a$ - particulele vor pluti în masa de gaze;
- la $\omega_o < \omega_a$ - particulele vor fi antrenate mai departe de către curentul de gaze fără să se poată depune.

Pentru calcularea diametrului separatorului se pune condiția ca viteza ascensionala a curentului de gaze ω_a , să fie cuprinsă între 70 și 80% din viteza limită de cădere ω_o , a unei particule cu diametrul $d < 0,1$ mm.

Viteza ascensionala a curentului de gaze ω_a este dată de relația:

$$\omega_a = \frac{q}{s} \cdot \frac{p_0 T_z}{p T_0}, \quad (2.35)$$

în care q este de forma:

$$q = \frac{Q}{86400}, \quad (2.36)$$

iar

$$s = KF, \quad (2.37)$$

Introducând relațiile (2.36) și (2.37) în ecuația (2.35) se obține expresia:

$$\omega_a = \frac{Q}{86400KF} \cdot \frac{p_0 T_z}{p T_0}, \quad (2.38)$$

în care:

Q este debitul de gaze al sondei, în $\text{m}^3\text{N/d}$, (ω_a , în m/s);

q - debitul de gaze al sondei, în $\text{m}^3 \text{N/s}$;

F - secțiunea separatorului, în m^2 ($0,785 D^2$; D , în m);

K - coeficientul de utilizare a secțiunii separatorului și are valorile din tabelul 2.4;

p_0 - presiunea atmosferică, în Pa ($p_0 = 0,1013 \cdot 10^6 \text{ Pa}$);

p - presiunea din separator, în Pa ;

T_0 - temperatura standard, în K ($T_0 = 273 \text{ K}$);

T - temperatura gazului din separator, în K ;

z - factorul de abatere.

Tabelul 2.4. Valorile coeficientului K , în funcție de numărul Reynolds Re

Re	1,5	1,5-5	5-10	10
K	1,0	0,83	0,71	0,65

Înlocuind valorile parametrilor p_0 , T_0 și luând $F = 0,785 D^2$, rezultă:

$$\omega_a = \frac{Q \cdot 0,1013 \cdot 10^6 \cdot T}{86400 \cdot 0,785 D^2 \cdot K \cdot p \cdot 273}, \quad (2.39)$$

sau

$$\omega_a = 5,471 \cdot 10^{-12} \frac{QT^2}{D^2 p K}, \quad (2.40)$$

Pentru determinarea diametrului separatorului vertical se considera $\omega_a = 0,75 \omega_0$, condiție care se introduce în relația (2.40) și rezultă expresia:

$$0,75 \omega_0 = D^2 p K + 5,471 \cdot 10^{-12} Q T z, \quad (2.41)$$

de unde:

$$D = \left(\frac{5,471 \cdot 10^{-22} Q T z}{0,75 \omega_0 p K} \right), \quad (2.42)$$

sau

$$D = 2,70 \cdot 10^{-6} \left(\frac{Q T z}{\omega_0 p K} \right)^{0,5}, \quad (2.43)$$

în care: D este diametrul separatorului, în m ; ω_0 - viteza limită de cădere a particulei de lichid, în m/s .

În relația 2.43 parametri necunoscuți sunt ω_0 și K . La mișcarea verticală a curentului de gaze în separator (de jos în sus), viteza de cădere a particulelor solide sau lichide depinde de rezistența pe care o opune masa de gaz.

Dacă se notează cu p , forța de rezistență pe care o opune masa de gaz, atunci, conform legii lui Newton:

$$p = c f \gamma_0 \frac{\omega_0^2}{2g}, \quad (2.44)$$

și ținând cont că:

$$p_2g = P, \quad (2.45)$$

se introduce în (2.45) și rezultă expresia forței, dată de relația:

$$P = cf \gamma_0 \omega_0, \text{ sau} \quad (2.46)$$

în care:

P este forța de rezistență pe care o întâmpină particula în cădere prin masa de gaz din separator, în N;

c - un coeficient adimensional, care se determină experimental, depinzând de forma particulei și de caracteristicile curentului de gaz, respectiv de numărul Reynolds, care este de forma:

$$Re = \frac{\omega_0 \rho d}{\mu}, \quad (2.47)$$

unde:

d este diametrul particulei, în m;

μ - vâscozitatea dinamică a fluidului, în kg/ms;

ρ - densitatea fluidului, în kg/m³;

Experimental s-a constatat că:

- pentru valori ale lui $Re \leq 1$, se poate admite:

$$c = \frac{12}{Re}, \quad (2.48)$$

- pentru $1 \leq Re \leq 500$. se poate lua:

$$c = \frac{9,25}{Re^{0,6}}, \quad (2.49)$$

- pentru valori $500 \leq Re \leq 150000$, se poate considera:

$$c = 0,22 \quad (2.50)$$

Dacă particula este sferică, atunci forța G , pe care o dezvoltă greutatea acesteia în cădere va fi de forma:

$$G = \frac{\pi d^2}{6} (\gamma_p - \gamma_g), \quad (2.51)$$

în care: G este forța dezvoltată de greutatea particulei, în N; γ_p și γ_g - greutatea volumică a particulei și respectiv a gazului, Nm³; d - diametrul particulei, în m.

Scriind că forța de rezistență la cădere este în echilibru cu forța de greutate a particulei, se obține egalitatea:

$$\frac{\pi d^3}{6} (\gamma_p - \gamma_g) = cf \rho_g \omega_0^2, \quad (2.52)$$

de unde, se obține:

$$\omega_0^2 = \frac{2 d (\gamma_p - \gamma_g)}{3 c \rho_g}, \quad (2.53)$$

Pentru domeniul $Re \leq 1$, când $c = 12/Re = 12 \mu / \omega_0 \rho_g d$, se obține pentru viteza de cădere, expresia:

$$\omega_0 = \frac{d^2}{18 \mu} (\gamma_p - \gamma_g), \quad (2.54)$$

în care: ω_0 se ia în m/s; d , în m; μ , în N · s/m²; γ_p și γ_g , în N/m³.

Dacă se consideră că particula este din apă, $\gamma_p = \gamma_a$, atunci înlocuind în relația lui Stokes greutatea volumică γ , cu densitatea ρ , în kg/m³ ($\gamma = \rho \cdot g$), se obține:

$$\omega_0 = \frac{d^2 g}{18\mu} (\rho_a - \rho_g) \quad (2.55)$$

Dacă se extrage diametrul din relația lui Reynolds, la limita de aplicabilitate a formulei lui Stokes, adică $Re = 1$ în relația (2.56), rezulta:

$$d = \frac{\mu}{\omega_0 \rho_g} \quad (2.56)$$

Înlocuind expresia (2.56) în ecuația (2.57), se obține:

$$\omega_0 = \left[\frac{\mu g}{18\rho_g^2} (\rho_a - \rho_g) \right]^{\frac{1}{3}}; \quad \omega_0 = 0,817 \left[\frac{\mu}{\rho_g^2} (\rho_a - \rho_g) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.57)$$

Dacă în cazul diferențelor de densitate se neglijează ρ_g în raport cu ρ_a , care se ia egal cu 1000 kg/m^3 și se scoate de sub radical, rezultă expresia:

$$\omega_0 = 8,173 \sqrt[3]{\frac{\mu}{\rho_g^2}} \quad (2.58)$$

în care: ω_0 se exprimă în m/s; μ , în kg/ms; ρ_g , în kg/m^3 .

Luând $Re = 1 = (\omega_0 \rho_g d / \mu)$ și egalând expresiile vitezei ω_0 , rezultate din relațiile (2.47) și (2.54), se obține expresia:

$$d^3 = \frac{18\mu^2}{p_g g (\rho_a - \rho_g)} \text{ sau } d = 1,2243 \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{p_g (\rho_a - \rho_g)}} \quad (2.59)$$

în care: p_g este presiunea din separator, în Pa;

z - factorul de abatere;

R - constanta gazului metan = 518 în J/kg · K;

T - temperatura gazelor din separator, în K;

ρ_g , ρ_a - densitatea gazului, respectiv a apei, în kg/m^3 ;

p_g - presiunea gazului purtător dată de relația:

$$p_g = pz/RT \quad (2.60)$$

Tabelul 2.5. Dimensiunile separatorului calculate în funcție de viteza limită de cădere a particulei

Presiunea, în Pa	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$
Diametrul separatorului, în m	0,93	0,79	0,64	0,55

Prin calculele de dimensionare a separatorului gravitațional, care să asigure separarea particulelor solide și lichide, al căror diametru să ajungă până la 0,02 mm, așa cum rezultă din aplicarea formulei lui Stokes, se obțin dimensiuni foarte mari de separatoare (tab. 2.6) care nu se execută în practica.

În industria extractivă a gazelor naturale se consideră eficiente separatoarele care separă particule până la limita de 0,25 mm, care sunt de circa 10 ori mai mari decât cele calculate cu formula lui Stokes.

Experimental s-a confirmat că separatoarele gravitaționale verticale funcționează mai bine la presiuni mai mari, respectiv atunci când sunt montate în amonte de laminare.

Datorită faptului că, în separatoarele gravitaționale, separarea particulelor se realizează în curent ascendent de gaze, sunt reținute numai particule cu diametre mai mari de 0,2 mm., iar particulele cu dimensiuni mai mici sunt antrenate în masa curentului de gaze. Din această cauză, acest tip de separator are o utilizare din ce în ce mai redusă în schelele de extracție a gazelor naturale.

La un conținut mare de lichide în gaze pot fi folosite separatoarele verticale sau orizontale prezentate în figura 2.13 care, în cazul obținerii unei eficiențe mai mare de separare, pot fi folosite în două sau trei trepte, montate în serie.

Eficiența medie a unor astfel de filtre cameră de decantare este în medie de 60...70%, dar se reduce la 40...45%, pentru particule sub 5 μ m. Pierderile de presiune sunt de 25...35 Pa, iar temperatura nu constituie un impediment.

De aceea, filtrele cameră de decantare se utilizează pentru reținerea particulelor groșiere, constituind de regulă prima treaptă de filtrare.

O variantă a acelor separatoare cu cameră de decantare o reprezintă separatoarele cu impact sau cu jaluzele, la care pierderile de presiune sunt de 5...10 Pa.

2.3.1.2. Separatoarele hidraulice

Pentru creșterea eficienței acestor categorii de separatoare se folosesc separatoarele hidraulice verticale sau orizontale, uneori montate în două, trei trepte sau în serie.

La acest tip de filtre, separarea și reținerea particulelor se bazează pe spălarea gazului, în care sunt particule solide și lichide, cu un curent de fluid (cel mai adesea apă), într-o instalație de tip scuber prin două mecanisme distincte:

- umezirea particulei cu lichidul din scuber (fig. 2.14, a), pulverizat printr-un difuzor în bule mai mici și particule de praf este reținută atunci când traversează linia de demarcație a interfeței lichid-gaz;

- reținerea particulelor de praf umede pe suprafața colectoare, urmată de curățarea suprafeței (fig. 2.14, b). Suprafața colectoare poate fi sub formă de pat (strat) sau simplă, o suprafață umedă.

Scuberele industriale utilizează cele două mecanisme, concomitent cu reducerea pierderilor de apă. O astfel de schemă se prezintă în figura 2.15, unde gazul natural cu impurități 1 intră prin tubul aerometric 2, unde este stropit cu apa brută 3, și trece prin duzele 4, în coloana descendentă 5. Particulele solide sunt reținute de picăturile de apă în rezervorul 12.

La baza coloanei ascendente 6 este stropit din nou cu apă curată 7, din bazinul 8 și trece prin supapele 9, spre etajul de ieșire 10. Înainte de ieșire, gazul natural întâlnește separatorul în șicane 11.

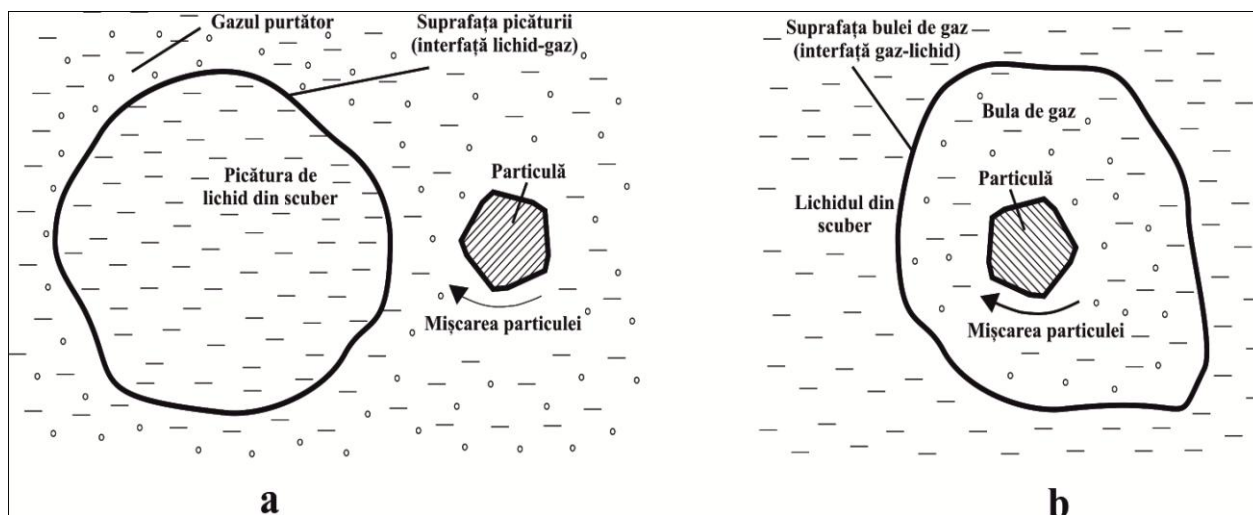


Fig. 2.14. Mecanismul reținerii particulelor în cazul separatoarelor hidraulice:
a - prin umezirea particulei cu lichidul din scuber; b - prin reținerea particulelor umede pe suprafața colectoare

Praful reținut 12, este evacuat în stare umedă sub formă de șlam 13, iar gazul natural filtrat 14, iese prin ajutorul de ieșire 10.

Din cauza pulverizării apei, temperatura la ieșire se reduce și se mărește pericolul de apariție a punctului de rouă acidă.

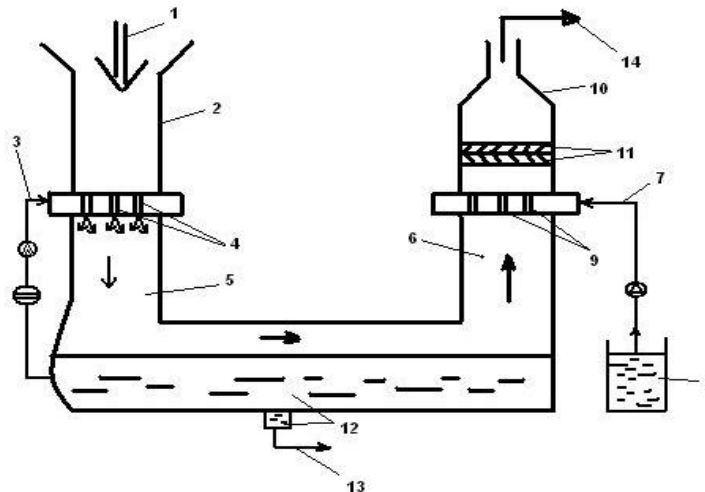


Fig. 2.15. Schema de principiu a unui separator hidraulic:

1 – intrare gaz natural; 2 – tub aerodinamic; 3 – apa brută de stropire; 4 – duze; 5 – coloana descendentă; 6 – coloana ascendentă; 7 – apa curată; 8 – rezervor de apă curată; 9 – supape; 10 – ajutorul de ieșire; 11 – separator cu came; 12 – particule de praf; 13 – șlam; 14 – gaz natural filtrat.

Viteza gazelor este de 4...6 m/s, căderea de presiune de circa 150 Pa dar eficiența este foarte bună (95...99.5%). Acest filtru este eficient și la reducerea SO₂ din gaze, scop în care se introduce în bazinul de apă fie CaCO₃, Ca(OH)₂ sau MgCO₃, care prin reacție cu SO₂ formează sulfatul de calciu CaSO₄ sau sulfatul de magneziu MgSO₄.

2.3.1.3. Separarea lichidului și particulelor solide din gaze, în conductele colectoare și de transport

La curgerea gazelor pe conducte orizontale, direcția de depunere a particulelor lichide și solide este verticală. În mișcarea orizontală, particula în suspensie, care este antrenată în sensul curgerii de către curentul de gaze tinde să se depună cu viteza limită de cădere în gazul respectiv. În acest fel, traiectoria deplasării particulei este orientată spre direcția rezultantei celor două viteze.

Pe porțiunea orizontală a conductei, unde nu există schimbări de direcție, decantarea particulelor se realizează pe o distanță mai mare sau mai mică, în funcție de viteza gazului, de dimensiunile particulelor, de natura acestora și de diametrul conductei.

Pe o conductă, gazul curge cu o viteză ω_g , care poate fi calculată cu următoarea relație:

$$\omega_g = \frac{Fz p_0}{Fp} = \frac{Q \times 0,1013 \times 10^6}{86400 \times 0,785 D^2 p}, \quad (2.62)$$

care devine:

$$\omega_g = 1,494 \frac{Qz}{D^2 p}, \quad (2.63)$$

în care:

q este debitul de gaze, în $m^3 N/s$ (Q în mii $m^3 N/d$);

D - diametrul conductei, în m;

p_0 - presiunea atmosferică, în Pa ($p_0 = 0,1013 \cdot 10^6$ Pa);

p - presiunea din conducta, în Pa; z - factorul de abatere.

Timpul de decantare t , a unei particule, care cade cu viteza limită ω_0 , pe o porțiune de conductă cu diametrul interior D , de lungime l , se poate calcula din relația:

$$\omega_0 t = D / \omega_0 = l / \omega_g, \quad (2.64)$$

de unde:

$$l = D \omega_g / \omega_0, \quad (2.65)$$

în care parametri de calcul sunt exprimați în următoarele unități de măsură: t , în s; D , în m; l , în m; ω_0 și ω_g în m/s.

Astfel, pentru decantarea particulelor din suspensie, cu o viteză de cădere ω_0 , este nevoie de o porțiune orizontală de conductă de lungime l .

Din considerentele prezentate, rezultă că porțiunile orizontale ale conductelor constituie separatoare eficiente pentru lichidul existent în gaze. Pentru ca apa și condensul, separate din gaze, să nu fie antrenate de către curentul de gaze, acestea trebuie eliminate din conductă. Eliminarea menționată se realizează de către acumulatele de lichide care se montează pe conductă (fig. 2.16).

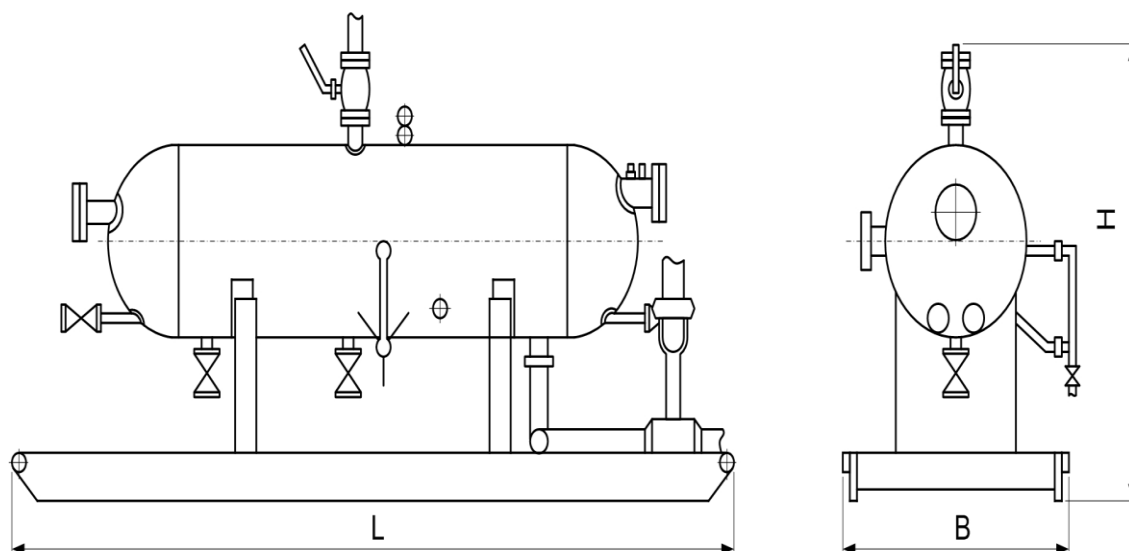


Fig. 2.16. Separatoare orizontale

2.3.1.4. Separarea lichidului și particulelor solide din gaze sub acțiunea forței centrifuge. Separatorul cu ciclon

La acest tip de separator, forța gravitațională de separare a particulelor lichide și solide din gaze este înlocuită cu forța centrifugă. Întrucât aceasta este mult mai mare din cauza razei mici de rotație și a vitezei tangențiale mari, eficiența separării este mărită în mod substanțial.

Pe acest principiu de separare au fost construite separatoare cu ciclon. La început, în schelele de producție de gaze din România s-a folosit, cu rezultate bune, un separator cu un singur ciclon, la care viteza a fost redusă sub 11 m/s. S-a dovedit prin experiențe de șantier și rezultatele experimentale obținute, că la viteze mai mari de 11 m/s, eficacitatea separatorului scade.

Separatorul acesta inerțial poate avea unul sau mai multe cicloane. În figura 2.17 este reprezentat un separator cu ciclon, care are o manta exterioară în care se introduc elementele de centrifugare (cicloanele). Atât mantaua, cât și cicloanele pot fi scoase pe la partea superioară prin deșurubarea inelului de solidarizare de manta.

Gazele sunt introduse în ciclon, lateral, prin canalul elicoidal, cu o viteză tangențială de până la 11m/s. Datorită forței centrifuge, particulele solide și lichide sunt antrenate și se lipesc de mantaua interioară. Forma elicoidală a canalului de centrifugare determină ca, pe lângă viteza tangențială, să se imprime gazelor și o viteză de coborâre.

După centrifugare, gazele intră în țeava centrală a separatorului, unde viteza ascendentă este mult mai redusă decât viteza de coborâre în elementul de centrifugare. Din această cauză, particulele solide și lichide, care după separare s-au lipit de manta, se vor scurge fără nici un impediment, într-un rezervor de presiune înaltă, confecționat, de obicei, dintr-o țeava de înaltă presiune, în care se vor decanta apa și impuritățile solide.

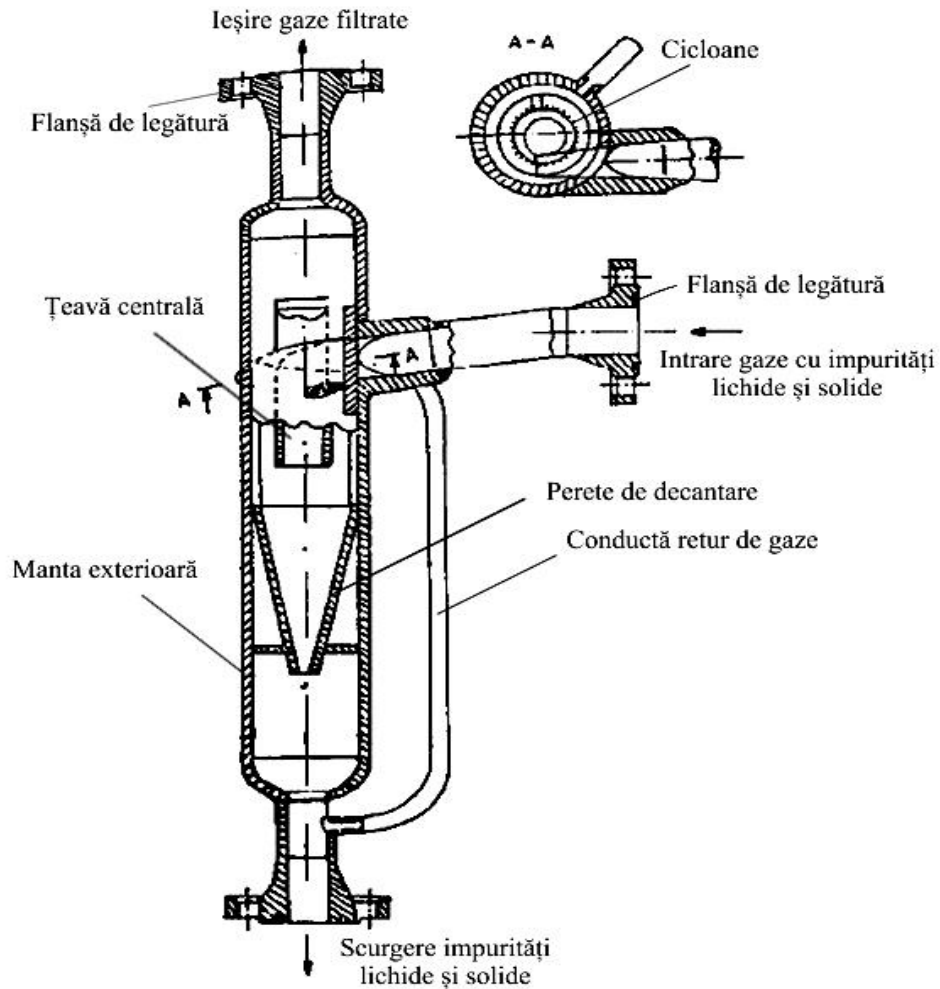


Fig. 2.17. Separatoare cu ciclon

Forța centrifugă ce acționează asupra particulelor F_c este de forma:

$$F_c = k_c \frac{m_p \cdot v^2}{R}, \quad (2.66)$$

în care:

m_p este masa particulei, în kg;

v – viteza particulei, în m/s;

R – raza de curbură, în m;

k_c – coeficient de proporționalitate ce include și el diferența dintre masa specifică a particulelor și cea a aerului și mărimea particulelor.

Mărimea particulelor colectată de cilindru d_p , este dată de relația:

$$d_p = \sqrt{\frac{9\eta R}{\pi N_c v (\rho_p - \rho_g)}}, \quad (2.67)$$

unde:

d_p este diametrul particulei colectate, în m;

η – vâscozitatea dinamică a gazului, în kg/ms;

R – raza de curbură a ciclonului, în m;

N_c – numărul de vârtejuri ale ciclonului (de obicei $N_c=5$);

v – viteza gazului la intrare, în m/s;
 ρ_p, ρ_g – densitatea particulelor, respectiv a gazelor naturale.
 Eficiența unui ciclon β se calculează cu relația:

$$\beta = \frac{\rho_p d_p (R_e - R_i)}{\eta \cdot R_e} \cdot v \cdot k_\psi, \quad (2.68)$$

în care:

R_e, R_i sunt razele exterioare și respectiv interioare a ciclonului, în m;

k_ψ – factor de formă ce ține seama de distribuția diametrului particulelor.

Căderea de presiune în ciclon sau multiciclon este de aproximativ 30...80 Pa.

Un alt tip de separator centrifugal este cel multiciclon, cu pat filtrant care poate fi folosit pentru producții mari de până la 20×10^6 m³/d (fig. 2.18). Eficacitatea lui în separarea apei din gaze ajunge până la 99,5%.

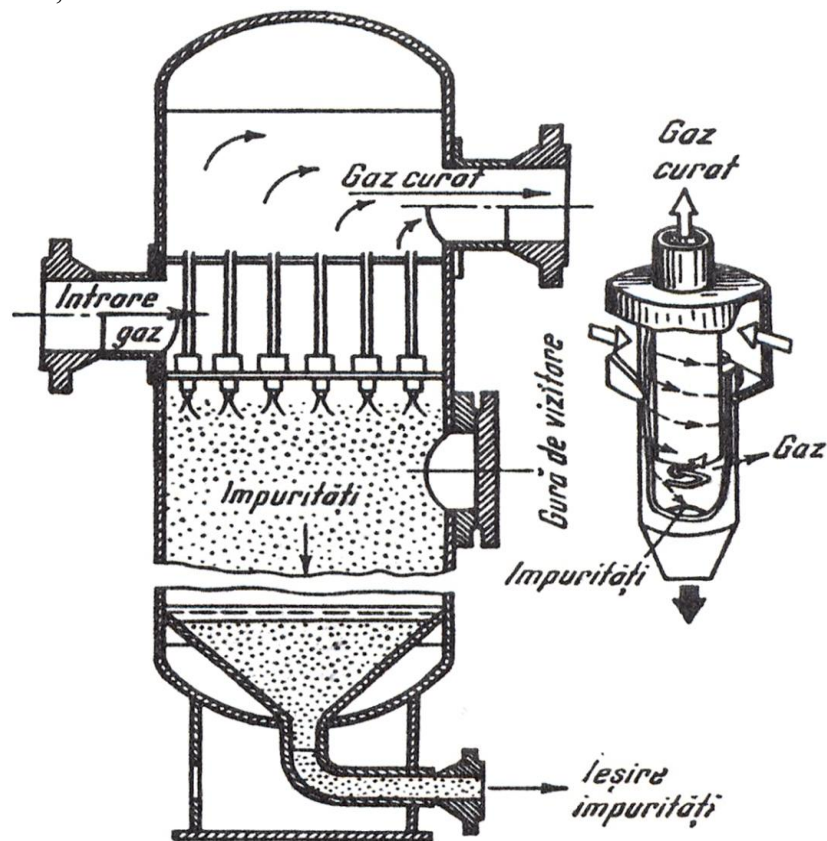


Fig. 2.18. Separator multiciclon

2.3.1.5. Separarea lichidului și particulelor solide din gaze sub acțiunea combinată a forțelor centrifuge și gravitaționale. Separatorul orizontal cu țevă spirală

Din analiza diverselor tipuri de separatoare verticale, s-a constatat că cea mai bună separare se obține atunci când direcțiile de cădere a particulelor și de mișcare a gazelor sunt perpendiculare. Această condiție este realizată în conductele de transport gaze.

În cazul sondelor cu presiuni relativ mici în raport cu cele din conductele de transport, nu este necesară o încălzire a gazelor după laminare. Efectul răcirii, la trecerea prin duză, provoacă, în general, o condensare a apei de saturație din gaze și de aceea este preferabil ca separarea să se facă după laminare.

Separatorul cu ciclon, cu viteza tangențială maximă de 11 m/s, a fost proiectat să funcționeze, la sonde cu presiune mare, montându-se înainte de laminarea gazelor.

Separatorul orizontal cu țevă spirală a fost conceput să realizeze avantajele separării gravitaționale pentru debite relativ mici și ale separării centrifuge la debite mari, dar fără a avea și neajunsurile separatorului gravitațional vertical.

Separatorul orizontal cu țevă spirală este alcătuit din următoarele părți componente:

-corpul cilindric orizontal, confecționat din țevă $D=20$ in cu grosimea peretelui de 10-13 mm, în lungime de 1,64 m.;

-țevă spirală ce se confecționează la cald din bucăți de țevă de conductă cu $D=4$ in, care se îmbină între ele prin sudare. Spira are un diametru mediu de 960 mm. Toate spirele se sudează în mantaua corpului cilindric. Fiecare spiră a țevii spirale este alcătuită dintr-o fantă dreptunghiulară cu dimensiunile 40x60 mm, prin care se asigură comunicația cu corpul orizontal.

Dispozitivul de siguranță al separatorului este fixat la capătul superior al ultimei spire. Acest dispozitiv este echipat cu o membrană de alamă subțire, calculată astfel ca să poată ceda în momentul când presiunea din separator depășește valoarea maximă admisibilă.

Separatorul are o ușoară înclinare în direcția scurgerii, gazele care intră în țeava spirală, printr-un ștuț de 4 in, sunt supuse la o mișcare de rotație. Particulele lichide și solide în suspensie, datorită forței centrifuge imprimată, sunt proiectate și se lipsesc de mantaua țevii spirale. Din țeava spirală, gazele pătrund în corpul cilindric prin cele 4 fante dreptunghiulare. Viteza tangențială a gazelor, care este maximă în prima spiră, scade după fiecare învârtitură, în raport cu cantitățile rămase în țeava spirală în urma trecerii gazelor în corpul cilindric prin fantele anterioare. Țeava spirală este montată la un capăt al corpului cilindric, în timp ce țeava de ieșire din separator este fixată la celălalt capăt. Gazele, după ce au trecut prin țeava spirală intră în corpul orizontal al separatorului prin fantele de comunicație, își schimbă direcția de mișcare, îndreptându-se către ștuțul de ieșire a gazului cu diametrul de 4 in.

Viteza gazului în mantaua cilindrică crește după fiecare fantă. În acest mod, acțiunea forței centrifuge devine eficientă chiar din primele două spire.

În corpul cilindric al separatorului, particulele în suspensie, antrenate de curentul de gaze în mișcare orizontală, vor cădea, sub efectul suprapus al acțiunii forței gravitaționale, cu viteza lor limită de cădere.

2.3.1.6. Separatorul orizontal îngropat (acumulatorul subteran de lichide)

Acest tip de separator este utilizat cu precădere la sondele de gaz metan. La acest tip de separator, apa separată din gaze se acumulează în corpul inferior, de unde este descărcată într-un bazin special amenajat. În continuare, apa poate fi pompată la o stație de injecție sau - în cazul în care conține și hidrocarburi lichide - la o stație de epurare și apoi se injectează, prin sonde, în diferite acvifere situate la adâncimi pe cât posibil mai mici, fără a polua însă pânzele de apă freatică.

Separatorul orizontal îngropat se construiește din burlane de foraj, al căror diametru, în funcție de presiunea de lucru a sondei, poate fi de 6...14 bari. Acesta se construiește în doua variante: A - bietajat și B - trietajat. Ștuțurile de legătură dintre corpurile separatorului (dintre etaje) sunt de 4...6 in.

2.3.1.7. Separatorul orizontal cu paravan de ceață

La acest tip de separator (fig. 2.19), pe lângă forțele de inerție, frecare și gravitație ce acționează în cazul acumulatorului de lichide, mai apare și forța adezivă a picăturilor de apă pe împletiturile de sârmă ale paravanului.

Viteza gazelor în secțiunea liberă a plasei de sârmă, care constituie paravanul de ceață, trebuie să fie astfel aleasă, încât presiunea dinamică de antrenare a picăturilor de apă să fie inferioară forței de adeziune la plasă.

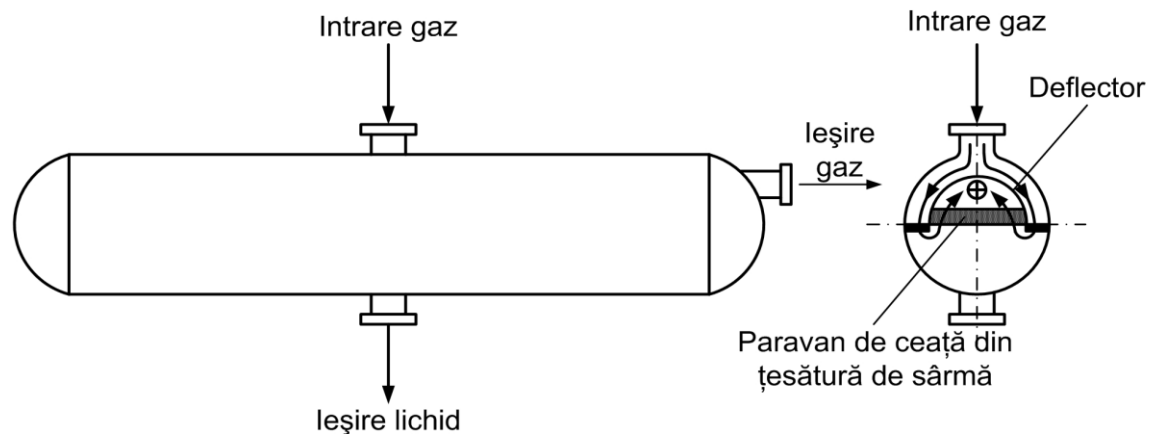


Fig. 2.19. Separator orizontal cu paravan de ceață

În loc de împletitura de sârmă mai pot fi utilizate plăci înclinate, cu canale, care constituie un deflector mai eficient al curentului de gaze saturate.

2.3.1.8. Separatorul vertical cu paravan de ceață din inele ceramice

La acest tip de separator se folosesc inele Rashing. În loc de împletitură de sârmă, inele care prezintă avantajul că se pot extrage și curăța mai ușor de impurități și într-un timp mai scurt.

Datorită rezultatelor nesatisfăcătoare date de separatoarele de gaze s-au construit diferite tipuri de separatoare, însă această diversitate a scos și mai mult în evidență ineficiența procesului de separare indiferent de principiul folosit - separatoare centrifuge, gravitaționale, de adeziune etc. Din această cauză a apărut necesitatea ca separarea să fie completată cu o deshidratare a gazelor.

2.3.2. Unele considerații privind îndepărtarea prafului prin filtrare

Printre procedeele cunoscute sau folosite pentru eliminarea prafului din gaze se pot enumera:

- ✓ decantarea (separarea gravimetrică);
- ✓ separarea prin reducerea bruscă a vitezei;
- ✓ centrifugarea;
- ✓ spălarea;

- ✓ filtrarea;
- ✓ separarea în câmp electric;
- ✓ coalescența.

2.3.2.1. Decantarea

Decantarea sau separarea pe baza diferenței de densitate, constă în trecerea gazelor printr-o încăpere ale cărei dimensiuni sunt astfel calculate încât viteza medie de curgere a gazelor să scadă sub limita de la care particulele, cele mai mici care se cer a fi separate, încep să fie antrenate, respectiv timpul de rămânere în cameră să fie mai mare decât timpul necesar ca particulele de praf, care se găsesc în partea superioară a curentului de gaze, să se depună, să ajungă până la baza decantorului.

În general, pentru decantarea unor particule mai mici de $50\mu\text{m}$, dimensiunile camerei devin prohibitive. Căderea de presiune în astfel de decantoare este neglijabilă.

2.3.2.2. Separarea prin reducerea bruscă a vitezei

Se bazează pe faptul că, la o reducere bruscă a vitezei, particulele de praf, având o inerție mai mare decât cele de gaz, nu pot urmări, cu aceeași ușurință, schimbările de direcție, necesare pentru evitarea obstacolelor interpușe în calea fluxului de gaze, de aceea se desprind și cad.

Dacă în calea unui flux de gaze se interpune o bară (fig. 2.20) în timp ce liniile fluxului de gaz se vor mula pe periferia barei, ocolind-o, liniile particulelor de praf vor fi modificate, în preajma barei, față de cele adoptate de gaz.

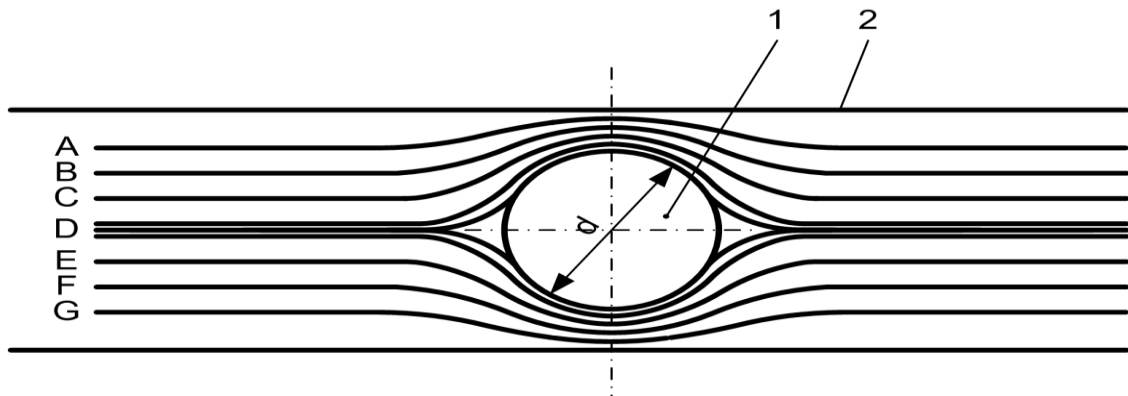


Fig. 2.20. Aliura liniilor de flux de gaze și a liniilor particulelor de praf la întâlnirea unei bare interpușe în calea curentului de gaze: 1 – bară de reținere; 2 – conductă de gaze A,B...G – liniile traiectoriilor de curgere a gazului și impurităților

În timp ce particulele de praf purtate în liniile A și G vor adopta numai forma modificată împreună cu cele ale gazelor, particulele purtate în curentul de gaz care urmează liniile B, C, D, E și F (conform schemei ilustrative din figura 2.20) vor întâlni bara, vor fi oprite, iar în

timpul ciocnirii, energia lor cinetică se va transforma în energie potențială, înmagazinată în bară, și vor cădea pe peretele conductei.

În practică, pentru ca, în cădere, particulele de praf să nu fie antrenate din nou de curentul gazos, pentru ca un separator bazat pe acest principiu să fie eficace, sunt necesare numeroase și bruște schimbări de direcție așa cum se vede în figura 2.21.

Pentru ca separatoarele bazate pe acest procedeu să aibă o eficacitate satisfăcătoare sunt necesare viteze cât mai mari ale curentului de gaze, de regulă peste 20 m/s, respectiv ele lucrează cu o cădere de presiune apreciabilă de ordinul a 10...15 mbar (aproximativ 100...150 mm H₂O). Pentru acest motiv nu pot fi utilizate la căderi de presiune de peste 10...20 mbar, o separare mai adâncă depășind posibilitățile procedului.

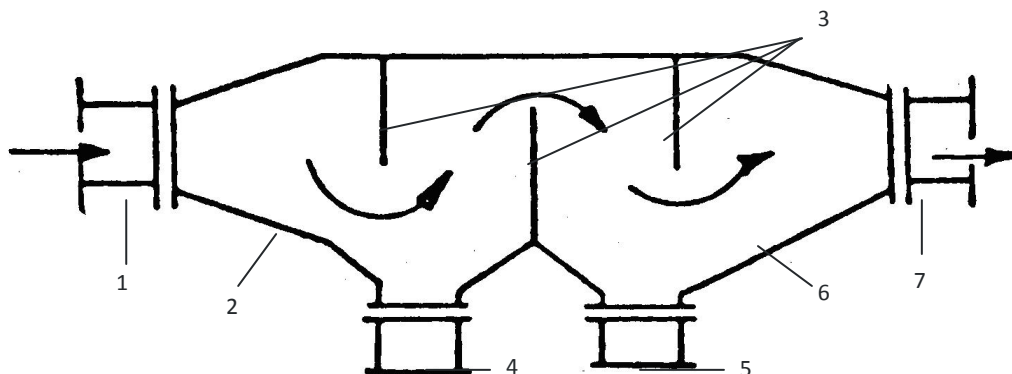


Fig. 2.21. Cameră pentru sedimentarea prafului:

1 – intrare gaze naturale; 2 – corp destindere; 3 – pereți de reținere;
4,5 – colectoare de praf; 6 – corp separator; 7 – ieșire gaze naturale filtrate

Instalațiile bazate pe acest procedeu se pot folosi înaintea filtrelor cu cartuș filtrant, pentru o eliminare prealabilă a particulelor cu diametre mai mari. Se menționează însă că ele au un cost relativ ridicat.

Procedeu în care eliminarea prafului se bazează pe supunerea particulelor de praf la acțiunea forței centrifuge se aplică, în special, în așa-numitele separatoare ciclon.

În figura 2.22 se vede schema de principiu a funcționării unui separator ciclon. Se observă dubla spirală, una exterioară, descendentă, alta interioară, ascendentă, pe care o parcurge gazul în separator, unde au loc și mișcări turbionare și frecări pe pereți. În timpul rotirii, apare o forță centrifugă (dată de produsul dintre masă și accelerația centrifugă) mult mai mare pentru particulele de praf, care au densitate mai mare, decât pentru gaz. Această forță centrifugă poate depăși de 5 ori, la viteze mici, în cicloanele cu diametru mare, și de 2500 ori, în cicloanele cu diametre mici, nivelul accelerației normale a căderii libere. În acest fel, particulele de praf capătă o viteză radială, în raport cu gazul, se separă și sunt proiectate pe perete, de unde cad la fundul vasului.

Cicloanele au o gamă foarte largă de parametri funcționali:

- presiuni, de la câteva zeci de milibari (sute de mm coloană H₂O) până la câteva sute de bari;
- temperaturi, de orice mărime întâlnite în practică;
- viteze, până la 50 m/s, depinzând, evident, de viteza gazelor în conductă la presiune joasă, pentru a menține căderea de presiune în limite rezonabile, pentru că nu se pot depăși 10...20 m/s;
- adâncimi de separare diferite, până la a elimina complet particulele de 5μm și 80...85% din particulele de 3μm, în acest caz cu instalații de concepție specială (multicicloane);
- căderi de presiune de 10...12 mbar (aproximativ 100...120 mm coloană H₂O) pentru cicloane simple, funcționând în limitele presiunii joase, sau între cele ale presiunii intermediare, respectiv, circa 60 mbar (aprox. 600 mm coloană H₂O) pentru cicloane montate

pe conducte de transport. Pentru presiune medie sau redusă, căderea de presiune poate avea valori între aceste limite, în raport de viteza adoptată și adâncimea de separare cerută.

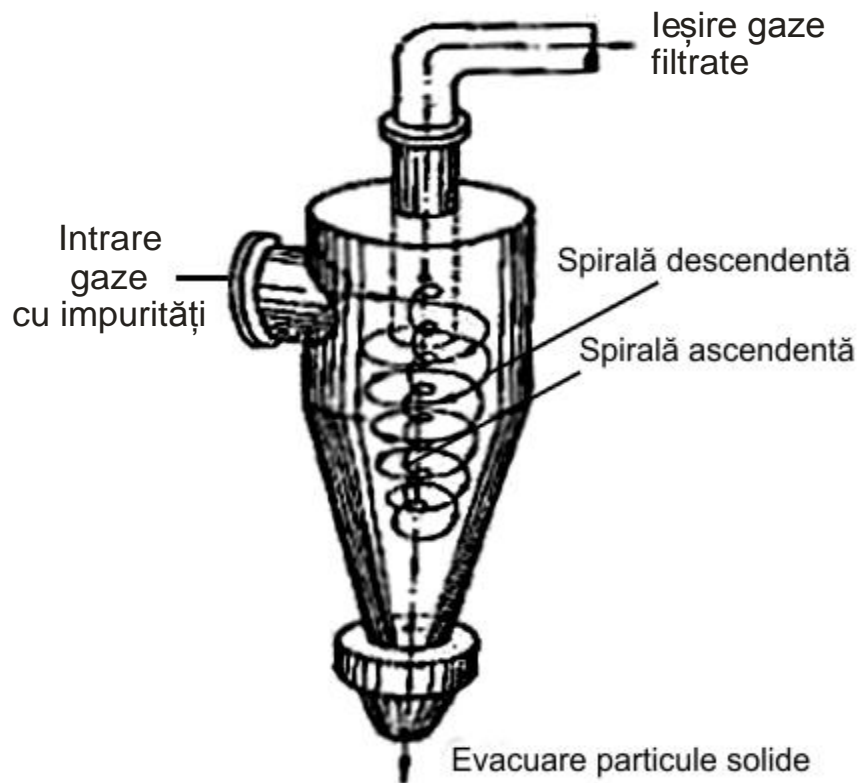


Fig.2.22. Separator tip ciclon

2.3.2.3. Eliminarea prafului prin spălare

Se referă (fig. 2.23) la trecerea gazelor pe suprafața unui rezervor cu ulei ușor, al cărui nivel trebuie riguros controlat și menținut. Gazul, intrând cu viteză, antrenază particule de ulei cu care formează o ceață sau o spumă de ulei la care particulele de praf aderă și în care se aglomerează. Din compartimentul cu ceața de ulei, gazele trec prin două rânduri de șicane, în care uleiul (cu particulele de praf colectate) este reținut și, prin două sonde de scurgere, întors, de pe talerele pe care a fost separat, în rezervor.

Desprăfuitoarele prin spălare au un foarte bun randament de separare, dar trebuie să funcționeze într-un regim strict delimitat de debite și viteze. În cazul că viteza gazului depășește limita prescrisă, există riscul ca uleiul, cu praful colectat, să fie antrenat dincolo de șicanele de dezuleiere, cu pierdere de ulei și cu scăderea eficacității de desprăfuire. Dacă viteza este sub limita prevăzută, spălarea, respectiv reținerea prafului, se face cu un randament nesatisfăcător.

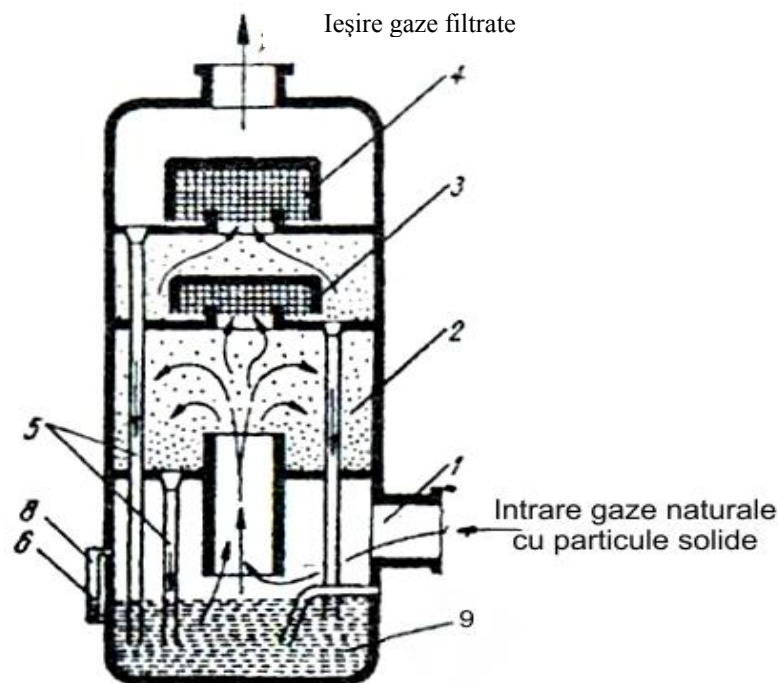


Fig. 2.23 Desprăfuitor prin spălare:

1-intrarea gazului; 2-ceață de ulei; 3-separator primar de ulei; 4 – separator secundar de ulei; 5-țevi de scurgere; 6-nivelul uleiului; 7-ieșirea gazului filtrat; 8-indicator de nivel; 9 – rezervor de ulei.

2.3.2.4. Filtrarea în strat poros (totală)

Este operația în care reținerea particulelor de praf se realizează prin trecerea gazelor prin suprafețe poroase, ale căror interstii (pori) au dimensiuni stabilite în funcție de adâncimea de separare dorită, toate particulele cu dimensiuni mai mari, și unele cu dimensiuni mai mici, fiind reținute pe suprafață poroasă a elementului filtrant. După materialul folosit ca element (cartuș) filtrant, se disting: filtre cu diferite tipuri de țesături, filtre cu fetru, filtre ceramice, așa-zisele paturi filtrante, constituite din straturi de nisip, pietriș etc.

Pentru numeroasele lor avantaje, filtrele au largă răspândire în transportul și distribuția gazelor. Adâncimea lor de filtrare este foarte mare, putând ajunge la eliminarea a peste 99% din particulele de praf fine. Pentru aceasta, eliminarea prafului reținut pe cartușul filtrant cere, în timpul exploatării, o demontare periodică a acestuia, înlocuirea și curățirea lui. Este motivul pentru care se preferă să se monteze filtre în treapta a II-a de filtrare, după ce particulele grosiere au fost eliminate prin alt procedeu de eliminare a prafului, de exemplu folosind acțiunea forței centrifuge, în cicloane.

Cu toate acestea se folosesc, în unele țări, mai ales pe conductele de transport, filtre cu dimensiuni importante, în special cu element filtrant din materiale ceramice.

Particulele de praf, conținute în gaz, fiind proiectate pe elementul filtrant, oferă acestuia, în afară posibilității de reținere a prafului în interstii și o separare, prin reducerea bruscă a vitezei, datorită izbirii acestora de peretele elementului filtrant.

În cartușele din țesătură, compuse fie din saci montați în poziție verticală fie din suprafețe plane de țesătură montate pe un cadru, vitezele sunt limitate, în general, la 0,5...4 cm/s, sau 0,5...4 cm³ (de gaz)/s.cm² (de țesătură), iar căderile de presiune la 5...15 mbar (aproximativ 50...150 mm coloană H₂O). Vitezele prea mari determină colmatarea rapidă a cartușului. Pentru aceea, când gazele conțin particule foarte fine de praf, vitezele trebuie limitate la 1,5 cm/s.

Vitezele fiind mici, curgerea gazelor prin cartușele de țesături și prin stratul de praf depus pe suprafața cartușului, este laminară. În acest caz numărul $\frac{\rho_g \omega_o}{\eta}$ trebuie să fie mai mic decât 30.

Căderea de presiune Δp , prin țesătura cartușului, este dată de o relație de forma:

$$\Delta p = K \omega_o \eta, \quad (2.69)$$

în care: Δp este căderea de presiune, în μ bari (10^{-1} N/m² sau 10 mm coloană H₂O);
 ω_o - viteza gazelor în raport de suprafața filtrantă, presupusă goală, în cm/s;
 η - vâscozitatea dinamică a gazelor, în Poise (g/cm s);
 K – constantă ce exprimă raportul suprafeței față de debit, în cm²/cm³.

În tabelul 2.6 se dau câteva valori ale lui K, pentru câteva materiale de țesături folosite pentru filtrarea gazelor naturale.

Ținând seama de faptul că porii țesăturii sunt înfundați de primele particule de praf reținute, K va crește foarte repede putând ajunge la valori de peste 10 ori mai mari decât cele din tabel.

Pentru praful uscat, dacă grosimea stratului depășește 1,5 mm, ceea ce înseamnă de ordinul a 0,4 g praf pe cm² de țesătură, aproape în totalitate, căderea de presiune va fi datorită trecerii gazelor prin stratul de praf depus, respectiv căderea de presiune în țesătură devine neglijabilă față de aceea produsă în stratul de praf.

Tabel 2.6. Valori ale lui K pentru câteva tipuri de țesături folosite la construcția filtrelor

Țesătura	Mărimea porilor [mm]	Numărul de fire pe cm ² (în medie)	Diametrul firelor [mm]	K
Bumbac	0,25	12,6x11	0,5	2550
Bumbac	0,25	26,8x15,7	0,25	450
Lână		15,7x19,6	0,35	1640
Nailon		28,4x77,5	0,25	3340
Sticla		12,6x11	0,75	8000

Îndepărtarea prafului reținut în țesătură se face, după scoaterea cartușului colmatat și înlocuirea lui cu unul curat, prin scuturare.

Se poate folosi și suflarea cu aer, în sens invers față de curentul de gaz, după scoaterea din funcțiune a filtrului. Pentru a facilita aceste operații se recomandă montarea a doua filtre, în paralel.

Cartușele din fetru au, de regulă, formă cilindrică, gazele intrând, de cele mai multe ori, prin interiorul cartușului. Fetru pentru cartuș poate fi confecționat din fibre de bumbac, lână, nailon, sticlă etc., ale căror caracteristici, specifice, le fac utilizabile în medii neutre, în medii corozive, acide sau alcaline, în medii abrazive etc.

În filtrele cu cartușe din fetru vitezele pot atinge 2,5...15 m/s sau cm³ gaz/s/cm² (fetru) dar, din cauza căderilor de presiune care pot deveni importante, și a colmatărilor rapide, se preferă să nu se depășească 7...8 m/s. Filtrele cu fetru sunt concepute pentru ca să funcționeze cu o cădere de presiune sub 10 mbar (aprox.100 mm coloană H₂O) și este, în orice caz, de evitat o funcționare cu o cădere de presiune care depășește 15 mbar.

De obicei, aceste filtre sunt concepute pentru reținerea particulelor fine de praf și anume pentru gaze care conțin o cantitate redusă de praf, între 0,1 și 1,6 g/m³ dar se citează că se

poate ajunge pentru situații particulare chiar la 80 g/m^3 . Cu toate acestea nu se recomandă folosirea acestui tip de filtru pentru gaze cu conținut mare de praf, pentru că aceasta duce la colmatarea foarte frecventă a cartușelor cu necesitatea de a le demonta și a le curăța, operație care, repetată des, devine stânjenitoare. Ca și la filtrele cu țesătură, curățirea se poate face și prin suflarea unui curent de aer comprimat, în sens invers sensului de trecere a gazului, evident cu scoaterea din funcțiune a filtrului.

În transportul și distribuția gazelor, filtrele cu fetru sunt recomandabile mai ales în treapta a II-a, ca filtre fine, după ce particulele grosiere au fost îndepărtate prin alte procedee. Se preferă montarea lor combinată, cu cicloane, în treapta I-a.

Filtrele *ceramice* beneficiază de randamentele înalte de filtrare, putând elimina, practic, totalitatea particulelor de praf conținute în gaze. Au, de asemenea, avantajul că particulele de praf nu pătrund în profunzimea materialului ceramic, ceea ce ușurează curățirea care se poate face prin spălare cu apă sub forma unui jet puternic, curățire cu peria și uscare cu aer.

Filtrele ceramice se prezintă, în general, sub forma de coloană (tub) sau bujie, fixate pe o placă. Ele sunt parcurse, de către gaz, de obicei, de la exterior la interior, pentru ușurința curățirii exteriorul fiind mai accesibil.

Căderea de presiune, într-un filtru ceramic, depinde atât de dimensiunile porilor, cât și de structura granulometrică a materialului din care este confecționat și poate fi, în mod curent pentru debite situate între $80 \dots 100 \text{ m}^3 \text{ N/h}$, pe un element (un tub), pentru granulometrie de 30 (microni) și cădere de presiune sub 10 mbar (aprox. 100 mm coloană H_2O),

Căderea de presiune crește rapid când porii se colmatează. De exemplu, pentru o suprafață filtrantă de cca. 1930 cm^2 , după experiențele lui Herning, în raport de cantitatea de praf depusă pe elementul filtrant, creșterea căderii de presiune, față de cea rezultată pentru elementul curat, este dată de tabelul 2.7.

Tabelul 2.7. Creșterea căderii de presiune pe măsura calmatării elementului filtrant

Granulometria materialului ceramic [μm]	Când cantitatea de praf depusă pe elementul filtrant crește	Raportul $\frac{\Delta p_{\text{colmatat}}}{\Delta p_{\text{crește}}}$
10	0...20 g	de la 1 la 1,67
20	15...35 g	de la 2,2 la 4,5
30	17...30 g	de la 2 la 3,4
40	15...40 g	de la 1,2 la 2

După spălare cu peria și jet de apă, căderea de presiune revine aproape de nivelul la care se găsește la un element filtrant nou. Curățirea numai cu peria nu este satisfăcătoare, căderea de presiune, după o asemenea curățire, rămânând la un nivel foarte ridicat față de cea a unui element nou. Câteva dintre modele de filtre totale utilizate în distribuția și transportul gazelor din SNTGN sunt prezentate în figurile 2.24, 2.25 și 2.26.



Fig. 2.24 Filtru de gaz de tipul FG 25



Fig. 2.25 Filtru de gaz de tipul FGN Dn300 pn25



Fig. 2.26 Filtru de gaz de tipul FGN Dn300 pn25

2.3.2.5. Filtrele electrostatice

Realizează separația prafului prin ionizarea gazelor purtătoare a particulelor solide și prin urmare, tensiunea de lucru a acestora este ridicată. Ele lucrează prin încărcarea prafului cu ioni și apoi colectarea particulelor ionizate pe o suprafață colectoare, de formă tubulară sau plată, care este apoi curățată de obicei prin răzuire. Ionizarea are loc sub acțiunea unei tensiuni electrice înalte, care depășește constanta dielectrică a gazelor în vecinătatea electrozilor de ionizare, producând fenomenul corona.

Prin urmare, electrofiltrul este format din electrozi de ionizare și electrozi de depunere, după forma electrozilor acestea putând fi cu plăci (fig. 2.27) și tubulare (fig. 2.28). Filtrele cu plăci sunt ca niște condensatori plani, alcătuiți din electrozii de depunere 1, între ei fiind poziționați electrozii de ionizare 2, izolați și legați la minus (-). Circulația gazului natural cu impurități 3 este orientată printre plăci, particulele de praf 4 fiind ionizate ajung pe electrozii de depunere rămânând fixate până la întreruperea curentului, după care se îndepărtează prin răzuire sau prin vibrație. În mod analog funcționează și electrofiltrul tubular.

Pentru creșterea eficienței electrofiltrelor, acestea sunt prevăzute cu mai multe zone de lucru, alimentate electric, independent pentru mărirea fiabilității. Schema de principiu a unui electrofiltru cu trei zone de lucru este prezentată în figura 2.29.

Pentru reținerea combinată a prafului și a altor substanțe gazoase nocive se folosesc filtre electrostatice umede, la care are loc mai întâi stropirea gazului natural impurificat.

Separarea în câmp electric a particulelor de praf comportă:

- trecerea gazului printr-un câmp electric pentru ionizarea moleculelor sale;
- moleculele de gaz, ionizate, trebuie menținute în câmp un interval de timp suficient de mare pentru ca particulele de praf să capete suprafața de colectare în câmp electric ;
- particulele de praf, conținute în gaz, expuse contactului cu moleculele de gaz ionizate colectează ioni, devin încărcate cu sarcini electrice și se deplasează sub acțiunea câmpului electric;
- prevenirea reantrenării particulelor de praf colectate și separate sub acțiunea câmpului electric;
- îndepărtarea prafului colectat.

Există filtre electrostatice, cu un singur etaj, în care ionizarea și colectarea sunt combinate, și filtre în două etaje, în care ionizarea și colectarea se realizează în părți diferite ale aparatului.

Performanțele filtrelor electrostatice sunt deosebit de bune deoarece:

- adâncimea de separare ajunge, fără dificultăți, la 99,9%;
- consumul de curent electric este de ordinul a 0,12...0,35 Kw/h/1000 m³/h gaz tratat;
- căderea de presiune, datorită, în special, îngustării sau, respectiv, lărgirii, de secțiune la intrare, respectiv la ieșire, este de ordinul a 1...2,5 mbar;
- diferențele de potențial folosite se situează între 30.000...160.000 V;
- viteza gazului în separator: 1...3m/s, destul de redusă, pentru prevenirea riscului de reantrenare a prafului;
- durata de rămânere a gazului în separator: între 1...145 s (după adâncimea de separare impusă și mărirea particulelor de praf);
- se folosește curentul alternativ obișnuit, a cărei tensiune este, mai întâi, ridicată, cu ajutorul unui transformator, după care se face redresarea cu ajutorul unui redresor mecanic sau electronic.

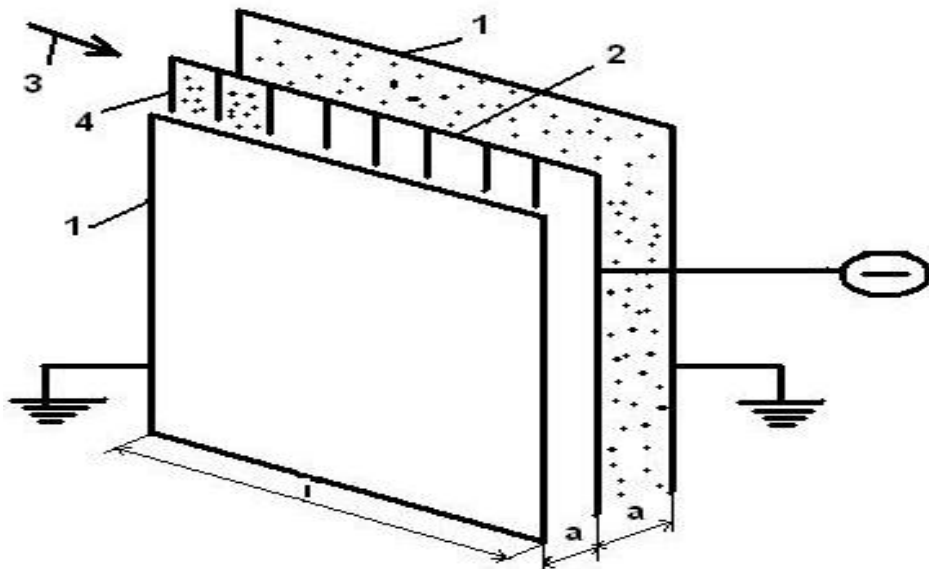


Fig 2.27. Schema de principiu a unui electrofiltru cu plăci:
 1 – electrozi de depunere; 2 – electrozi de ionizare; 3 – gaz natural cu impurități; 4 – particule de praf ionizate; a – distanța dintre electrozii de ionizare și cei de depunere; l – lungimea activă a electrozilor de depunere.

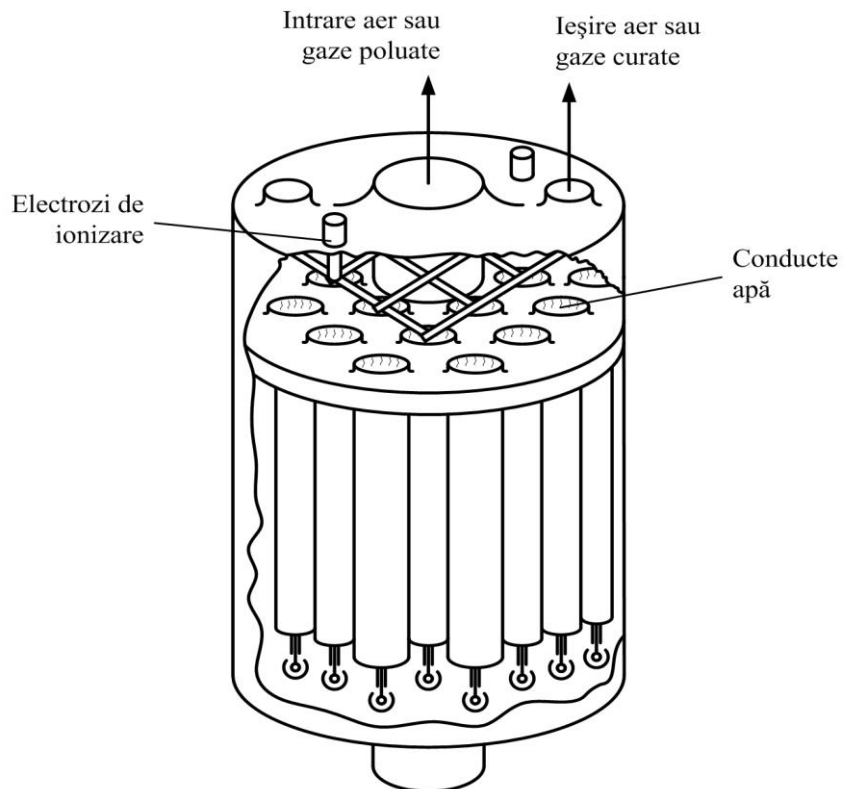


Fig. 2.28. Filtru electrostatic umed

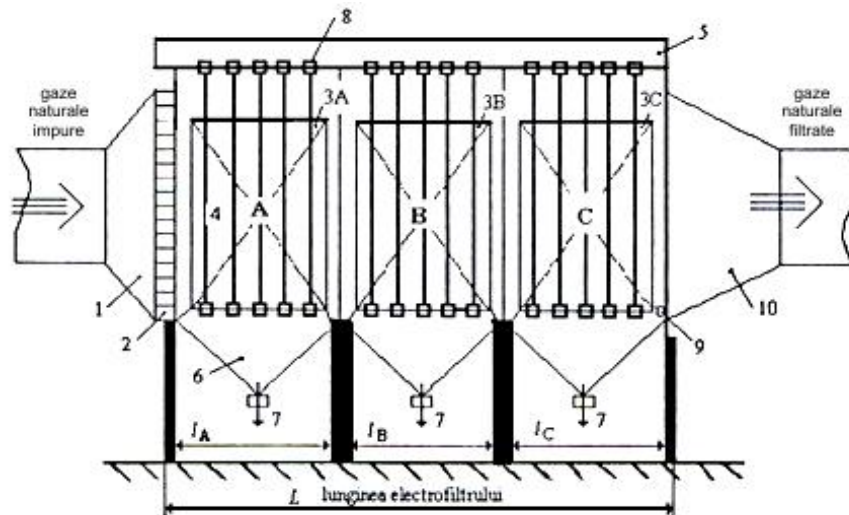


Fig. 2.29. Schema de principiu a unui electrofiltru cu trei zone:
 1 – palnie difuzoare; 2 – dispozitiv de linistire si uniformizare a curgerii;
 3A, 3B, 3C – electrozi de depunere grupati in cele 3 tronsoane (A, B, C);
 4 – electrozi de ionizare; 5 – cadre de intindere a barelor de ionizare; 6 – camere de colectare praf; 7 – evacuare praf; 8 – izolatorii electrozilor de ionizare; 9 – dispozitiv de scuturare a electrozilor de ionizare prin ciocănire sau vibrare periodică; 10 – confuzor de evacuare a gazelor curate.

- se folosește curentul alternativ obișnuit, a cărei tensiune este, mai întâi, ridicată, cu ajutorul unui transformator, după care se face redresarea cu ajutorul unui redresor mecanic sau electronic.

Separatoarele electrostatice pot lucra la temperaturi și presiuni ridicate, până la 650⁰C și, respectiv, până la 10 bar. Ele sunt scumpe. Cu titlu de comparație, cu cifrele, indicative, menționate pentru procedeele anterioare, costul lor este mai mare (Tab. 2.8).

Tabelul 2.8. Costul utilizării unui electrofiltru funcție de eficiență

Costul pe m ³ /minut de gaz tratat [euro]	Pentru o eficacitate de:
15	90%
18	95%
30	98%
45	99%
60-75	99%

2.3.2.6. Separarea particulelor prin coalescență

Este o metodă care se referă la aglomerarea particulelor de dimensiuni foarte mici, de sub 1μm, având în vedere că dacă particulele de 1...5μm sunt greu de eliminat, cele sub 1μm cad cu totul în afara posibilităților procedeele expuse înainte. De aceea, s-a încercat adăugarea unui aerosol care sub influența unor vibrații acustice (ultrasonice), cu frecvențe mari, se produce aglomerarea particulelor de aerosoli între ele și cu particulele de praf conținute în suspensie, constituindu-le, astfel, în particule mari, ușor de eliminat. Această aglomerare se numește coalescență.

Consumul de energie este ridicat, de ordinul a aproximativ 2Kw h pentru 1000 m³/h gaz tratat, iar căderea de presiune ajunge la 50...60mbar (cu aproximativ 500...600 mm coloană

H₂O). Aparatura este, însă, simplă, nu prea costisitoare și robustă. Procedul nu a căpătat o dezvoltare industrială, fiind abia la începuturile aplicării sale și fiind foarte scump.

2.3. COMPARAȚIA ÎNTRE SISTEMELE DE FILTRARE (DESPRĂFUIRE)

La alegerea sistemului de desprăfuire influențează dimensiunea particulelor ce trebuie reținute, temperatura gazului purtător, pierderea de presiune în aparat, dimensiunile aparatului, gradul de reținere a impurităților, eficiența reținerii particulelor și costurile anuale de întreținere. Orientativ, în tabelul 2.9 se prezintă o comparație a acestor sisteme de filtrare

Tabelul 2.9. Comparatie între sistemele de reținere a particulelor de praf

Tipul de colector	Domeniul particulelor reținute	Eficiența reținerii particulelor	Temperatura maximă admisă [°C]	Pierderea de presiune [Pa]	Spațiul de amplasare necesar	Cost anual [\$/m ³ an]
Filtru sac din bumbac	0,1 ...1,0	Slabă	80	10	Mare	14,0
	1,0...10,0	Bună	80	10	Mare	14,0
	10,0...50,0	Excelentă	120	10	Mare	14,0
Filtru sac din fibre sintetice	0,1...1,0	Slabă	120	12	Mare	17,0
	1, 0...10,0	Bună	120	12	Mare	17,0
	10,0...50,0	Excelentă	80	12	Mare	17,0
Filtru sac din fibre de	0,1...1,0	Slabă	290	10	Mare	21,0
	1,0...10,0	Bună	290	10	Mare	21,0
	10,0...50,0	Bună	290	10	Mare	21,0
Filtru sac din teflon	0,1...1,0	Slabă	260	20	Mare	23,0
	1,0...10,0	Bună	260	20	Mare	23,0
	10,0...50,0	Excelentă	260	20	Mare	23,0
Filtru electrostatic	0,14-1,0	Excelentă	400	1	Mare	21,0
	1,0...10,0	Bună	400	1	Mare	21,0
	10,0...50,0	Bună	400	1	Mare	21,0
Filtru ciclon standard	0,1...1,0	Foarte slabă	400	5	Mare	7,0
	1,0...10,0	Foarte slabă	400	5	Mare	7,0
	10,0...50,0	Bună	400	5	Mare	7,0
Filtru ciclon perfecționat	0,1...1,0	Foarte slabă	400	12	Moderată	11,0
	1,0...10,0	Slabă	400	12	Moderată	11,0
	10,0...50,0	Bună	400	12	Moderată	11,0
Turn de spălare	0,1...1,0	Slabă	540	5	Mare	25,0
	1,0...10,0	Bună	540	5	Mare	25,0
	10,0...50,0	Bună	540	5	Mare	25,0
Filtru umed combinat	0,1...1,0	Slabă	540	10	Moderată	23,0
	1,0...10,0	Bună	540	10	Moderată	23,0
	10,0...50,0	Bună	540	10	Moderată	23,0
Scrubăr Venturi	0,1...1,0	Bună	540	90	Redusă	56,0
	1,0...10,0	Excelentă	540	90	Redusă	56,0
	10,0...50,0	Excelentă	540	90	Redusă	56,0
Filtru sac din teflon	0,1...1,0	Slabă	500	10	Mare	21,0
	1,0...10,0	Bună	500	10	Mare	21,0
	10,0...50,0	Bună	500	10	Mare	21,0

De menționat că, eficiența de filtrare se reduce în timp, pe măsură ce elementele de filtrare se încarcă cu praf, astfel încât sunt necesare opriri pentru curățarea filtrelor.

2.5. EXPLOATAREA LINILOR DE FILTRARE

2.5.1. Generalități

Evitarea riscului tehnic atașat transportului prin conducte și distribuției gazelor naturale la consumatorul final depinde în primul rând de eficiența purificării și filtrării gazelor naturale într-o succesiune logică și treptată cerută de utilizator. Pentru numeroasele lor avantaje, filtrele au largă răspândire în transportul și distribuția gazelor în conformitate cu cerințele consumatorului final.

Filtrele pentru gaze naturale se montează de regula în stațiile de reglare-măsurare (SRM) gaze naturale, stații de uscare gaze, în cazul gazului de comandă pentru anumite acționări pneumatice, la arzătoare etc., având rolul de a reține impuritățile solide și parțial cele lichide antrenate de curentul de gaze. Datorită importanței lor, prin locul unde sunt montate, ele conferă siguranța aparaturii sensibile a SRM-ului și în general a întregii aparaturi aferente traiectului tehnologic al gazelor. Un model de stație de reglare și măsurare SRM de sector modern utilizat în distribuția de gaze este prezentat în figura 2.30.

În figura 2.30 este prezentată schema reală a unei S.R.M. cu doua linii de filtrare.



Fig. 2.30. Stație de reglare gaze de sector dotată cu diferite filtre

Filtrul de gaz metan, în general, are în componență următoarele părți: corpul filtrului prevăzut cu racordul de curățire, flanșa oarbă prevăzută cu racorduri de aerisire, racordul de intrare, cartușul filtrant, racordul de ieșire și după caz, prize de presiune în vederea măsurării presiunii nominale și a căderii de presiune pe filtru.

Presiunea nominală pentru care sunt executate filtrele poate varia de la o presiune foarte joasă, în așa fel în cât valoarea minimă a presiunii (de exemplu $P_n \sim 10\% Q_n$ al unui arzător)

să fie valoarea presiunii minime și căderea de presiune pe filtru, până la presiunea nominală maximă de 100bar. Situațiile când căderea de presiune pe filtru crește peste valoarea admisă sau este nulă sunt situații de avarie.

Gradul de filtrare ajunge la eliminarea a peste 99,9 % din particulele de praf fine. Pentru aceasta, eliminarea prafului reținut de cartușul filtrant cere o demontare periodică a acestuia. Înlocuirea și curățirea lui trebuie făcute în exploatare. În cazul în care este folosit cartușul cu element filtrant din pâslă, mărimea minimă a particulelor solide reținute este de aproximativ 2...25 μ m.

Un parametru important este căderea de presiune pe filtru. Căderea de presiune pe filtru curat poate varia în funcție de construcția filtrului de la 0,1...1,5 bar. În situații în care căderea de presiune crește peste valoarea admisă, cartușul filtrant trebuie schimbat.

Pentru condiții extreme, cartușul filtrant se poate curăți prin suflarea lui cu aer, dar valoarea lui de filtrare nu va depăși 50 % din valoarea inițială de filtrare.

În situația neverificării în timp util a căderii de presiune, filtrul poate să se îmbâcsească în așa fel încât particulele reținute să nu fie uniform distribuite pe suprafața cartușului filtrant, astfel în cât, gazul este forțat să treacă în zona mai puțin îmbâcsită a cartușului. Acest fenomen poate avea consecințe negative putând duce la ruperea cartușului filtrant, iar operațiunea de filtrare să fie compromisă.

2.5.2. Exploatarea în regim de avarie a unei linii de filtrare

Situațiile când căderea de presiune pe filtru crește peste valoarea admisă sau este nulă sunt considerate situații de avarie.

În aceste situații se execută următoarele operații:

- se execută pregătirea prealabilă, delimitare loc și marcarea cu plăcuțe avertizoare,
- se trece alimentarea pe linia de filtrare de rezervă prin deschiderea robinetilor de secționare din amonte și aval,
- se izolează linia de filtrare avariata prin închiderea robinetilor de secționare din amonte și aval,
- se intervine asupra filtrelor din linia de filtrare avariata conform instrucțiunilor de lucru.

După înlocuirea filtrelor avariate sau curățirea sau schimbarea cartușelor filtrante, linia de filtrare reparata este menținută ca linie de rezervă.

Studiul de caz - exploatarea în regim de avarie a filtrelor conice

Pentru aceasta, în cadrul S.R.M. se montează un filtru conic pe tronsonul ocolitor și unul în amonte de contorul cu turbină. Filtrul conic și dimensiunile constructive luate în studiu sunt redate în figura 2.31. și tabelele 2.10. și 2.11.

Situațiile când căderea de presiune pe filtru conic crește peste valoarea admisa sau este nulă sunt situații de avarie.

Filtrul conic montat în amonte de contorul cu turbină se întreține și se verifică în același timp cu contorul cu turbină.

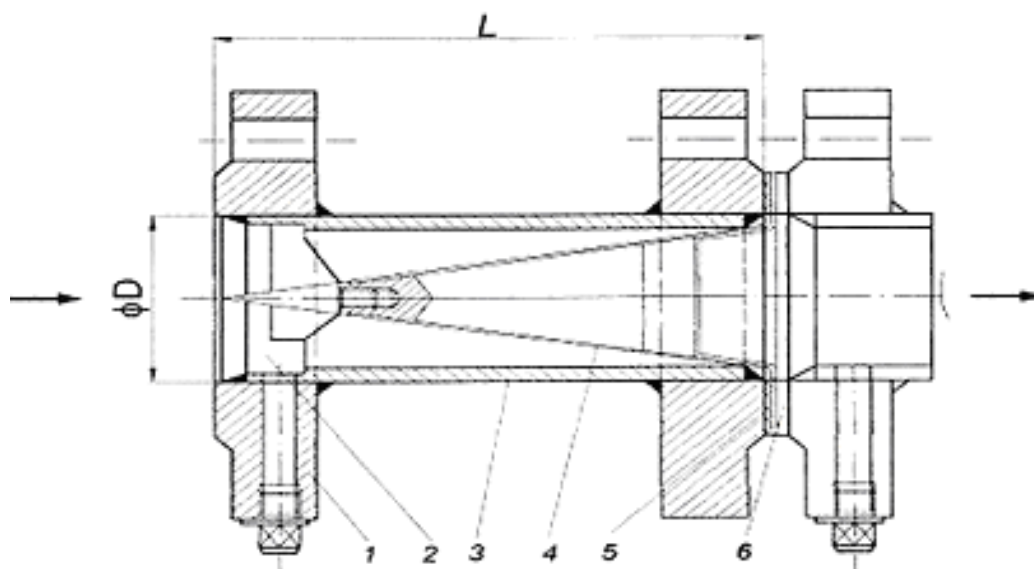


Fig. 2.31 Schema de principiu a unui filtru conic:
 Flanșă intrare; 2- piesă de fixare; 3- corp filtru; 4- cartuș filtrant; 5- piesă de fixare; 6- garnitură de etanșare

Tabel 2.10. Dimensiunile unor filtre conice

Presiune [bar]	Dn [mm]	Dimensiuni [mm]						
		A	B	C	ØD	E	ØF	G
25	50	165	125	200	60,5	7,5	18 (4)	3
	80	200	160	225	90	8,5	18 (8)	4
	100	220	180	250	114	10	18 (8)	5
	150	285	240	362	168	10	22 (8)	6
	200	340	295	475	219	10	22 (12)	6
	250	405	355	605	273	10	26 (12)	7
	300	460	410	724	324	10	26 (12)	8

În situație de avarie, la filtrul conic montat pe ocolitor, se execută următoarele operații:

- se execută pregătirea prealabilă, delimitare loc și marcarea cu plăcuțe avertizoare;
- se izolează tronsonul ocolitor prin închiderea robinetilor din amonte și aval;
- se purjează și se aerisește tronsonul ocolitor;
- în cazul demontării se va folosi un dispozitiv de întindere a celor 2 flanșe cu ajutorul unui cric vinch. Acesta se improvizează la fața locului în funcție de distanța unde se poate fixa dispozitivul pentru a îndepărta cele două flanșe;
- se purjează și se aerisește filtrul, respectiv tronsonul ocolitor prin robinetii de aerisire;
- se slăbesc cele două 2 șuruburi în cruce;

- se eliberează celelalte șuruburi;
- se lasă două șuruburi pe partea inferioară a flanșei;
- se scot garniturile dintre cele două perechi de flanșe;
- se scot șuruburile rămase din flanșe;
- se îndepărtează filtrul dintre flanșe;
- în locul filtrului demontat se remontează altul sau se curăță cartușul conic.

Tabelul 2.11. *Caracteristicile tehnice ale unui filtru orizontal conic*

D_N [mm]	P_N [bar]	D [mm]	L [mm]
50	25	60	200
80	25	88	225
100	25	144	250
150	25	168	362
200	25	219	475
250	25	273	605
300	25	323	724
400	25	406	805

2.6. ÎNTREȚINEREA FILTRELOR DIN CADRUL S.R.M.

Datorită importanței lor, prin locul unde sunt montate conferă siguranța aparaturii sensibile a SRM-ului și în general a întregii aparaturi aferente traiectului tehnologic al gazelor.

Filtrul de gaz metan, în general, are în componență următoarele părți: corpul filtrului prevăzut cu racordul de curățire, flanșa oarbă prevăzută cu racorduri de aerisire, racordul de intrare, cartușul filtrant, racordul de ieșire și după caz prize de presiune în vederea măsurării presiunii nominale și a căderii de presiune pe filtru.

Gradul de filtrare ajunge la eliminarea a peste 99,9 % din particulele de praf fine. Pentru aceasta, eliminarea prafului reținut de cartușul filtrant cere o demontare periodică a acestuia. Înlocuirea și curățirea lui trebuie făcute în exploatare. În cazul în care este folosit cartușul cu element filtrant din pâslă, mărimea minimă a particulelor solide reținute este de aproximativ 2...25μm.

Un parametru important este căderea de presiune pe filtru. Căderea de presiune pe filtru curat poate varia în funcție de construcția filtrului de la 0,1...1,5 bar. În situații în care căderea de presiune crește peste valoarea admisă, cartușul filtrant trebuie schimbat.

Pentru condiții extreme, cartușul filtrant se poate curăți prin suflarea lui cu aer, dar valoarea lui de filtrare nu va depăși 50% din valoarea inițială de filtrare.

Defectele apărute la diferite subsansamble componente ale liniilor de filtrare (robineți, manometre, termometre, etc.) se remediază de către echipa de intervenție autorizată conform instrucțiunilor specifice sau la unitățile specializate (de exemplu, atelier metrologie).

2.7. VERIFICAREA FILTRELOR – CRITERII DE VERIFICARE

Verificările tehnice se execută în raport cu parametrii funcționali operativi impuși instalației de filtrare prin proiectare și care trebuie să se situeze în limitele valorilor nominale.

Verificările tehnice care se execută la instalațiile de filtrare din cadrul SRM-urilor au caracter periodic și fac parte din programul comun de verificări tehnice a ansamblului elementelor tehnice și aparaturii aferente SRM, astfel:

- verificarea zilnică a căderilor de presiune și refularea impurităților acumulate în filtrele care sunt prevăzute cu dispozitive de purjare montate la partea inferioară a acestora, conform graficului stabilit pentru fiecare filtru;

- verificarea cartușului filtrant ori de câte ori diferența de presiune între intrare și ieșire din filtru depășește 0,5bar sau cel puțin o dată pe trimestru acolo unde nu există posibilitatea măsurării căderilor de presiune. Cartușele filtrante găsite necorespunzătoare se curăță sau se înlocuiesc;

- verificarea lunară a etanșeității filtrelor și armăturilor aferente acestora și eliminarea emanațiilor.

- verificarea stării suprafețelor vopsite cel puțin o dată la 2 ani.

Verificările tehnice ce se execută asupra unei instalații de filtrare au caracter periodic și se clasifică în general în următoarele categorii în funcție de tipul de revizie sau reparație:

- verificări ce se execută cu ocazia controlului și întreținerii curente;

- verificări ce se execută în vederea reviziilor tehnice (Rt);

- verificări ce se execută pentru reparațiile curente (Rc);

- verificări care au în vedere reparația capitală (Rk).

Verificările ce se execută cu ocazia controlului și întreținerii curente au caracter periodic și se execută zilnic în anotimpul rece. În restul anului se execută la 2-3 săptămâni sau la intervalul stabilit de șeful de sector al SRM.

Verificările care stau la baza reviziilor tehnice se execută de asemenea planificate (lunar sau la două luni), periodicitatea acestora depinde de periodicitatea reviziilor tehnice care de asemenea se va stabili de șeful de sector în funcție de condițiile de exploatare a SRM-ului, complexitatea, importanța și uzura componentelor SRM, compoziția gazelor etc.

Verificările care se execută pentru reparațiile curente sunt de asemenea planificate și se execută de către echipa de intervenție a sectorului cel puțin o dată pe an. Intervalul între reparațiile curente, și deci între verificările aferente acestor reparații se stabilește de șeful de sector împreună cu conducerea regională din cadrul Sucursalei de Transport Gaze Naturale, care răspunde de funcționarea SRM-ului și la această stabilire se vor avea în vedere:

- condițiile de exploatare;
- compoziția gazului;
- tipul și starea echipamentului SRM;
- uzura componentelor.

Verificările care au în vedere reparațiile capitale sunt de asemenea programate, conform Legii 15 din 1994 și se execută cel puțin o dată la 20 ani.

Perioada programată pentru Rk se stabilește în funcție de următoarele considerente:

- starea tehnică;
- condițiile specifice de lucru și de funcționare;
- uzura fizică și morală a elementelor componente;
- gradul de amortizare.

Conducerea Sucursalei de Transport Gaze Naturale recomandă executarea Rk la un interval de 20 ani dar nu mai repede de 15 ani.

De asemenea mai precizează următoarele:

- durata normală de utilizare poate fi prelungită și implicit perioada Rk, respectiv a verificării tehnice aferente;

- pentru toate defecțiunile constatate la verificarea tehnică Rk prealabilă, se aplică soluții definitive de remediere, prin înlocuirea dispozitivelor, subansamblelor, garniturilor, supapelor, ventilelor, organelor de reglare și siguranță, tijelor, ghidajelor etc.;

- reparațiile capitale (Rk) ca și cele curente (Rc) se execută fără întreruperea alimentării cu gaze sau oprirea furnizării gazelor și se va trece pe panourile ocolitoare ale stației;

În principiu, operațiile de verificare la o instalație de filtrare sunt următoarele:

- verificarea căderilor de presiune pe filtru datorate îmbăcsirii elementelor active ale filtrului;

- verificări ale emanațiilor de gaze pe la garniturile flanșelor de racordare a filtrului și la celelalte îmbinări, a țevilor de scurgere sau de refulare, respectiv a robinetelor aferente acestora;

- verificarea funcționării sistemelor de evacuare;

- verificarea depunerilor de impurități în secțiunile minime de trecere a gazelor pe traiectul instalației de filtrare;

- verificarea etanșeității și funcționalității dispozitivelor de evacuare, de aerisire, robinetelor și supapelor, aferente filtrelor;

- verificări ale AMC-urilor aferente instalației de filtrare.

Este foarte important de precizat faptul că verificările tehnice se pot face în două situații, și anume:

- verificări care necesită scoaterea filtrelor de sub presiune și aceasta se întâmplă atunci când piesa sau subansamblul ce se verifică se află pe traiectul gazelor și nu permite examinare din afară decât prin intervenție în zona aflată sub presiune a instalației de filtrare;

- verificări care nu necesită scoaterea filtrului sau a elementului respectiv de sub presiune. Aceasta are loc atunci când piesa sau subansamblul respectiv vine indirect în contact cu gazul aflat sub presiune. În acest caz nu este obligatorie scoaterea de sub presiune a separatorului.

În cazul verificărilor care presupun scoaterea de sub presiune a filtrelor, procedura de lucru la verificarea tehnică se va supune punctelor care prevăd manevrele de întreținere și scoatere de sub presiune și trecerea pe tronsonul de rezervă sau pe ocolitor, prevăzute în instrucțiunile de întreținere a filtrelor sau în instrucțiunile de exploatare în regim de avarie.

Șeful echipei de lucru este cel care stabilește și în acest caz dacă este sau nu necesară scoaterea din funcțiune, respectiv de sub presiune a filtrului supus verificării tehnice și va proceda în consecință.

2.8. STUDIUL DE CAZ - ÎNTREȚINEREA FILTRELOR CONICE

În cadrul S.R.M. se montează un filtru conic pe tronsonul ocolitor și unul în amonte de contorul cu turbină. Filtrul conic montat în amonte de contorul cu turbină se verifică în același timp cu contorul cu turbină sau de câte ori este nevoie, în funcție de condițiile de exploatare.

Situațiile când căderea de presiune pe filtrul conic depășește valoarea de 0,1bar, se impune trecerea stației pe ocolitor, izolarea rampei de măsură, demontarea și curățirea filtrului conic. Cartușul filtrant al filtrului conic montat pe tronsonul ocolitor se curăță sau se schimbă odată cu revizia anuală sau de câte ori situația o impune. Situațiile când căderea de presiune pe filtru conic crește peste valoarea admisă sau este nulă sunt situații de avarie.

Cartușele filtrante trebuie curățate sau schimbate ori de câte ori intervine o situație de avarie sau cu ocazia verificărilor periodice.

2.9. CONCLUZII

- Siguranța funcționării întregului SNTGN depinde în primul rând de calitatea gazelor naturale, de construcția, exploatarea și întreținerea sistemului de transport și de puritatea gazului natural pe tot traseul lui de la capul de extracție până la consumatorul final;

- Curățirea gazelor de impurități mecanice (nisip, noroi, sfărâmături de rocă) și lichide, după ieșirea din sondă se efectuează în recipiente metalici sub acțiunea următorilor factori: forța gravitațională, schimbarea bruscă a direcției curentului de gaze, contactul dintre curentul de gaze și o suprafață lichidă sau una solidă umedă, trecerea gazelor prin filtre, membrane etc.;

- Efectul de coroziune al gazelor naturale asupra conductelor de transport depinde de: natura particulelor, densitatea particulelor, forma și rugozitatea suprafețelor acestora, viteza de antrenare, masa particulelor și presiunea gazelor naturale, temperatura mediului și existența particulelor lichide;

- Experimental s-a constatat că viteza limită de cădere a particulelor solide este funcție de diametrul particulelor și presiunea gazului purtător;

- Impuritățile solide sunt de diferite forme și dimensiuni, depinzând în primul rând de locul unde se face analiza gazelor naturale de transportat, astfel: la capul de extracție există: nisip, noroi, sfărâmături de rocă și diferite lichide; pe traseul conductelor de transport: praf, particule solide și lichide, pulberi și oxizi; înainte de consumatorul final: particule și microparticule solide și lichide;

- Separatoarele de impurități solide trebuie să fie montate cel puțin în următoarele locuri: în câmpurile de producție (la capul de extracție); înaintea stațiilor de uscare a gazelor; după stațiile de uscare a gazelor la care se utilizează desicant solid; înaintea stațiilor de reglare și măsurare; la utilizatorii de gaze naturale cu procese tehnologice pretențioase (chimizare, tratamente termice, industria sticlei și porțelanului, industria farmaceutică etc.);

- Principalele metode de reținere a particulelor solide, utilizate frecvent sunt: mecanice, având la bază ionizarea particulelor în câmp electric; strat poros, utilizând caracteristicile curgerii fluidelor reologice; hidraulice, utilizând principiile spălării;

- Filtrarea gazelor este operația prin care reținerea particulelor de praf se realizează prin trecerea gazelor prin suprafețe poroase, ale căror intensități (pori) au dimensiuni stabilite în funcție de adâncimea de separare (gradul de reținere) dorită, particulele fiind reținute pe suprafața poroasă a elementului filtrant;

- Filtrele pot avea o eficiență ridicată, reținând până la 99% din particulele solide fine, mai ales dacă se utilizează soluția în două trepte sau combinații de separatoare și filtre;

- Un parametru important este căderea de presiune pe filtru curat, care poate varia, în funcție de construcția filtrului, în gama 0,1...1,5 bar, în situația în care căderea de presiune crește peste valoarea adusă sau este nulă, atunci este considerată situație de avarie și cartușul filtrant trebuie schimbat;

- La oricare filtru în strat poros, porii țesăturii sunt înfundați de primele particule de praf reținute, vâscozitatea dinamică a gazelor crește și căderea de presiune crește, are loc colmatarea filtrului și este necesară înlocuirea lui cu unul curat sau curățarea lui;

- Curățarea se poate realiza după scoaterea din funcționare a filtrului prin scuturare sau suflare cu aer în sens invers față de curentul de gaz, operație ce presupune timp și întreruperea sistemului de transport al gazelor naturale;

- Filtrele ceramice au randamente de filtrare ridicate, dar căderea de presiune depinde atât de dimensiunile porilor cât și de structura granulometrică a materialului din care este confecționat, ele fiind necomandate pentru debite relativ mici;

- Desprăfuitoarele prin spălare au un foarte bun randament de separare, dar trebuie să funcționeze într-un regim strict delimitat de debite și viteze, altfel există riscul ca uleiul, cu praful colectat să fie antrenat dincolo de șicanele de dezuleiere, cu pierdere de ulei și cu scăderea eficacității de desprăfuire;

- Filtrele electrostatice lucrează prin ionizarea particulelor solide și apoi colectarea lor pe o suprafață colectoare de formă tubulară sau plată, curățată apoi prin răzuire. Pentru reținerea combinată a prafului și a altor substanțe gazoase nocive se folosesc filtre electrostatice umede, la care are loc mai întâi stropirea gazului natural impurificat;

- La alegerea sistemului de desprăfuire influențează: dimensiunea particulelor ce trebuie reținute, temperatura gazului purtător, pierderea de presiune în aparat, dimensiunile aparatului, gradul de reținere a impurităților, eficiența reținerii particulelor și costurile anuale de întreținere;

- Defectele apărute la diferitele subansamble componente ale liniilor de filtrare (robineți, monometre, termometre, supape, vane etc) se remediază de către echipa de intervenție autorizată conform instrucțiunilor specifice;

- Operațiile de verificare la o instalație de filtrare sunt: verificarea căderilor de presiune pe filtru datorate îmbâcsirilor elementelor active; verificări ale emanațiilor de gaze pe la garniturile flanșelor de racordare a filtrului; verificarea funcționării sistemului de evacuare; verificarea depunerilor de impurități în secțiunile minime de trecere a gazelor pe traiectul instalației de filtrare; verificarea etanșeității și funcționalității dispozitivelor de evacuare, de aerisire, a robinetelor și supapelor aferente filtrelor.

CAPITOLUL III

CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ÎMBUNĂȚĂȚIREA FILTRĂRII GAZELOR NATURALE FOLOSIND CÂMPUL ULTRASONIC

3.1. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND FILTRAREA CLASICĂ

Creșterea siguranței în exploatare, reducerea riscului tehnic atașat sistemului de transport, măsurare, reglare, distribuție și analizare a gazelor naturale până la consumatorul final presupune realizarea operațiilor de filtrare și purificare în mai multe trepte, în mai multe faze și ori de câte ori procesul tehnologic de prelucrare o cere.

Așa cum s-a văzut, operația de filtrare depinde de foarte mulți factori, cei mai importanți fiind următorii:

- ✓ natura și locul de extracție a gazelor naturale;
- ✓ natura zăcămintului și a rocilor magazin;
- ✓ presiunea de erupție;
- ✓ cantitatea de gaze naturale transportate;
- ✓ natura și dimensiunea particulelor solide;
- ✓ forma și mărimea particulelor solide;
- ✓ debitul de gaz și debitul de praf antrenat;
- ✓ temperatura de exploatare;
- ✓ adâncimea de filtrare;
- ✓ nivelul de filtrare;
- ✓ regimul de funcționare și eficacitatea procedurii.

În absența unor rezervoare locale pentru preluarea vârfurilor de consum, în cazul apariției unor temperaturi scăzute, atunci când zăcămintele de gaze constituie și „rezervoare tampon”, așa cum se întâmplă în țara noastră se recurge la exploatarea sondelor în regim de erupție, cu viteze mult mai mari decât cele obișnuite. În astfel de împrejurări, datorită faptului că vitezele, în separatoare, depășesc vitezele critice de separare și depunere, particulele solide și picăturile lichide antrenate din strat, sunt antrenate și transportate în conductele de transport, și chiar în cele de distribuție, iar acolo unde găsesc condiții favorabile se depun și modifică dinamica procesului și secțiunea conductei.

Prezența prafului în conductele de gaze produce numeroase neajunsuri în exploatare. La vitezele mari cu care curg gazele, deci și particulele de impurități antrenate, se produce erodarea scaunelor și sertarelor vanelor și acestea nu se mai închid, a scaunelor și ventilelor aparaturii de reglare și de siguranță și acestea nu mai reglează, respectiv nu mai funcționează corespunzător, a orificiilor calibrate ale instalațiilor de măsurare și control ale căror muchii trebuie să fie calibrate și lustruite și acestea, datorită erodării, conduc la erori, care nu pot fi evaluate cantitativ etc.

Dacă atunci când gazul este curat și când regimul de exploatare a sondelor permite ca aproape toată cantitatea de praf antrenat din strat să se poată separa și depune în separatoare, obligativitatea montării filtrelor în stațiile de reglare mai poate fi pusă în discuție în celelalte situații folosirea a doua etaje de filtrare este strict necesară. În astfel de situații, este strict necesară montarea de filtre atât la ieșirea din parcul de separatoare cât și la intrarea în stațiile de predare. Dat fiind că, la cantități așa de mari de praf, adâncimea de filtrare nu poate fi prea mare într-o treaptă sau două de filtrare deoarece filtrele s-ar colmata la scurt timp după montare, este necesară și prevederea și montarea de filtre în cadrul sistemului de distribuție.

Eficacitatea unei instalații de filtrare a prafului din gazele naturale se exprimă în mai multe moduri, astfel:

- *eficacitatea de colectare* η , care este egală cu raportul dintre masa prafului colectat în filtru m_{pf} și masa prafului intrat în filtru m_{pi} , adică:

$$\eta = \frac{m_{pf}}{m_{pi}}, \quad (3.1)$$

• -conținutul de praf rămas în gazul epurat m_{pr} , dată de relația:

$$m_{pr} = m_{pi} - m_{pf}, \quad (3.2)$$

În funcție de proprietățile gazelor naturale tipul instalațiilor de filtrare folosite depinde în primul rând de cantitatea de praf, de mărimea granulelor și de regimul de funcționare, de aceea poate folosi filtrarea în una sau doua trepte.

Filtrarea într-o singură treaptă are dezavantajul că, dacă filtrul este grosier, praful nu poate fi reținut în totalitate și scopul nu este atins sau, dacă filtrul este fin, realizează o reținere adâncă a prafului ceea ce duce la o colmatare rapidă a cartușului filtrant, deci la demontări și curățări frecvente, ceea ce devine stânjenitor în exploatare și scade eficiența procedurii.

Trebuie avut în vedere că, filtrele într-un singur etaj - dacă sunt grosiere - nu pot asigura o filtrare completă și deci scopul operației nu este, în totalitate atins, iar dacă sunt fine praful este în cea mai mare parte reținut și colmatarea se produce la scurt timp după intrarea în funcțiune. Din aceste considerente se impune proiectarea a doua trepte de filtrare. Prima treapta este compusă dintr-un filtru de tip Ciclon care poate reține 90 ... 95 % din particulele mecanice conținute în gaz, în raport de dimensiunea lor și construcția filtrului, iar în treapta a doua se montează un filtru cu cartuș filtrant din țesătură foarte fină (pâslă, vată de sticlă, țesătură din material plastic etc). Este indicat ca montarea celor două trepte de filtrare să se facă în serie. Și în acest caz este necesară o curățire periodică sau o schimbare a elementului activ al filtrului după o anumită perioadă de funcționare.

3.2. CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND CERINȚELE DE PROIECTARE ALE UNEI INSTALAȚII DE FILTRARE

Parametrii gazelor naturale filtrate, în special presiunea și debitul determină și parametri de lucru ai instalației de filtrare. Nivelul de filtrare trebuie să asigure limita minimă pentru funcționarea în siguranță a reguletoarelor, contoarelor și a armăturilor dintr-o instalație de transport gaze naturale. Pentru o funcționare în siguranță și eficientă este necesară respectarea următoarelor cerințe:

- ✓ filtrul trebuie conceput ca o singură furnitură care se montează și demontează ușor și care se poate verifica în oricare moment;
- ✓ filtrele se montează în instalație în paralel, utilizându-se minim două filtre, care vor funcționa simultan la debitul maxim, cerință care reprezintă un dezavantaj al metodelor clasice de filtrare;
- ✓ filtrele se montează pe conducta de intrare în stație, înainte de reguletoarele de presiune sau încălzitoarele de gaze, respectându-se sensul de curgere al gazelor, marcat pe corpul filtrului;
- ✓ atât în aval cât și în amonte de fiecare filtru trebuie să se monteaze câte un robinet;

- ✓ este permisă montarea de baterii de filtre (în cascadă), cu nivele de filtrare diferite. În acest caz, fiecare filtru al bateriei de filtrare trebuie dimensionat funcție de debitul maxim al instalației și de gradul de reținere a impurităților solide;
- ✓ căderea de presiune maximă admisă pe filtrul de gaz este de 10% din presiunea de intrare, dar nu mai mult de 0,5bar;
- ✓ filtrele se vor dimensiona după debitul maxim de gaze și după felul și natura (proprietățile) substanțelor de însoțire a gazelor;
- ✓ filtrele trebuie să reziste la o presiune statică de cel puțin 1,5 x presiunea nominală pentru care a fost proiectată instalația de transport și distribuție a gazelor naturale;
- ✓ filtrele trebuie prevăzute cu un element de măsurare a căderii de presiune pe filtru, cu indicarea maximului admis și/sau cu element de semnalizare sonor sau luminos a valorii maxime admise;
- ✓ filtrele trebuie prevăzute cu elemente de comutație automată pe filtrele de rezervă la atingerea căderii maxime admise pe filtrul respectiv;
- ✓ filtrele trebuie să fie astfel realizate încât să poată fi deschise, golite sau schimbat cartușul filtrant fără pericol, piesele componente trebuind să fie interschimbabile rapid;
- ✓ carcasele filtrelor, în care se pot monta și sistemele de încălzire a gazelor trebuie să se facă din materiale care să reziste la presiunile maxime de utilizare;
- ✓ filtrele trebuie să poată funcționa la temperaturi ambientale între -40°C și +60°C;
- ✓ mediul ambiant determină condițiile de lucru, de protecție și de siguranță a instalațiilor de filtrare. Filtrele trebuie să poată funcționa după caz, în medii neutre, în medii corozive acide sau alcaline, în medii abrazive etc;
- ✓ în oricare activitate de proiectare și construcție a elementelor de filtrare trebuie luate în considerare toate reglementările, normele, normativele și standardele referitoare la filtrare;
- ✓ trebuie luate în considerare toate cerințele beneficiarului cerute prin contract;
- ✓ filtrele trebuie să conțină o etichetă de inscripționare care să conțină, obligatoriu în limba română, minimum: producătorul, seria și anul fabricației, nivelul de filtrare, presiuni nominale de operare, debite nominale de lucru, temperaturi ambientale de lucru, temperaturi pentru gazele vehiculate, gradul de protecție mecanică și eventualele atenționări și precauții în operare;
- ✓ partea exterioară a filtrelor trebuie acoperită, prin vopsire sau alte mijloace, corespunzător cerințelor pentru un grad de agresivitate greu al atmosferei, conform STAS 72222-90.

3.2.1 Contributii privind tipurile de filtre de gaze naturale cele mai utilizate

Tipurile filtrelor utilizate în sistemul național de transport gaze naturale trebuie să corespundă:

- - mărimii particulelor de praf conținute în gazele naturale;
- - cantității de praf care trebuie eliminată din gazele naturale;
- - debitelor de gaze naturale;
- - regimului de curgere (constant sau cu pulsații).

După materialul folosit ca element (cartuș) filtrant, se disting:

- - filtre cu diferite tipuri de țesături;
- - filtre cu fetru;
- - filtre ceramice;
- - paturi filtrante, constituite din straturi de nisip, pietriș etc.;
- - filtre electrostatice.

Materialele din care sunt constituite elementele filtrante ale filtrelor utilizate în industria gazului trebuie să aibă următoarele caracteristici:

- - procentajul de porozitate deschisă > 70 %;
- - diametrul mediu maxim al porilor: 10μm;
- - numărul de pori pe cm²: 5.000;
- - suprafața specifică definită ca raportul suprafeței laterale a porilor deschiși la volumul aparent ≥ 0,25m²/cm³.

Pragul de filtrare trebuie să fie inferior la 5μm la începutul filtrării.

3.2.2. Calculul căderii de presiune pe filtre

Un parametru foarte important care caracterizează un filtru este căderea de presiune pe filtru. În general, căderea de presiune admisă pe filtrul curat poate varia funcție de construcția filtrului, în domeniul 0,1 ... 1,5bar. În situațiile în care căderea de presiune crește peste valoarea admisă, se recomandă schimbarea cartușului filtrant.

În cazul *cartușelor filtrante din țesătură*, compuse fie din saci montați în poziție verticală, fie din suprafețe plane de țesătură montate pe un cadru, vitezele sunt limitate, în general, la 0,5...4cm/sec., ceea ce corespunde la aproximativ 0,5...4cm³ de gaz/cm² (de țesătură) iar căderile de presiune la 5...15mbar (cca. 50...150 mmH₂O). Vitezele prea mari determină colmatarea rapidă a cartușului. De aceea, când gazele conțin particule foarte fine de praf, vitezele trebuie limitate la 1,5cm/sec.

Vitezele fiind mici, curgerea gazelor prin cartușele de țesături și prin stratul de praf depus pe suprafața cartușului, care funcționează ca un sistem filtrant suplimentar se face de regulă în regim laminar. În acest caz, numărul $\rho_0 w_0 / \eta$ trebuie să fie mai mic decât 80.

Pentru filtrele cu diferite țesături, căderea de presiune prin țesătura cartușului, este dată de o relație de forma:

$$\Delta p = K \cdot w_0 \cdot \eta, \quad (3.3)$$

unde: Δp este căderea de presiune, în μbar (10⁻¹N/m² sau 10⁻²mmH₂O); w_0 – viteza gazelor în raport cu suprafața filtrantă, presupusă goală în cm/sec.; η – vâscozitatea dinamică a gazelor, în Poise (gr./cm.sec); K – constanta dată de raportul suprafeței față de debit, în cm²/cm³.

Câteva valori pentru K sunt date în tabelul 3.1

Tabel 3.1. Valorile ale lui K pentru câteva țesături utilizate la cartușele filtrante

Țesătura	Mărimea porilor mm	Numărul de fire pe cm ²	Diametrul firelor mm	K
Bumbac	0,25	12,6 x 11	0,5	2500
Bumbac	0,25	26,8 x 15,7	0,25	450
Lâna		15,7 x 19,6	0,35	1640
Naylon		28,4 x 77,5	0,25	3340
Sticlă		12,6 x 11	0,75	8000

Ținând seama de faptul că porii țesăturii sunt înfundați de primele particule de praf reținute, K va crește foarte repede putând ajunge la valori de peste 10 ori mai mari decât cele din tabel, depășind în acest fel căderea de presiune admisă.

Pentru praful uscat, dacă grosimea stratului depus depășește $1,5\mu\text{m}$, ceea ce înseamnă de ordinul a 0,4grame praf pe cm^2 de țesătură aproape în totalitate căderea de presiune va fi datorată trecerii gazelor prin stratul de praf depus, respectiv căderea de presiune în țesătură devine neglijabilă față de aceea produsă în stratul de praf.

Principalul dezavantaj al acestei categorii de filtru este dat de durata scurtă de funcționare, necesitatea curățirii perioadei sau a înlocuirii periodice a elementului filtrant și numărul mare de elemente filtrante (aria totală a filtrului).

De exemplu, dacă debitul de gaze naturale este $Q = 4,72 \cdot 10^6 \text{ cm}^3/\text{s}$, și viteza de filtrare $v_f = 4 \text{ cm/s}$ (pentru a evita o cădere de presiune mare) este necesară o suprafață filtrantă A_c , destul de mare, care se poate determina din relația:

$$A_c = \frac{Q}{v_f} = \frac{4,72 \cdot 10^6}{4} = 118 \text{ m}^2, \quad (3.4)$$

Aria unui element filtrant A_f (de exemplu – sac filtrant cu diametrul $d_s = 0,203 \text{ m}$ și înălțimea $h_s = 3,66 \text{ m}$) se calculează cu relația:

$$A_f = \pi \cdot d_s \cdot h_s = \pi \cdot 0,203 \cdot 3,66 = 2,295 \text{ m}^2, \quad (3.5)$$

Folosind relațiile (3.4) și (3.5) se poate determina numărul total de elemente filtrante N_{ff} , adică:

$$N_{ff} = \frac{A_c}{A_f} = \frac{118}{2,295} = 51 \text{ saci}, \quad (3.6)$$

Cartușele filtrante din fetru au de regulă formă cilindrică iar gazele intră de cele mai multe ori prin interiorul cartușului. Fetrul pentru cartuș poate fi confecționat din fibre de bumbac, lână, naylon, sticlă, acrilan etc., ale căror caracteristici specifice le fac utilizabile, după caz, în medii neutre, în medii corozive, acide sau alcaline, în medii abrazive etc.

În filtrele cu cartușe din fetru vitezele pot atinge $2,5 \dots 15 \text{ m/s}$ sau $\text{cm}^3 \text{ gaz}/\text{cm}^2$ (fetru), dar din cauza căderilor de presiune care pot deveni importante și a colmatărilor rapide, trebuie să nu depășească $7 \dots 8 \text{ m/s}$. Filtrele cu fetru trebuie proiectate să funcționeze cu o cădere de presiune sub 10 mbar ($100 \text{ mmH}_2\text{O}$), în cel mai rău caz aceasta putând atinge maxim 15 mbar .

Aceste filtre se proiectează pentru reținerea particulelor fine de praf, între $0,1$ și $1,6 \text{ g}/\text{cm}^3$ dar, pentru situații particulare se acceptă până la $80 \text{ g}/\text{cm}^3$. Cu toate acestea, nu se recomandă folosirea acestui tip de filtru pentru gaze cu conținut mare de praf, pentru că aceasta ar conduce la colmatarea foarte frecventă a cartușelor.

Acest tip de filtre se recomandă a fi utilizat mai ales în treapta a doua, ca filtre fine, după ce particulele grosiere au fost îndepărtate prin alte procedee.

Căderea de presiune în filtrele cu fetru se calculează cu relația (3.3). Valorile lui K, în cazul filtrelor cu cartușe din fetru se prezintă în tabelul 3.2.

Tabel 3.2. Valorile lui *K* și caracteristicile fizice pentru fetru din diferite materiale

Compoziția fetrului	Masa unitară g/cm ²	Grosime mm	Forța de rupere kgf/cm din lățime	Alungirea în procente la rupere	K
Lână	730	3,4	-	-	5150
Orlon	370	1,15	11,6	18	5500-6950
Orlon	820	3,2	19,8	60	6950-13900
Dacron	610	2	22,4	22	6950-9250
Dacron	820	3,2	31,4	80	4650-6950
Naylon	820	3,2	17,9	100	3500-4650
Teflon	530	1,35	-	-	1700
Teflon	1480	3	-	-	6450
Acrilan	610	1,9	17,9	22	6950-8250

Filtrele ceramice beneficiază de randamente înalte de filtrare, putând elimina, practic, totalitatea particulelor de praf conținute în gaze. Aceste filtre se confecționează, în general, sub formă de coloană (tub) sau bujie, fixate pe o placă. Ele sunt parcurse de către gaz, de obicei, de la exterior la interior, pentru ușurința curățirii, exteriorul fiind mai accesibil.

Căderea de presiune, într-un *filtru ceramic*, depinde atât de dimensiunile porilor, cât și de structura granulometrică a materialelor din care este confecționat și se admite, în mod curent, pentru debite situate între 80...100Nm³/h pe un element, pentru o granulometrie de 30μ, sub 10mbar.

Căderea de presiune crește rapid când porii se colmatează. De exemplu, pentru o suprafață filtrantă de aproximativ 1930cm², în raport de cantitatea de praf depusă pe elementul filtrant, creșterea căderii de presiune, față de cea rezultată pentru elementul filtrant, este dată în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3. Creșterea căderii de presiune cu cantitatea de praf depusă pe elementul filtrant

Granulometria materialului ceramic μ	Când cantitatea de praf depusă pe elementul filtrant crește	Raportul Δp colmatat/Δp curat crește
10	de la 0 la 20 g	de la 1 la 1,67
20	de la 15 la 20 g	de la 2,2 la 4,5
30	de la 17 la 20 g	de la 2 la 3,4
40	de la 15 la 20 g	de la 1,2 la 2

Filtrele electrostatice funcționează pe următorul principiu: trecerea gazului printr-un câmp electric, pentru ionizarea moleculelor sale. Moleculele de gaz ionizate, trebuie menținute în câmp, un interval suficient de mare, pentru ca particulele de praf să capete suprafață de

colectare (în câmp electric particulele de praf, conținute în gaz, expuse contactului cu moleculele de gaz ionizate colectează ioni, devin încărcate cu sarcini electrice și se deplasează sub acțiunea câmpului electric). Trebuie asigurată prevenirea reantrenării particulelor de praf colectate și separate sub acțiunea câmpului electric și îndepărtarea prafului colectat.

În filtrele electrostatice cu un singur etaj ionizarea și colectarea sunt combinate, iar în cele cu doua etaje ionizarea și colectarea se realizează în părți diferite ale aparatului.

Căderea de presiune în filtrele electrostatice datorată, în special, îngustării sau respectiv lărgirii de secțiune la intrare, respectiv la ieșire, trebuie să fie de ordinul a 1...2,5mbar.

3.2.3. Contribuții privind calculul vitezei de antrenare a prafului prin filtre și depunerea prafului

Pentru a se putea alege metoda de eliminare a prafului cu care se poate atinge adâncimea de filtrare dorită, este necesar să se cunoască mărimea particulelor de praf.

În determinările făcute în laboratoarele de ecotehnologie de la catedra T.M.S. din U.P.B. și catedra de Inginere Chimică din U.P.B. au rezultat următoarele rezultate:

- 2,8 % din particule au dimensiuni peste 60 μ m, restul sub această dimensiune;
- 40...60 % din particule au dimensiuni peste 10 μ m;
- 52 % din greutatea totală a prafului se compune din particule cu dimensiuni sub 10 μ m.

O viteză de 10m/s (36km/h) corespunde unui vânt care ridică și antrenează praful, iar un vânt de 20m/s (72km/h), reprezintă o adevărată furtună.

Aceste viteze sunt cu mult depășite în perioadele de vârf de consum, în conductele de gaze naturale, ceea ce justifică antrenarea prafului și producerea efectelor menționate mai înainte, în mod expres erodarea echipamentului de transport și distribuție.

Efectele eroziunii sunt determinate de energia cinetică, adică de masa și viteza particulelor de praf antrenate.

Limitarea vitezei de curgere, recomandată de unii autori, pentru evitarea eroziunii, nu mai poate fi luată în considerare în condițiile țării noastre, deoarece conductele sunt deja în exploatare și capacitatea lor nu mai poate fi modificată la latitudinea noastră. În aceste condiții, sunt necesare intervenții la îndemâna transportatorului și distribuitorului de gaze: uscarea mai adâncă a gazelor, filtrarea, luarea de precauții (pentru conductele noi), înaintea și în timpul execuției, pentru a se preîntâmpina atât oxidarea pereților conductelor cât și introducerea de praf atmosferic, și aplicarea de soluții pentru reducerea sau eliminarea prafului.

Printre precauțiile recomandabile, pentru conductele în curs de construcție, în vederea evitării formării, în timpul exploatarei, de praf în conducte, ținând cont ca acesta se datorează acțiunii oxigenului, sulfului, bioxidului de carbon etc. (în prezența apei) asupra metalului conductelor, se menționează următoarele:

- reducerea punctului de rouă al gazelor, în general, sensibil sub 0°C;
- protejarea conductelor contra acțiunii umidității din aer, în timpul depozitării și pe șantier, înainte de punerea în operă. Această protecție internă, se poate asigura cu o peliculă de ulei conținând inhibitor de coroziune.

Particulele transportate au dimensiuni cu atât mai mici cu cât se găsesc mai departe de locul din care au fost antrenate sau în care s-au format. Ca urmare, rezultă că particulele se sparg, datorită ciocnirilor cu pereții conductelor, concomitent, producând o eroziune a acestora.

Particulele mai fine sunt păstrate mai ușor în suspensie, pentru că viteza lor de depunere, sub acțiunea accelerației gravitaționale, scade cu reducerea diametrului, conform relației:

$$F_c = \frac{\Pi \cdot d_p \cdot (\rho_p \cdot \rho_g) \cdot g}{6}, \quad (3.7)$$

în care:

F_c este forța de cădere, datorită accelerației gravitaționale, în N;

d_p - diametrul particulei, considerată de formă sferică, în m;

ρ_p - densitatea particulei în g/cm³;

ρ_g - densitatea gazelor în g/cm³;

g - accelerația gravitațională (9,8 m/s²).

Se observă că ρ_g , care are pentru metan valori cuprinse între $0,7 \times 10^{-3}$ g/cm³ la presiunea atmosferică, respectiv 0,014 g/cm³, la 20 bari, este neglijabil față de ρ_p , care are valori de cca. 2,5g/cm³.

În timpul căderii pe verticală, într-o mișcare uniform accelerată a particulei, frecarea cu particulele de gaz echivalează cu o forță de sens contrar, a cărei valoare este data de:

$$F_f = \lambda S w 2r g / 2,$$

(3.8)

În care:

F_f este forța de frecare a particulei solide cu particulele de gaz, pe direcția vitezei particulei solide, în N;

λ - coeficientul de frecare, adimensional (se determină în raport de numărul $Re = D w \rho_g \eta$, din figura 3.1);

S - suprafața secțiunii particulei, presupusă sferică, la viteza w , ($S = \pi D^2 / 4$) în cm²;

w - viteza liniară a gazului, în raport cu particula, în cm/s;

η - vâscozitatea dinamică, în Poise (1P = 1g/cm s).

Se face observația ca viteza w , în raport de care se determină numărul Re și, respectiv, regimul de curgere, nu este viteza gazului în conductă, ci viteza relativă a gazului în raport cu particulele de praf. Astfel, o particulă, care cade, sub acțiunea accelerației gravitaționale, într-un curent de gaz în mișcare turbulentă, poate avea o viteză w , care să conducă la un $Re < 2$, ceea ce definește un regim laminar (cade pe peretele conductei) sau poate avea, datorită frecării cu gazul (care se mișcă în regim laminar) o viteză w , care să determine un $Re > 500$, ceea ce definește un regim turbulent.

Astfel, pentru căderea particulelor într-un curent de gaz, în conducte, în regimurile laminar, turbulent precum și în regim intermediar, se definesc forțele de frecare care tind să antreneze particulele de praf depuse în conducte în tabelul 3.4.

Tabel 3.4. Relațiile de calcul pentru forța de frecare în cazul regimului laminar, turbulent pe intermediar

Număr Reynolds	$Re < 2$	$Re > 500$	$2 < Re < 500$
Regimul	Laminar	Turbulent	Intermediar
Rația de calcul a coeficientului de frecare	$\lambda = 24/Re$ (legea lui Stokes)	$\lambda = 0,44$ (legea lui Newton)	$\lambda = 18,5 Re^{-0,6}$ (relația lui Allen)
Relația de calcul a forței de frecare ce se exercită asupra unei particule de formă sferică	$F_f = 3\pi d_p w \eta$	$F_f = 0,055\pi d_p^2 w^2 \rho_g$	$F_f = 2,3\pi d_p^{1,4} w^{1,4} \rho_g^{1,4} \eta^{0,6}$

Cu ajutorul relațiilor de mai sus, pentru determinarea vitezei de depunere, se va ține seama ca atunci când forțele de sens contrar F_c și F_r sunt egale, se obține viteza limită uniformă de cădere.

În regim laminar ($Re < 2$), forța de frecare se calculează eu relația:

$$F_f = 3\pi d_p w \eta \quad , \quad (3.9)$$

În cazul stabilirii egalității, $F_c = F_f$, se obține:

$$\pi d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g / 6 = 3\pi d_p w \eta, \quad (3.10)$$

Și explicitând în w , se obține relația lui Stokes, de forma:

$$w = w_{lim} = \sqrt{\frac{d_p (\rho_p - \rho_g) g}{18\eta}}, \quad (3.11)$$

În regim turbulent ($Re > 500$), în mod analog se scrie egalitatea:

$$\pi d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g / 6 = 0,055 \pi d_p^2 w^2 \rho_g, \quad (3.12)$$

de unde rezultă:

$$w_{lim} = \sqrt{\frac{d_p (\rho_p - \rho_g) g}{2\lambda \rho_g}}, \quad (3.13)$$

Trebuie făcută însă observația că, în distribuție, atingerea regimului turbulent este exclusă. Chiar la transportul gazelor, la presiunile uzuale (6...70bar) și la diametrele curente ale particulelor, regimul turbulent, referitor la viteza de depunere a particulelor, nu are șanse să se realizeze.

În regim intermediar ($2 < Re < 500$), se consideră egalitatea:

$$\pi d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g / 6 = \lambda \pi d_p^2 w^2 \rho_g / 8, \quad (3.14)$$

de unde rezultă:

$$w_{lim} = d_p (\rho_p - \rho_g) g / 3\lambda \rho_g, \quad (3.15)$$

În această relație, λ se determină, prin aproximări succesive, cu ajutorul figurii 3.1. De exemplu, plecând de la relațiile de mai sus, s-a calculat viteza limită aproximativă de cădere w_{lim} într-un gaz având: densitatea, $\rho_g = 0,6 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$; vâscozitatea, $\eta = 140 \times 10^{-6} \text{g/cm s}$; temperatura, $t \approx 15^\circ\text{C}$ și densitatea particulelor de praf $\rho_p = 2,5 \text{g/cm}^3$.

Rezultatele calculelor făcute pentru presiunile de 1 bar, 5 bari și 70 bari, neglijând ρ_g , sunt prezentate în tabelul 3.5.

Tabelul 3.5. Viteza limită de cădere a particulelor de praf

$d_p[\mu]$	[cm/s]		
	1 bar	5 bari	70 bari
2	0,04	0,04	0,04
5	0,25	0,25	0,25
10	1	1	1
20	4	4	4 (Re=2,4)
50	25 (Re=0,5)	25 (Re=2,5)	25 (Re=27)
100	75 (Re=3)	75 (Re=11)	75 (Re=84)
150	135 (Re=8,7)	135 (Re=29)	135 (Re=180)
200	208 (Re=18)	208 (Re=51)	208 (Re=300)

Rezultatele calcului de mai sus sunt transpuse în figura 3.1 și relevă influența pe care o are presiunea asupra particulelor cu dimensiuni mai mari, cărora le micșorează, considerabil viteza. Pe baze experimentale, s-au stabilit următoarele rapoarte și relații (tab. 3.6) între viteza medie a gazului pentru care particulele încep să fie antrenate W_a , viteza medie a gazului pentru care particulele încep să plutească W_p și viteza de depunere a particulelor w_{lim} , adică: $w_a = 0,192 w_{lim}$; $w_p = 0,78 w_{lim}$; $w_p/w_a = 2,16$

Tabelul 3.6. Viteza de început în antrenare și de plutire a particulelor de praf

Diametrul particulelor [μ]	Viteza medie a gazului pentru care particulele încep să fie antrenate [cm/s]	Viteza medie a gazului pentru care particulele încep să plutească [cm/s]	Distanța de la centrul particulei la perete [cm]
20	240	530	0,001
50	400	880	0,0025
100	50	1100	0,0050
150	560	1200	0,0075
200	600	1270	0,01

În conductele de distribuție și în cele de transport vitezele liniare de curgere sunt, în mod evident, mult mai mari, ceea ce conduce, fără dubiu, la antrenarea prafului, cu consecințe dezastruoase asupra echipamentelor, de unde și obligația de a elimina praful atât în schele cât și în timpul transportului.

De asemenea, se observă că viteza medie a gazului pentru care particulele de praf încep să plutească este de aproximativ două ori mai mare decât viteza de la care particulele de praf încep să fie antrenate.

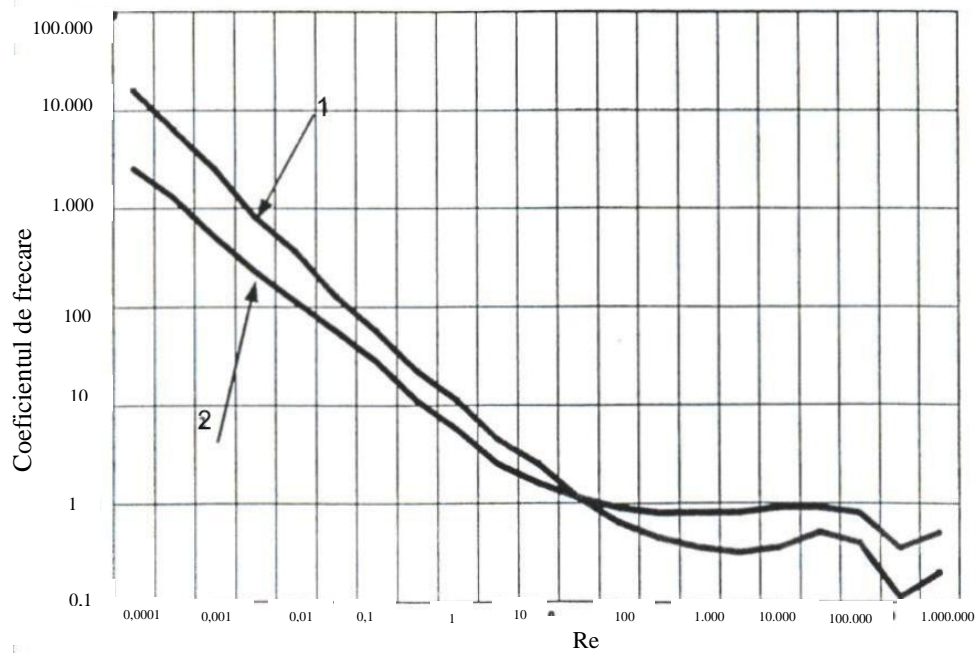


Fig. 3.1. Valoarea coeficientului de frecare în funcție de numărul Reynolds:
 1-particule sferice; 2-particule sferice, cu axa perpendiculară pe direcția de mișcare

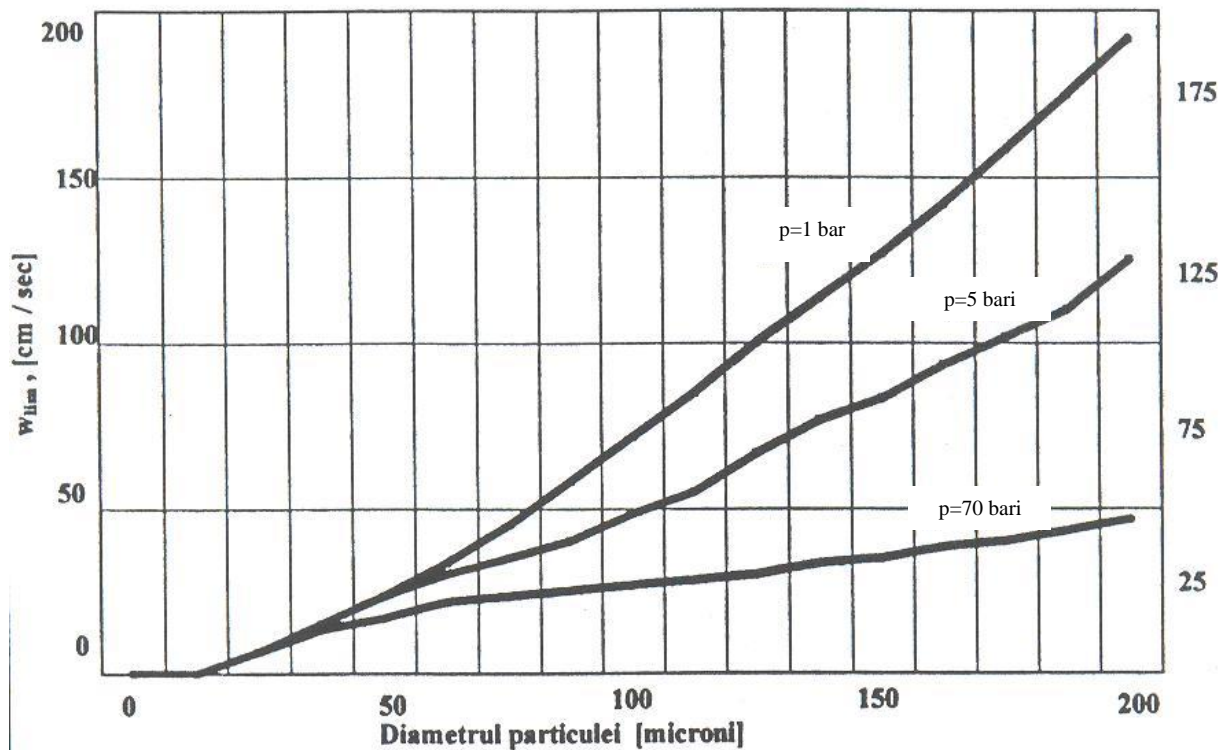


Fig. 3.2. Influența presiunii asupra vitezei de depunere a particulelor

Experimental s-a constatat că o influență deosebită atât asupra antrenării particulelor cât și asupra depunerii particulelor pe conducte, o are presiunea gazului purtător. Rezultatele obținute în cazul presiunilor de 1 bar, 5 bari și 10 bari se prezintă în figura 3.2. De unde se vede că pe măsură ce presiunea gazului natural crește, viteza de depunere a particulelor scade spre zero și sunt antrenate și particulele de dimensiuni din ce în ce mai mici.

De asemenea, tot experimental s-a constatat că mișcarea particulelor este influențată de rezistență la înaintare R_i și de vâscozitatea fluidului purtător η . De exemplu, presupunând o particulă sferică cu diametrul $d_p = 0,003\text{m}$ și densitatea $\rho_p = 2400\text{kg/m}^3$, pentru a se deplasa cu viteza terminală $w_{\text{lim}} = 0,05\text{ m/s}$ printr-un fluid cu densitatea $\rho_g = 950\text{ kg/m}^3$ întâmpină o rezistență la înaintare R_i , care se determină considerând că mișcarea individuală, uniformă și unidirecțională a particulei prin fluid este neinfluențată de prezența altor particule sau a pereților conductei. Când forța externă este cea gravitațională asupra particulei solide vor acționa trei forțe, definite de relațiile următoare:

- forța gravitațională F_g , de forma:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \cdot \rho_p \cdot g, \quad (3.16)$$

- forța lui Arhimede F_A , de forma:

$$F_A = \frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \cdot \rho_g \cdot g, \quad (3.17)$$

- rezistența la înaintare R_i , de forma:

$$R_i = f_f \cdot \frac{d_p^2}{4} \cdot \frac{\rho_g w_{\text{lim}}}{2}, \quad (3.18)$$

în care:

d_p este diametrul particulei sferice, în m ;

ρ_p - densitatea particulei sferice, în kg/m^3 ;

f_f - factorul de formă; $\frac{\pi d_p^2}{4}$ - aria udată a particulelor, în m^2 ;

$\frac{\rho_g w_{\text{lim}}}{2}$ - energia caracteristică, în kg/ms^2 .

Pentru determinarea rezistenței la înaintare este necesară cunoașterea factorului de formă care depinde de forma particulei și de Reynolds particulă (R_{ep}). Acest factor se calculează cu relații diferite în funcție de domeniul de curgere:

- în regim laminar, domeniul lui Stokes, când $R_{ep} \leq 2$;

- în regim intermediar, domeniul lui Allen, când $2 < R_{ep} \leq 500$;

- în regim turbulent, domeniul lui Newton, când $510 < R_{ep} \leq 150.000$.

În condițiile date, se presupune că domeniul de curgere este corespunzător regimului laminar și factorul de formă se calculează cu relația:

$$f_f = \frac{4}{3} \cdot \frac{d_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_g)}{w_{\text{lim}}^2 \cdot \rho_g} = 23,96, \quad (3.19)$$

Cunoscând factorul de formă se determină rezistența la înaintare cu ajutorul relației (3.18) și rezultă:

$$R_i = 23,96 \cdot \frac{x \cdot 0,003^2}{4} \cdot \frac{950 \cdot 0,05^2}{2} = 2,01 \cdot 10^{-4} N, \quad (3.20)$$

Factorul de formă în domeniul lui Stokes se mai poate determina și ca relația:

$$f_f = \frac{24}{R_{ep}}, \quad (3.21)$$

în care: Reynolds particulă are expresia:

$$R_{ep} = \frac{d_p \cdot w_{lim} \cdot \rho_g}{\eta}, \quad (3.22)$$

Vâscozitatea fluidului η se determină înlocuind R_{ep} dat de (3.22) în relația (3.21) și rezultă:

$$\eta = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g)}{18 \cdot w_{lim}} = \frac{0,003^2 (2400 - 950) \cdot 9,81}{18 \cdot 0,05} = 0,142 \text{ kg/ms} \quad , \quad (3.23)$$

Se poate verifica dacă presupunerea anterioară a domeniului de curgere a fost făcută corect, calculează Reynolds particulă R_{ep} , cu relația:

$$R_{ep} = \frac{d_p \cdot w_{lim} \cdot \rho_g}{\eta} = \frac{0,003 \cdot 0,05 \cdot 950}{0,142} = 1,00 \quad , \quad (3.24)$$

Deci $R_{ep}=1$, se află în domeniul curgere laminară și presupunerea a fost făcută corect.

Tot experimental s-a determinat că o influență deosebită asupra vitezei de depunere a particulei are și vâscozitatea gazului purtător. De exemplu, o particulă considerată sferică de diametru $d_p = 0,005$ m și densitatea $\rho_p = 1800$ kg/m³ ce se deplasează sub acțiunea câmpului gravitațional într-un fluid newtonian cu densitatea $\rho_g = 1,31$ kg/m³ și vâscozitatea $\eta = 0,03 \cdot 10^{-3}$ kg/ms, va avea o viteză uniformă de depunere w_{lim} , care se determină pornind de la criteriul lui Arhimede privind domeniile de curgere, astfel:

$$A_r = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot g}{\eta^2} \cdot \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g}, \quad (3.25)$$

unde: d_p este diametrul particulei sferice, în m; ρ_p - densitatea particulei sferice, în kg/m³; g - accelerația gravitațională, în m/s²; ρ_g - densitatea fluidului, în kg/m³; η - vâscozitatea fluidului, în kg/ms.

Înlocuind valorile în relația (3.25) rezultă:

$$A_r = \frac{0,005^3 \cdot 1,31^2 \cdot 9,81}{(0,03 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \frac{1800 - 1,31}{1,31} = 3,21 \cdot 10^6, \quad (3.26)$$

Ținând cont de această valoare rezultă că domeniul lui Newton ($84.000 < A_r < 7,4 \cdot 10^9$) și pentru acest domeniu, Reynolds particulă R_{ep} are expresia:

$$R_{ep} = 1,71 \cdot A_r^{0,5} = 3036,72 \quad (3.27)$$

Valoarea lui Reynolds se situează în domeniul $500 < R_e \leq 150.000$ în acest domeniu factorul de formă f_f este practic constant ($f_f = 0,44$) și cu ajutorul relației (3.19) se poate calcula viteza de depunere w_{lim} cu relația:

$$w_{lim} = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{d_p \cdot g (\rho_p - \rho_g)}{f_f \cdot \rho_g}} = 14,29 \text{ [m/s]} \quad , \quad (3.28)$$

În cazul separării și filtrării folosind cicloanele, foarte importante sunt: natura particulelor, viteza de intrare a gazului natural de ciclare, debitul de gaze, pierderea de presiune, domeniul de curgere, numărul de rotație și dimensiunile filtrului. Problemele care se

pun sunt legate de dimensiunea minimă a particulelor ce pot fi reținute și de debitul de gaze naturale ce poate fi filtrat printr-un astfel de filtru.

De exemplu, dacă într-un ciclon intră un debit de 2500 Nm^3 gaz natural/h, care conține o fază dispersă de particule solide de $10 \mu\text{m}$ și densitatea $\rho_p = 2400 \text{ kg/m}^3$ cu o viteză de intrare $v_i = 20 \text{ m/s}$ și vâscozitatea $\eta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$ se pune problema dacă acest tip de ciclon reține toate particulele cu dimensiuni mai mari de $10 \mu\text{m}$.

Considerând că pierderea de sarcină pe care o încearcă gazele la trecerea prin ciclu este de $700 \text{ N/m}^2 = \Delta P_f$, că numărul de rotații este $n_r = 1,5$ și coeficientul pierderii de sarcină $\xi_e = 100$, atunci separarea particulelor se poate realiza dacă valoarea diametrului particulelor d_p va fi mai mare decât diametrul minim al particulelor $d_{p\text{min}}$ pentru domeniul de curgere în care are loc separarea. Se admite că separarea are loc în domeniul lui Stokes ($R_{ep} < 2$) și atunci, pentru acest domeniu, $d_{p\text{min}}$ este definit de următoarea relație:

$$d_{p\text{min}} = \sqrt[3]{\frac{\eta \cdot R}{2\pi \cdot n_r \cdot \rho_p \cdot v_i}}, \quad (3.29)$$

unde: η este vâscozitatea gazului, în kg/ms ; R – raza de variație a părții cilindrice a filtrului, în m ; D – diametrul părții cilindrice, în m ; n_r - numărul de rotații; ρ_p - densitatea particulei, în kg/m^3 ; v_i - viteza de intrare a gazului în cilindru, în m/s .

Aflarea diametrului minim al particulei presupune cunoașterea diametrului părții cilindrice, de aceea se pleacă de la ecuația continuității valorice, dată de relația:

$$Q_c = A_c \cdot v_c, \quad (3.30)$$

în care: Q_c este debitul de gaze care circulă pe porțiunea cilindrică; în m^3/h A_c - aria părții cilindrice, dată de relația:

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4}, \quad (3.31)$$

și v_c - viteza convențională, viteza gazelor prin porțiunea cilindrică, în m/s .

Viteza convențională se determină din relația:

$$\Delta P_f = \xi \cdot \frac{\rho_g \cdot v_c^2}{2}, \quad (3.32)$$

în care: ρ_g reprezintă densitatea gazului, exprimată în kg/m^3 și se determină din relația:

$$\rho_g = \frac{1,013 \cdot 28,9}{0,083(273 + 100)} = 0,946 \text{ kg/m}^3, \quad (3.33)$$

unde M_g este masa molară medie a gazului ($28,9 \text{ kg/kmol}$); R – constanta gazelor ($0,083 \text{ m}^3 \cdot \text{bar/kmol} \cdot \text{k}$).

Cu relația (3.32) se determină viteza convențională v_c , astfel:

$$v_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_f}{\xi \cdot \rho_g}} = 3,85 [\text{m/s}], \quad (3.34)$$

Diametrul părții cilindrice va rezulta din ecuația (3.30), adică:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_c}{3600 \cdot \pi \cdot v_c}} = 0,479 [\text{m}], \quad (3.35)$$

Diametrul minim al particulei se calculează cu relația (3.36) și rezultă:

$$d_{p\min} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,24}{2\pi \cdot 1,5 \cdot 2400 \cdot 20}} = 9,77[\mu\text{m}] , \quad (3.37)$$

Se observă că este realizată condiția de separare deoarece $d_p \geq d_{p\min}$. Această condiție a fost realizată în domeniul de curgere Stokes și acest lucru trebuie verificat calculând R_{ep} cu relația:

$$R_{ep} = \frac{d_p \cdot v_c \cdot \rho_g}{\eta} = 1,82 , \quad (3.38)$$

Se observă că $R_{ep} < 2$, deci domeniul de curgere a fost ales corect.

De cele mai multe ori se pune problema determinării eficienței globale a unui separator ciclon care separă particulele solide dintr-un flux de gaze. Distribuția mărimii particulelor separate într-un ciclon, în timpul unor determinări făcute este dată în tabelul 3.7.

Pentru a calcula eficiența globală se procedează astfel:

- se calculează succesiv $d_{p\min}$, pentru fiecare diametru mediu al particulelor din tabelul 3.7;
- valoarea lui $d_{p\min}$ este utilizată apoi în calculul eficienței individuale η_i , folosind relația:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\left(\frac{d_p}{d_{p\min}}\right)^2} , \quad (3.39)$$

- eficiența globală η , se calculează cu relația:

$$\eta = \sum m_i \cdot \eta_i , \quad (3.40)$$

unde: m_i reprezintă fracția masică a particulelor de o anumită dimensiune

Tabelul 3.7. Distribuția mărimii particulelor solide din gaze

Nr. crt.	d_p [μm]	Fracții masice m_i	$d_{p\min}$ [μm]
1.	1	0,03	0,1
2.	5	0,20	0,5
3.	10	0,15	1,0
4.	20	0,20	2,0
5.	30	0,16	3,0
6.	40	0,10	4,0
7.	50	0,06	5,0
8.	60	0,03	6,0
9.	> 60	0,07	-
Total		1,00	-

Calculul eficienței globale se efectuează tabelar, rezultând valorile din tabelul 3.8.

Tabelul 3.8. *Calculul eficienței globale η*

Nr. crt.	Fracții masice m_i	d_{pmin} [μm]	η_i	$m_i \cdot \eta_i$ [%]
1.	0,03	0,1	0	0,0
2.	0,20	0,5	20	4,0
3.	0,15	1,0	50	7,50
4.	0,20	2,0	80	16,0
5.	0,16	3,0	90	14,4
6.	0,10	4,0	93	9,3
7.	0,06	5,0	95	5,70
8.	0,03	6,0	98	2,94
9.	0,07	-	100	7,0
Total	1,00	-	-	66,84

Prin urmare, în proiectarea unui element de filtrare trebuie avute în vedere elementele: diametrul particulei solide; forma și mărimea lor; densitatea particulelor; debitul gazului natural; presiunea gazelor naturale de intrare și de ieșire; căderea de presiune, caracteristicile fizice și chimice ale gazelor naturale ce trebuie filtrate.

3.3. CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND POSIBILITĂȚILE DE UTILIZARE A UNDELOR ULTRASONICE ÎN PROCESUL DE FILTRARE A GAZELOR NATURALE

Din analiza metodelor de filtrare clasice și a echipamentelor folosite la filtrarea și purificarea gazelor, prezentată în capitolele anterioare au rezultat o serie de limite ale metodelor folosite și o serie de dezavantaje ale acestora, dintre care cele mai importante sunt următoarele:

- ✓ gradul de reținere al particulelor este variabil în timpul funcționării, existând pericolul unei separări incomplete în special a particulelor cu diametrul mai mic de 5 μm ;
- ✓ de cele mai multe ori este necesară o filtrare în trepte, care presupune mai multe aparate de filtrare și un sistem de conducte mai complicat, cu o posibilitate mai redusă a verificării acestora;
- ✓ pierderea de presiune este variabilă, în mai multe cazuri ajungând la valoarea limită admisă după o scurtă perioadă de funcționare, datorită mai ales fenomenului de îmbâcsire și de colmatare a elementelor filtrante;
- ✓ necesitatea curățirii periodice a elementelor filtrante și prin urmare scăderea eficienței procesului de utilizare a gazelor naturale și complicarea sistemului de transport și distribuție a acestora prin existența în paralel a două căi de transport ce funcționează în tandem;
- ✓ imposibilitatea reținerii tuturor particulelor solide și lichide, cele rămase constituind un agent de corodare agresiv al tuturor părților cu care vin în contact în conductele de transport, în aparatura de măsură, control și distribuție din aval;
- ✓ consum energetic ridicat și cost de întreținere destul de mare în anumite cazuri (filtru ciclon, filtrele electrostatice);

✓ limitarea vitezei de intrare și a vitezei de curgere, care în perioadele de vârf de consum sunt mereu depășite conducând în mod expres la erodarea conductelor etc.

Pentru a reduce o parte din aceste dezavantaje și pentru a îmbunătății substanțial procesul de filtrare a gazelor naturale, cercetările cuprinse în această teză de doctorat propun utilizarea undelor ultrasonice în procesul de filtrare și purificare, în urma analizei principalelor fenomene ce au loc la propagarea undelor ultrasonice printr-un mediu de gaze naturale.

3.3.1. Principalele fenomene și efecte ce apar la propagarea undelor ultrasonice într-un mediu de gaze naturale

Propagarea undelor ultrasonice într-un mediu de gaz, în acest caz prin curentul de gaze naturale purtător de particule solide și lichide este de mare importanță practică în stabilirea principalelor fenomene și mai ales efecte ce au loc în timpul activării ultrasonice a spațiului prin care gazele naturale curg cu o numită viteză de curgere.

Cunoașterea particularităților propagării undelor ultrasonice în mediul de gaze naturale va permite proiectarea unor filtre ultrasonice cu anumite caracteristici de proiectare și de exploatare, de aceea ele, vor fi analizate în continuare.

3.3.1.1 Viteza de propagare a undelor ultrasonice în gazele naturale

În gaze, propagarea ultrasunetelor se face prin unde longitudinale. Relația de determinare a vitezei de propagare a undelor ultrasonice longitudinale în gaze se poate stabili utilizând modelul fizic de propagare a undelor de presiune într-o conductă infinit de lungă. Fie un piston, aflat într-o conductă, a cărui suprafață transversală este egală cu unitatea. Când are loc variația unității de volum de gaz, atunci pistonul se deplasează în conductă în conformitate cu relația:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dx}{dy}, \quad (3.41)$$

Dacă se consideră ecuația transformării adiabatice pentru gaze de forma:

$$pV^\chi = \text{const.} \quad (3.42)$$

și se diferențiază se obține:

$$\frac{dp}{p} = -\chi \frac{dV}{V} = -k \frac{dx}{dy}, \quad (3.43)$$

La deplasarea pistonului în conductă, presiunea variază după legea;

$$p = -p_o - \chi p_o \frac{dx}{dy}, \quad (3.44)$$

Căderea de presiune, adică forța care acționează pe unitatea de volum a gazului va fi dată de relația:

$$-\frac{dp}{dy} = p_o \chi \frac{d^2 x}{dy^2}, \quad (3.45)$$

După legea a doua a dinamicii această forță reprezintă produsul dintre masa gazului din unitatea de volum și accelerația sa, adică:

$$p_o \chi \frac{d^2 \chi}{dy^2} = \rho \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = \frac{\chi p_o}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2}, \quad (3.47)$$

care coincide cu ecuația diferențială de propagare a undei plane într-un mediu liniar, izotrop, omogen și conservativ, dată de expresia:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial t^2} = c^2 \cdot \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2}, \quad (3.48)$$

Deci, viteza de propagare a undelor longitudinale în gaze este dată de relația:

$$c = \sqrt{\frac{\chi p_o}{\rho_g}}, \quad (3.49)$$

unde: p_o este presiunea la care se găsește gazul prin care se propagă unda ultrasonică; ρ - densitatea mediului; χ - raportul căldurilor specifice, variabil după numărul atomilor existenți în moleculă.

În tabelul 3.9 sunt indicate valorile vitezei de propagare a undelor ultrasonice calculate și determinate experimental, pentru câteva gaze.

Tabelul 3.9. Valorile vitezei de propagare a undelor acustice calculate și determinate experimental în cazul unor gaze.

Nr. crt.	Gazul	Temperatura [°C]	Viteza sunetului [m / s]		Frecvența de măsurare [kHz]
			calculată	măsurată	
1	Helium	0	989	972	970
2	Argon	0	308	308	970
3	Neon	0	432	435	970
4	Oxigen	0	316	315	970
5	Azot	0	337	337	970
6	Hidrogen	0	1237	1260	38,6
7	Oxid de carbon	1000	717	726	27,4
8	Bioxid de carbon	30	275	276	92
9	Gaz metan	20	222	224	111
10	Sulfură de carbon	45	214	215	1000
11	Aer	0	331,6	331,4	1,0

Experimental se constată că viteza de propagare a ultrasunetelor depinde și de variația temperaturii mediului prin care se propagă undele ultrasonice, deoarece în cazul gazelor ideale:

$$pV = RT, \quad (3.50)$$

în care: V este volumul molar al gazului; R - constanta gazelor perfecte; T - temperatura absolută.

Ținând cont că $M = V\rho$ rezultă:

$$c = \sqrt{\chi \frac{RT}{M}}, \quad (3.51)$$

relație care demonstrează dependența vitezei de propagare a undelor ultrasonice în gaze de temperatură și structura moleculară a gazului. Astfel, viteza de propagare a undelor ultrasonice în gaze este proporțională cu rădăcina pătrată a temperaturii acestuia.

Folosind ecuația gazelor perfecte și ținând cont de valoarea vitezei de propagare c_0 , a undelor sonore la $t_0 = 0^\circ C$ ($c_0 = 331,4$ m/s) se poate determina o relație de dependență temperatură-viteză, de forma:

$$c(t^\circ C) = c_0(0^\circ C) + 0,6t, \quad (3.52)$$

în care: t este temperatura mediului prin care se propagă undele ultrasonice, în $^\circ C$.

Se observă deci că viteza de propagare a undelor ultrasonice crește pe măsură ce temperatura gazului crește, relație extrem de importantă în cazul transportului gazelor naturale prin conducte și mai ales la ieșirea și intrarea în elementele de filtrare.

În cele mai multe cazuri este necesară introducerea energiei ultrasonice în zona de lucru, problemă destul de dificil de rezolvat mai ales că este necesar un sistem de conducere, concentrare și focalizare a acesteia în mediul de filtrat și purificat. De aceea este necesară și cunoașterea fenomenelor ce au loc la propagarea ultrasunetelor în medii solide.

Viteza de propagare c , a undelor longitudinale într-o bară este dată de relația:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3.53)$$

Expresia (3.53) este valabilă pentru undele elastice longitudinale care se propagă în bare ale căror dimensiuni transversale sunt cu mult mai mici decât lungimea de undă. Dacă undele longitudinale elastice se propagă într-un corp solid nelimitat, viteza de propagare c este dată de relația:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (3.54)$$

în care: μ este coeficientul lui Poisson.

Această relație arată dependența vitezei de propagare a undelor longitudinale în solide de densitate și constantele elastice ale mediului. În tabelul 3.10 se indică pentru diverse materiale solide, valorile vitezei de propagare a undelor ultrasonice, densității mediului și impedanței acustice specifice.

Tabelul 3.10. Viteza de propagare a undelor ultrasonice, densitatea și impedența acustică specifică pentru câteva materiale mai des întâlnite ca impurități solide în gaze

Material	Viteza sunetului, $c \times 10^3$ [m/s]		Densitatea 10^3 [daN/m ³]	Impedența acustică specifică, 10^6 [daN/m ² s]
	În bare	În mediu nelimitat		
1	2	3	4	5
Aluminiu	5,24	6,40	2,70	1,43
Bismut	1,79	2,18	9,80	1,75
Beriliu	10,58	12,9	1,86	1,968
Alamă	3,42	4,25	8,55	2,92
Cadmiu	2,40	2,89	8,64	2,07
Magneziu	4,75	5,80	1,74	0,827
Constantan	4,30	5,24	8,88	3,82
Molibden	5,17	6,30	10,22	5,28
Cupru	3,58	4,60	8,93	3,20
Aur	2,03	3,24	19,32	3,92
Fier	5,17	5,85	7,87	4,07
Plumb	1,25	2,40	11,37	1,42
Nichel	4,76	5,60	8,90	4,24
Inconel	4,67	5,70	8,60	4,01
Platină	2,80	3,96	21,50	6,02
Monel	4,43	5,40	8,80	3,90
Argint	2,64	3,60	10,50	2,77
Oțel (mediu aliat)	5,05	5,90	7,80	3,94
Tantal	3,35	-	16,60	5,56
Staniu	2,73	3,32	7,29	1,99
Titan	4,26	5,20	44,505	1,92
Wolfram	4,31	5,46	19,30	8,32
Uraniu	2,79	3,40	19,05	53,15
Zinc	3,91	4,17	7,10	2,71
Plută	0,50	-	0,24	0,012
Cuarț	5,37	5,57	2,65	1,42
Sticlă	4,18	5,10	2,32	0,97
Granit	3,95	-	2,75	1,09
Sare Seignette	3,20	-	1,77	0,566
Sare obișnuită	4,51	4,78	2,17	0,979
Marmură	3,81	-	2,65	1,01
Stejar	4,10	-	0,80	0,328
Polistiren	2,35	-	1,06	0,25
Polietilenă	1,90	-	0,90	1,71
Cauciuc	1,48	-	0,90	0,14
Porțelan	5,60	3,20	2,45	1,37
Gheață	4,00	-	0,90	0,36
Nailon	2,60	-	1,11	0,29
Plexiglas	2,70	-	1,18	0,32

Viteza de propagare a undelor longitudinale într-un corp solid nelimitat este mai mare decât în bare, deoarece la propagarea undelor, fiecare element de volum al mediului nelimitat suferă o compresiune sau o întindere laterală, suplimentară, din partea elementelor de volum vecine.

Undele transversale elastice pot fi excitate atât într-un volum limitat al unui corp, cât și în întregul corp. Suspendând o bară și aplicând o lovitură la capătul liber, în locul unde s-a aplicat lovitura, un strat de particule se va deplasa din poziția de echilibru, efectuând o mișcare de alunecare. Prezența forțelor de elasticitate dintre particulele barei va provoca deplasarea stratului învecinat, deci în bară va apare o undă de alunecare care se va răspândi în lungul ei.

Viteza de propagare a undelor transversale c_t este dată de relația:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3.55)$$

unde: G este modulul de elasticitate transversal; ρ -densitatea mediului solid.

Ținând cont de expresia de legătură dintre G și E , relația de calcul a vitezei de propagare a undelor transversale c_t , devine:

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}}, \quad (3.56)$$

Analizând relația (3.56) se constată că:

$$c_t = c \sqrt{\frac{1}{2(1+\mu)}}, \quad (3.57)$$

deci viteza de propagare a undelor transversale este de aproximativ două ori mai mică decât viteza de propagare a undelor longitudinale.

Unde analoge celor care se propagă pe suprafața apei pot fi produse pe o suprafață liberă a unui corp solid elastic datorită forțelor de elasticitate și de inerție. Astfel de unde se amortizează rapid, aproape că nu pătrund în volumul corpului, iar traiectoria de mișcare a particulelor reprezintă cercuri aproximative a căror suprafață conține direcția de propagare a undei. Trajectoriile de deplasare a particulelor undelor de suprafață au componente paralele și perpendiculare pe suprafața corpului elastic.

Viteza de propagare a acestor unde (unde Rayleigh), care se propagă pe suprafața unui corp solid se determină cu relația:

$$c_s = \frac{0,87 + 1,12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \cong 0,9 \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3.58)$$

și nu depinde de lungimea lor de undă. Aproximativ, se poate considera că viteza undelor de suprafață este egală cu 0,9 din viteza undelor transversale.

3.3.1.2 Reflexia și refracția undelor plane

La suprafața de separare a două medii, (cazul particulelor solide și lichide existente în gazul purtător) o undă ultrasonică suferă o *reflexie* – o parte din energia ultrasonică incidentă este redată primului mediu și o *refracție* – restul de energie acustică este transmisă în cel de-al doilea mediu. Se produce în acest fel în cazul undelor sub incidență normală (fig.3.3, a) o *undă reflectată* și o *undă transmisă*. În cazul unor unde sinusoidale și în cazul când nu există pierderi de energie ultraacustică la suprafața de separație, ecuația celor trei unde are forma:

$$-p_i = P_i \sin(\omega t - k_1 x); \quad p_r = P_r \sin(\omega t + k_1 x); \quad p_{tr} = P_{tr} \sin(\omega t - k_2 x), \quad (3.59)$$

în care: k_1 și k_2 sunt numerele de undă pentru primul și al doilea mediu; P_i ; P_r ; și P_{tr} – cantități complexe, corespunzătoare amplitudinii presiunii ultrasonice.

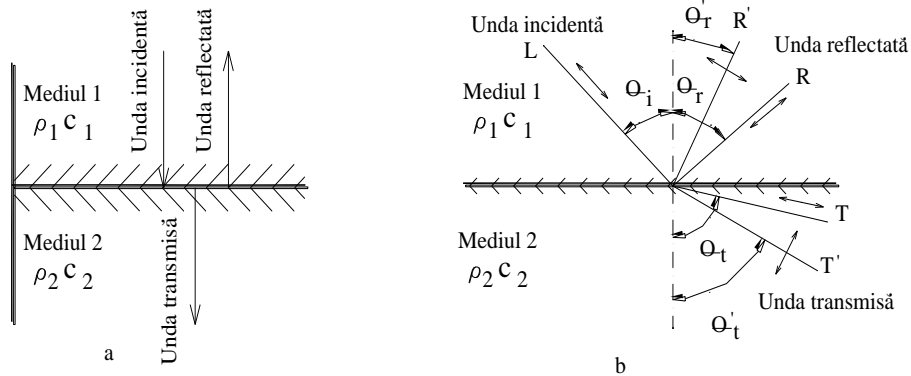


Fig. 3.3. Reflexia și refracția undelor acustice:

a - sub incidență normală; b - sub incidență oblică.

$\rho_i c_i$ – impedanța acustică; θ_i ; θ_r ; θ_t – unghiurile de incidență, respectiv de reflexie și de transmisie; L; R; T – undele longitudinale de incidență, respectiv de reflexie; R'; T' – undele transversale de reflexie și respectiv de transmisie

Din legea continuității presiunii și vitezei de oscilație a particulelor în cele două medii, rezultă:

$$p_i - p_r = p_{tr} , \quad v_i - v_r = v_{tr} , \quad (3.60)$$

În condițiile când impedanțele celor două medii sunt $\rho_1 c_1$ și respectiv $\rho_2 c_2$, se obține pentru factorul de reflexie ultrasonică R_a , raportul:

$$R_a = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} , \quad (3.61)$$

iar pentru factorul de transmisie ultrasonică T_a , raportul:

$$T_a = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} , \quad (3.62)$$

Uneori, în locul rapoartelor presiunilor unei reflectate și unei incidente se folosește raportul intensităților ultraacustice, definindu-se coeficientul de reflexie ultraacustică k_r și coeficientul de transmisie ultraacustică k_{tr} , dați de relațiile:

$$k_r = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2 ; k_{tr} = \frac{I_{tr}}{I_i} = \left(\frac{4\rho_2 c_2 \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2 , \quad (3.63)$$

cu respectarea condiției:

$$k_r + k_{tr} = 1 , \quad (3.64)$$

Din (3.63) se constată că factorul de reflexie va fi cu atât mai mare și deci factorul de transmisie cu atât mai mic cu cât impedanțele caracteristice ale mediilor în contact sunt mai diferite. Valorile coeficienților de transmisie și de reflexie acustică pentru câteva medii în contact mai des întâlnite în cazul gazelor naturale sunt date în tabelul 3.11.

Tabelul 3.11. Valorile coeficientului de reflexie ultrasonică și de transmisie ultraacustică pentru anumite suprafețe de separație, corespunzător cu natura și forma impurităților solide din gaze

Natura mediilor în contact	k_r	k_{tr}
Aer – apă	0,99991	0,0001
Apă – oțel	0,875	0,125
Cauciuc – apă	0,001	0,999
Plexiglas – oțel	0,755	0,245
Cuarț – aer	0,9998	0,0002
Cuarț – apă	0,660	0,340
Cuarț - plexiglas	0,401	0,599

Folosirea ultrasunetelor în procesul de filtrare și purificare și chiar în modificarea diferitelor medii în care sunt introduse, pune problema propagării undelor ultrasonice prin trei medii. Generalizarea problemei se poate face considerând că undele ultrasonice în propagarea lor străbat trei medii extinse la infinit de impedanțe $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$ și $\rho_3 c_3$, stratul de mijloc având grosimea d (fig. 3.4) (de exemplu, cazul unei impurități solide înglobată într-o picătură lichidă). Datorită reflexiei la planul de separație dintre mediul 1 și mediul 2, în mediul 1 va exista o undă incidentă p_{i1} și una reflectată p_{r1} de forma:

$$p_{i1} = P_{i1} \exp[jk_1(c_1 t - x)] , \quad (3.65)$$

$$p_{r1} = P_{r1} \exp[jk_1(c_1 t + x)] , \quad (3.66)$$

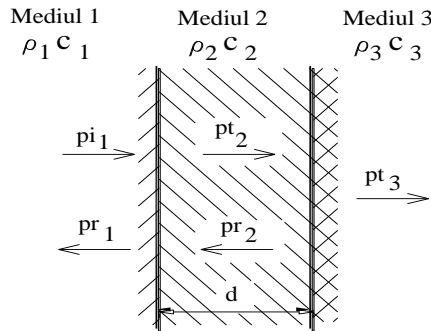


Fig. 3.4. Propagarea undelor ultrasonice sub incidență normală prin trei medii extinse la infinit (gaz, impurități, lichid) .

În mediul al doilea va exista o undă transmisă din primul mediu p_{t2} și una reflectată p_{r2} de forma:

$$p_{t2} = P_{t2} \exp[jk_2(c_2 t - x)] , \quad (3.67)$$

$$p_{r2} = P_{r2} \exp[jk_2(c_2 t + x)] , \quad (3.68)$$

În cel de-al treilea mediu va exista doar o singură undă, unda transmisă dincolo de planul de separație dintre mediul 2 și mediul 3, notată cu p_{t3} de forma:

$$p_{t3} = P_{t3} \exp[jk_3(c_3 t - (x - d))] , \quad (3.69)$$

Punând condițiile la limita de separare mediul 1 – mediul 2 ($x=0$) se obțin pentru continuitatea presiunilor ultraacustice și respectiv vitezelor particulei expresiile:

$$P_{i1} + P_{r1} = P_{t2} + P_{r2} , \quad (3.70)$$

$$\rho_2 c_2 (p_{i1} - p_{r1}) = \rho_1 c_1 (p_{t2} + p_{r2}), \quad (3.71)$$

La limita de separare mediul 2 – mediul 3 ($x=d$), aceleași condiții conduc la:

$$P_{t2} \exp(-jk_2 d) + P_{r2} \exp(jk_2 d) = p_{t3}, \quad (3.72)$$

$$\rho_3 c_3 [\rho_{t2} \exp(-jk_2 d) - P_{r2} \exp(jk_2 d)] = \rho_2 c_2 p_{t2}, \quad (3.73)$$

Folosind expresiile (3.65)...(3.73) se poate determina expresia coeficientului de transmisie ultraacustică k_{tr} , cu relația:

$$k_{tr} = \frac{4 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_3 c_3} (1 + \operatorname{tg}^2 k d)}{\left(1 + \frac{\rho_1 c_1}{\rho_3 c_3}\right)^2 + \left(\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3}\right)^2 \operatorname{tg}^2 k_2 d}, \quad (3.74)$$

Expresia (3.74) arată dependența coeficientului de transmisie ultraacustică k_{tr} de mărimea relativă a impedanțelor caracteristice ale mediilor prin care se propagă undele ultrasonice și de diametrul d , al particulei solide. Dacă în (3.74) se ia $k_2 d = n\pi$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) se obține pentru coeficientul de transmisie ultraacustică o relație de forma:

$$k_{tr} = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{(\rho_3 c_3 + \rho_1 c_1)^2}, \quad (3.75)$$

analogă cu cea determinată la propagarea undelor ultrasonice dintr-un mediu în alt mediu.

Din (3.75) se vede că mediul intermediar nu are nici o influență asupra transmisiei undei ultrasonice, iar în situația când mediul 1 și mediul 3 au aceeași impedanță caracteristică, coeficientul de transmisie acustică devine egal cu unitatea (întreaga energie acustică se transmite din primul mediu în cel de-al treilea mediu).

Dacă în relația (3.75) se ia $k_2 d = (2n-1)\frac{\pi}{2}$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) se obține pentru coeficientul de transmisie ultraacustică expresia:

$$k_{tr} = \frac{4 \frac{\rho_1 c_1}{\rho_3 c_3}}{\left(\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3}\right)^2}, \quad (3.76)$$

Se poate obține și în acest caz o transmisie integrală a energiei acustice din primul mediu în cel de al treilea mediu, dacă:

$$\rho_2 c_2 = \sqrt{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}, \quad (3.77)$$

Cu cât însă impedanța primului mediu și cea a mediului al doilea este mai mare cu atât coeficientul de transmisie este mai redus și atenuarea este mai mare.

În cazul undelor longitudinale plane sub incidență oblică (fig.3.3, b) presiunea ultraacustică corespunzătoare undei incidente LO este dirijată oblic în raport cu suprafața de separare a celor două medii în contact, putând fi descompusă în două componente – una normală și una tangențială. Datorită acestui fapt iau naștere în ambele medii și unde longitudinale și unde transversale. Direcțiile de propagare ale diferitelor unde se pot determina aplicând legea lui Snell, adică:

$$\theta_r = \theta_i, \quad \frac{c_1}{\sin \theta_i} = \frac{c_1'}{\sin \theta_r'} = \frac{c_2}{\sin \theta_r} = \frac{c_2'}{\sin \theta_i'}, \quad (3.78)$$

în care c_1, c_2, c_1', c_2' sunt vitezele undelor longitudinale și respectiv transversale în cele două medii.

În cazul când unghiul de incidență θ_i are o astfel de valoare încât unghiul de refracție al unde longitudinale θ'_i devine 90° , unda longitudinală este reflectată total, în cel de-al doilea mediu existând doar unde transversale. În acest caz se deduce din (3.78) pentru θ_{i1} valoarea:

$$\theta_{i1} = \arcsin \frac{c_1}{c_2}, \quad (3.79)$$

Dacă unghiul de incidență θ_i are o astfel de valoare încât unghiul de reflexie θ'_r , corespunzător unde transversale devine 90° , unda transversală este reflectată total, în cel de-al doilea mediu existând doar unde de suprafață. Valoarea lui θ_{i2} în acest caz este:

$$\theta_{i2} = \arcsin \frac{c_1}{c'_1}, \quad (3.80)$$

Cunoașterea acestor valori limită ale unghiului de incidență este foarte importantă în construirea traductoarelor și concentratoarelor de energie ultrasonoră în vederea transmiterii unui anumit tip de undă într-un mediu supus prelucrării sau cercetării. Coeficientul de reflexie ultraacustică k_r și coeficientul de transmisie ultra acustică k_{tr} , în cazul undelor sub incidență oblică se determină cu relațiile:

$$k_r = \left(\frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta'_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta'_i} \right)^2, \quad (3.81)$$

$$k_{tr} = \frac{4 \rho_1 c_1 \cos \theta \cos \theta'_i}{(\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta'_i)^2}, \quad (3.82)$$

Se vede că și în acest caz este valabilă relația $k_r + k_{tr} = 1$, determinată în cazul undelor sub incidență normală.

Un caz des întâlnit în practică este cel al cuplajului dintre un transductor ultrasonic și focarul de analiză sau de prelucrare unde se pune problema propagării undelor ultrasonice în trei sau mai multe domenii de impedanțe caracteristice diferite. În aceste situații, coeficientul de reflexie ultraacustică și coeficientul de transmisie ultraacustică se determină tot ca rapoarte dintre intensitățile ultraacustice corespunzătoare diferitelor tipuri de unde ce se propagă în fiecare mediu de contact.

Fie trei medii de contact diferite, de impedanțe acustice diferite $\rho_1 c_1$, $\rho_2 c_2$, $\rho_3 c_3$ și o undă longitudinală plană LO (fig.3.5) care cade sub unghiul θ_i , oarecare față de normala ON. În mod analog ca mai sus factorii de reflexie și de transmisie se calculează cu relațiile:

$$k_r = \frac{(\rho_1 c_1 A'_1 \cos \theta_3 + \rho_3 c_3 A_3 \cos \theta_1)^2 \cos \theta_2 \cos^2(k_2 d \cos \theta_2) + A}{(\rho_1 c_1 \cos \theta_3 + \rho_3 c_3 A_3 \cos \theta_1)^3 \cos^2(k_2 d \cos \theta_2) \cos^2 \theta_2 + B}, \quad (3.83)$$

$$k_{tr} = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_3 c_3 \cos^2 \theta_1 \cos^2 2\theta'_1 \cos^2 \theta_2 \cos^2 2\theta'_3}{(\rho_1 c_1 A_1 \cos \theta_3 + \rho_3 c_3 A_3 \cos \theta_1)^2 \cos^2 \theta_2 \cos^2(k_2 d \cos \theta_2) + C}, \quad (3.84)$$

în care s-au făcut notațiile:

$$A = \left(\rho_2 c_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} A'_1 A_3 \cos^2 \theta_2 \right)^2 \sin^2(k_2 d \cos \theta_2), \quad (3.85)$$

$$B = (\rho_2 c_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + A_1 A_3 \cos^2 \theta_2)^2 \sin^2(k_2 d \cos \theta_2), \quad (3.86)$$

$$C = \left(\rho_2 c_2 \cos \theta_1 \cos \theta_3 + \frac{\rho_1 c_1 \rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} A_1 A_3 \cos^2 \theta_2 \right)^2 \sin^2(k_2 d \cos \theta_2), \quad (3.87)$$

$$A'_1 = \cos^2 2\theta'_1 + \left(\frac{V_{1T}}{V_{1L}} \right)^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta'_1, \quad (3.88)$$

$$A_1 = \cos^2 2\theta_1 + \left(\frac{V_{1T}}{V_{1L}} \right)^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta'_1, \quad (3.89)$$

$$A_3 = \cos^2 2\theta_1' + \left(\frac{V_{3T}}{V_{3L}} \right)^2 \sin 2\theta_3 \sin 2\theta_3', \quad (3.90)$$

Problema poate fi generalizată și pentru mai multe medii de impedanțe acustice diferite, caz mai rar întâlnit în practica filtrării și purificării gazelor.

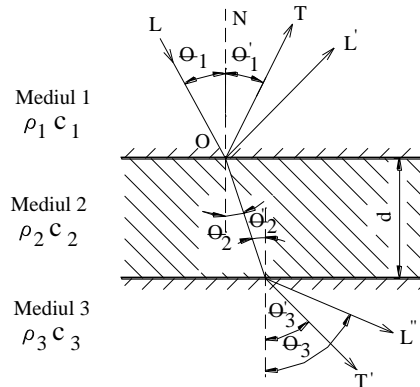


Fig. 3.5. Propagarea undelor ultraacustice sub incidență oblică prin trei medii extinse la infinit. $\rho_i c_i$ – impedanțele acustice ale celor trei medii; L ; L' , - undă longitudinală incidentă, respectiv reflectată; T ; T' – undă transversală reflectată, respectiv transmisă; L'' – undă longitudinală refractată.

3.3.1.3. Undele staționare

În cele mai multe cazuri de filtrare și purificare, pentru reținerea celor mai mici particule solide este necesară crearea de unde staționare.

Dacă într-un mediu oarecare se propagă mai multe unde ultrasonice, atunci în unele puncte ale mediului undele ultrasonice se intersectează unele cu altele apărând fenomenul de interferență. Un caz particular al interferenței undelor îl constituie *undele staționare*. Dacă se consideră două unde de aceeași amplitudine și frecvență, care se propagă în sensuri contrare între două plane de reflexie perpendiculare pe direcția de propagare se poate obține ecuația de mișcare de forma:

$$y = A \sin(\omega t - kr_1) + A \sin(\omega t + kr_2), \quad (3.91)$$

în care r_1 și r_2 sunt distanțele de la punctul M , la sursele de vibrație.

Dacă se consideră suprafețele de separare a mediilor perfect reflectante, întreaga energie din unda directă regăsindu-se în unda reflectată, se poate deduce ecuația presiunii p , într-un punct M , la o distanță x , de suprafața de separare (fig.3.6), cu relația.

$$p = 2A \sin \omega t \cos kx, \quad (3.92)$$

Analog se poate determina ecuația vitezei particulei v , în același punct M , cu expresia:

$$v = -\frac{2A}{\rho c} \cos \omega t \sin kx, \quad (3.93)$$

Presiunea va fi minimă în acele puncte în care $\cos kx = 0$, de unde rezultă:

$$x = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (3.94)$$

Relația (3.92) arată că la distanțe egale cu un număr impar de lungimi de undă presiunea acustică este nulă (noduri de presiune), iar viteza particulei este maximă (antinoduri de viteză). Presiunea va fi maximă pentru orice valoare a lui x , în care $\cos kx = 1$, de unde rezultă:

$$x = n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots), \quad (3.95)$$

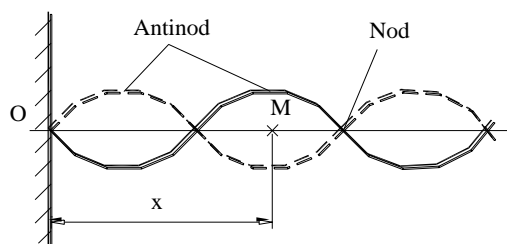


Fig. 3.6. Undele staționare

Relația (3.93) demonstrează că la o distanță de suprafața de reflexie egală cu un număr par de sferturi de lungimi de undă, presiunea acustică este maximă (antinod de presiune), iar viteza particulei este minimă (nod de viteză).

Prin urmare, din interferența unei incidente cu unda reflectată se produce un sistem de unde staționare caracterizat printr-o serie de noduri și antinoduri de presiune și respectiv antinoduri și noduri de viteză.

Din punct de vedere energetic se constată că într-un sistem de unde staționare nu trebuie să existe propagare de energie, ci doar un schimb local de energie.

În tehnologiile de filtrare și purificare cu ultrasunete se folosesc unde staționare deoarece acestea conduc la fenomenul de coalescență ce constă în gruparea particulelor fine (cu dimensiuni mai mici de $0,1 \mu\text{m}$) în particulele cu dimensiuni mai mari (chiar mai mari de $10 \mu\text{m}$) foarte ușor de separat de oricare filtru. Aceste particule mari se formează în antinodurile de presiune create de undele staționare, fiind apoi purtate de gazele care circulă cu o viteză de curgere corespunzătoare și reținute de elementul filtrant.

3.3.1.4. Difracția și difuzia undelor ultraacustice

Undele ultraacustice prezintă proprietatea de a ocoli obstacolele întâlnite în drumul lor dacă acestea au dimensiuni de același ordin de mărime sau mai mici decât lungimea de undă. Apare, deci, fenomenul de **difracție**, energia vibratorie ajungând și în puncte ale mediului care se găsesc înapoia obstacolului. Prin urmare, difracția este fenomenul de schimbare a direcției de propagare a unei ultraacustice ca urmare a trecerii acesteia în jurul unui obstacol. În acest caz, problema care interesează este distribuția energiei ultraacustice în spatele obstacolului (impurităților).

Ca și fenomenele de interferență, fenomenele de difracție pot fi explicate prin natura ondulatorie a undelor ultrasonice.

Conform principiului lui Huygens, la orice undă progresivă, fiecare punct se poate considera ca un centru de unde elementare, într-un punct oarecare al câmpului vibrator starea de vibrație rezultând din interferența acestor unde elementare.

Experimental s-a constatat că modul în care câmpul de unde ultrasonice este deformat prin introducerea unui obstacol depinde în cea mai mare măsură de raportul dintre mărimea obstacolului și lungimea de undă a undelor ultrasonice. În cazul când lungimea de undă este neglijabilă în raport cu dimensiunile impurității solide, energia ultrasonică se propagă rectiliniu urmând legile reflexiei și refracției. În cazul când lungimea de undă este mare în raport cu dimensiunile impurității, energia ultrasonică ocolește obstacolul, astfel încât nu se produce practic nici un fel de umbră începând de la o anumită distanță în spatele obstacolului.

În afară de difracție, undele acustice sunt difuzate la întâlnirea unui obstacol, o parte din ele interferând cu undele incidente. În cazul unor obstacole de formă simplă și regulată (sferă, cilindru, disc) se poate face o evaluare a difracției și difuziei.

În cazul unui obstacol circular plan care face un unghi θ cu axa fasciculului (fig. 3.7) o parte din energia incidentă este difuzată, iar o altă parte se propagă în spatele obstacolului.

Dacă se presupune că axa fascicolului trece prin centrul obstacolului, conform principiului lui Huygens acesta devine un nou centru de oscilație luând naștere o undă sferică. Viteza particulei u , este de forma:

$$u = U \sin \omega t, \quad (3.96)$$

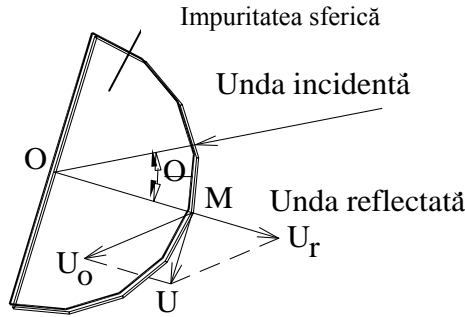


Fig. 3.7. Repartiția unghiulară a vitezelor particulei la incidența oblică a unui fascicul ultrasonor pe un obstacol circular.

iar presiunea acustică corespunzătoare p , este de forma:

$$p = \rho v U \sin \omega t, \quad (3.97)$$

în care: v este modulul vitezei de fază a oscilației.

Într-un punct M , de pe obstacolul circular aflat la distanța r , de centru, viteza de vibrație a particulei u_r , este:

$$u_r = u_o \cos \theta \sin \left(\omega t - \frac{r}{v} \right), \quad (3.98)$$

și presiunea corespunzătoare p_r , este:

$$p_r = \frac{\rho a u \cos \theta}{\sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{\omega^2}{v^2}}} \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right), \quad (3.99)$$

Cum unda incidentă și unda reflectată interferează în punctul M , va exista o presiune rezultantă p_o , de forma:

$$p_o = p + p_r, \quad (3.100)$$

Înlocuind (3.97) și (3.98) în (3.99) rezultă după prelucrări expresia:

$$\frac{p_o}{p} = 1 + \frac{\omega \cos \theta \sin \left(t - \frac{r}{v} \right)}{v \sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{\omega^2}{v^2}} \sin \omega t} = 1 + \frac{2\pi \frac{r}{\lambda} \cos \theta \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)}{\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{r}{\lambda} \right)^2} \sin \omega t} \quad (3.101)$$

Se vede că presiunea ultraacustică variază pe circumferința cercului de rază egală cu a obstacolului în funcție de direcția dată θ și de frecvența de oscilație. Valoarea raportului p_o / p în funcție de raportul r / λ se prezintă în figura 3.8.

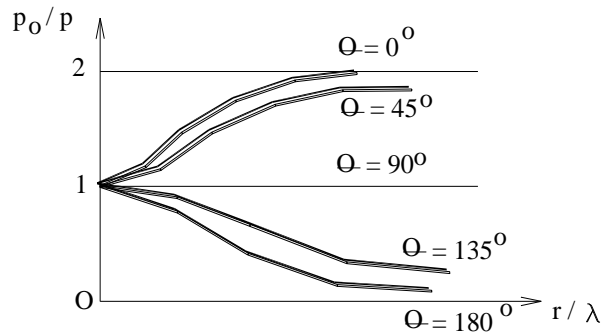


Fig. 3.8. Curbele de variație ale raportului p_o/p în funcție de r/λ .

Se vede că la $\theta = 0^\circ$ presiunea este maximă și de două ori mai mare decât presiunea incidentă; la $\theta = 90^\circ$ presiunea totală este egală cu presiunea fasciculului incident, iar la $\theta = 180^\circ$ în spatele obstacolului presiunea este zero, când fasciculul incident cade normal pe obstacol. Prin urmare, datorită fenomenului de interferență în fața obstacolului presiunea crește, în timp ce în spatele lui presiunea scade.

Variația presiunii p , în zona de umbră a unui obstacol circular aflat perpendicular pe direcția fasciculului, în funcție de distanța de la obstacol l este dată în figura 3.10.

Fenomenele de difracție și difuzie a undelor ultrasonice joacă rolul cel mai important în procesul de detectare și caracterizare a impurităților solide existente în gazul purtător, a mărimii lor și a proprietăților fizice și mecanice ale unui mediu prin care se propagă.

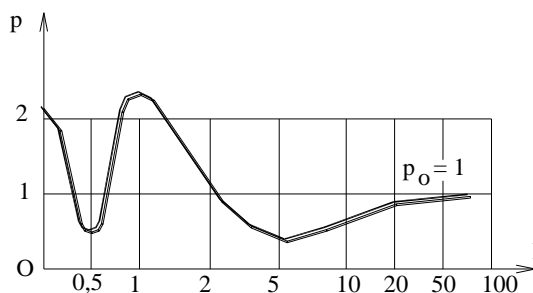


Fig. 3.10. Variația presiunii ultrasonice în zona de umbră a unui obstacol circular normal pe direcția fasciculului.

3.3.1.5. Atenuarea energiei ultraacustice

La propagarea undelor acustice printr-un mediu elastic are loc o micșorare treptată a amplitudinii oscilațiilor, a intensității acestora și deci a energiei ultraacustice. Această atenuare este rezultatul împrăștierei energiei, cauzată de fenomenul de reflexie și absorbție a energiei și de o serie de factori legați de mediul de propagare. Pierderile cauzate de fenomenul de reflexie pot caracteriza mediul prin care se propagă din punct de vedere al omogenității structurii, iar pierderile prin absorbție pot da informații cu privire la proprietățile fizice ale mediului.

Când propagarea unei ultrasonice are loc într-un mediu în care se produc pierderi de energie, ecuația mișcării devine:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + \frac{R}{\rho_o} \frac{\partial \xi}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}, \quad (3.102)$$

în care: R este factorul de proporționalitate dintre forța de disipare și viteza particulei în mediul considerat.

Soluția generală a ecuației (3.102) este de forma:

$$\xi = A \exp[j(\omega t + \gamma' x)] + B \exp[j(\omega t - \gamma' x)] , \quad (3.103)$$

Introducând (3.103) și derivatele sale în (3.102) se obține:

$$\gamma' = \pm \frac{\omega}{c} \sqrt{\left(1 - j \frac{R}{\rho_o \omega}\right)} , \quad (3.104)$$

Dacă în soluția generală a ecuației (3.101) se notează cu γ , termenul $j\gamma'$ se obține:

$$\gamma = j\gamma' = \pm \frac{R}{2\rho_o \omega} \pm j \frac{\omega}{c} = \alpha + j\beta , \quad (3.105)$$

în care γ se numește constantă de propagare a undelor.

După cum se vede, γ este o cantitate complexă a cărei parte reală α se numește constantă de atenuare și reprezintă scăderea amplitudinii pe unitatea de distanță, iar partea imaginară β se numește constanta de fază și reprezintă schimbarea fazei pe unitatea de distanță. Ținând cont de (3.105), soluția ecuației diferențiale de propagare a undelor devine:

$$\xi = A \exp(-\alpha x) \exp[j(\omega t - \beta x)] + B \exp(\alpha x) \exp[j(\omega t + \beta x)] , \quad (3.106)$$

în care: primul termen reprezintă o undă plană atenuată care se propagă în sensul x-ilor pozitivi; termenul al doilea reprezintă o undă plană atenuată care se propagă în sensul x-ilor negativi.

Impedanța acustică specifică în propagarea undelor într-un mediu cu disipare de energie Z_s se obține făcând raportul dintre presiunea ultraacustică corespunzătoare unei plane progresive și vitezei particulei, adică:

$$Z_s = \frac{p}{V} = \rho_o c \left(1 - j \frac{\alpha}{\beta}\right) , \quad (3.107)$$

Din (3.107) se vede că în cazul unui mediu, în care nu se produce atenuarea energiei ultraacustice ($\alpha = 0$), impedanța acustică specifică devine $\rho_o c$, chiar impedanța caracteristică mediului.

Atenuarea are deci două cauze principale: împrăștierea și absorbția. Împrăștierea are loc pe structura discretă a mediului, fiind influențată de diversele neomogenități (impuritățile solide și lichide de diferite forme și mărimi). Absorbția se datorește mai multor cauze, cele mai semnificative fiind: frecarea internă (vâscozitatea), conductibilitatea termică, radiația termică, fenomenul de relaxare, variația energiei cinetice a moleculelor, variația de densitate, diferența de presiune, termodifuzia și altele, fenomene caracteristice transportului gazelor naturale prin conducte.

Cunoașterea acestor fenomene este foarte importantă mai ales pentru aplicațiile ultrasunetelor în purificarea dar și în filtrarea foarte fină.

În cazul în care atenuarea este uniformă în câmpul ultrasonic, variația presiunii ultrasonice p este proporțională cu distanța parcursă d , adică:

$$p = p_o \exp[-(\alpha_a + \alpha_d)]d , \quad (3.108)$$

iar variația intensității este proporțională cu p^2 , deci:

$$I = I_o \exp[-2(\alpha_a + \alpha_d)]d , \quad (3.109)$$

în care: p_o ; I_o este presiunea și respectiv intensitatea inițială; α_a - un coeficient de atenuare datorită fenomenului de absorbție; α_d - un coeficient de atenuare datorită fenomenului de

difuzie.

În cazul gazelor, coeficientul de absorbție α_a poate fi privit ca o sumă de termeni datorată cauzelor mai sus amintite, deci:

$$\alpha_a = \alpha_v + \alpha_{ct} + \alpha_r + \alpha_T, \quad (3.110)$$

în care: α_v este coeficientul de atenuare prin absorbție datorat vâscozității; α_{ct} - coeficientul de atenuare prin absorbție datorat conductibilității termice; α_r - coeficientul de atenuare prin absorbție datorat radiației; α_T - coeficientul de atenuare prin absorbție datorat schimbului intermolecular de energie.

După Stokes și Rayleigh, coeficientul de atenuare α_v se poate determina cu relația:

$$\alpha_v = \frac{8\pi^2 f^2}{3\rho_0 c^3} \eta, \quad (3.111)$$

în care: η este vâscozitatea gazului, care conform teoriei cinetice a gazelor este:

$$\eta = \frac{1}{3} N m v_m, \quad (3.112)$$

unde: N este numărul particulelor pe unitatea de volum; m - masa particulei; v_m - viteza medie a particulelor; l - liberul parcurs mediu.

Introducând (3.109) în (3.108) se obține:

$$\alpha_v = \frac{16\pi^2 N m v_m}{15\rho_0 c^2} f^2 \cdot L, \quad (3.113)$$

pentru $kl < 1$ și :

$$\alpha_v = \frac{\pi^2 N m v_m}{3\rho_0 c^2} f, \quad (3.114)$$

pentru $kl > 1$.

Se observă că în ambele cazuri constanta de atenuare variază cu frecvența.

Pe timpul propagării undelor ultrasonice în mediu se produc compresioni și rarefieri și temperatura în zona de compresie devine mai ridicată decât cea din zona de rarefiere. Din această cauză are loc o scurgere a căldurii însoțită de producerea unei entropii și o disipare de energie, de unde rezultă și o atenuare a amplitudinii unde. Datorită conductibilității termice, constanta de atenuare α_{ct} este de forma:

$$\alpha_{ct} = \frac{2\pi^2}{c} \left(\frac{\chi - 1}{\chi} \right) \frac{c_T}{c_v \rho_0}, \quad (3.115)$$

în care: χ este raportul căldurilor specifice la presiune constantă și la volum constant; c_v - căldura specifică la volum constant; c_T - coeficientul de conductibilitate termică.

O dată cu încălzirea straturilor de gaze care sunt comprimate se produce și o radiație a acestei călduri, fapt care conduce la o disipare a energiei ultraacustice. Coeficientul de atenuare datorat radiației α_T , după Stokes, se poate calcula cu relația:

$$\alpha_T = \left(\frac{\chi - 1}{\chi} \right) \frac{q}{2c}, \quad (3.116)$$

în care: q este coeficientul caracteristic din legea răcirii masei gazului, care este de forma:

$$\theta_l = \theta_0 e^{-qt}, \quad (3.117)$$

unde: θ_t este excesul de temperatură la timpul t ; θ_0 - excesul de temperatură la timpul zero.

Constanta de atenuare datorită pierderilor prin difuzie α_d se poate determina cu relația:

$$\alpha_d = \frac{8\pi^4 d^3 f^4}{9c^2} \delta , \quad (3.118)$$

în care: d este diametrul mediu al impurităților solide; δ - factorul de difuzie care depinde de anizotropia materialului ($\delta = 6,7 \cdot 10^{-3}$ – pentru oțel; $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ – pentru aluminiu; $\delta = 7,4 \cdot 10^{-3}$ – pentru cupru).

La propagarea undelor ultrasonice în medii solide mai apar și alte fenomene ce conduc la atenuare cum ar fi: interacțiunea dintre undele ultrasonice și electroni în metale, interacțiunea dintre undele ultrasonice și undele termice și altele, care sunt de mai mică valoare și nu afectează substanțial relația (3.105).

Pe lângă absorbția de volum, în tehnică este necesară cunoașterea absorbției undelor ultrasonice la suprafața de separare a două medii, caz ce corespunde în majoritatea aplicațiilor active ale undelor ultrasonice. Apare aici noțiunea de disipare acustică notată δ_a , definită ca raportul dintre fluxul de energie disipat Φ_d , de suprafața de separație și fluxul de energie incident Φ_i , adică:

$$\delta_a = \frac{\Phi_d}{\Phi_i} , \quad (3.119)$$

Deoarece în practică interesează ce energie ultraacustică a fost transmisă în mediul al doilea, se definește coeficientul de absorbție ultraacustică (notat cu α_a) ca fiind raportul dintre fluxul reținut de suprafața de separare și fluxul de energie incident:

$$\alpha_a = \frac{\Phi_i - \Phi_r}{\Phi_i} , \quad (3.120)$$

în care: Φ_r este fluxul de energie ultraacustică reflectat în mediul unu.

Coeficientul de absorbție ultraacustică α_a este legat de impedanța acustică specifică Z_s , a planului de separație prin relația:

$$\alpha_a = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_o c}{Z_s + \rho_o c} \right|^2 , \quad (3.121)$$

Înlocuind $Z_s / \rho_o c = r + jx$ în relația (3.118) se obține:

$$\alpha_a = \frac{4r}{(r+1)^2 + x^2} , \quad (3.122)$$

din care se vede că α este o funcție de r (rezistența la intrarea normată la Z_s) și de x (reactanța de intrare normată la Z_s).

În planul complex, ecuația (3.119) devine:

$$r^2 + x^2 + 2 \left(1 - \frac{2}{\alpha_o} \right) r + 1 = 0 , \quad (3.123)$$

și reprezintă ecuația unei familii de cercuri având centrele pe axa absciselor și razele egale cu $2(1-\alpha_a)^{1/2}/\alpha_a$. Determinarea coeficientului de absorbție ultraacustică a unui material se poate calcula folosind diagrame de forma celei prezentate în figura 3.11.

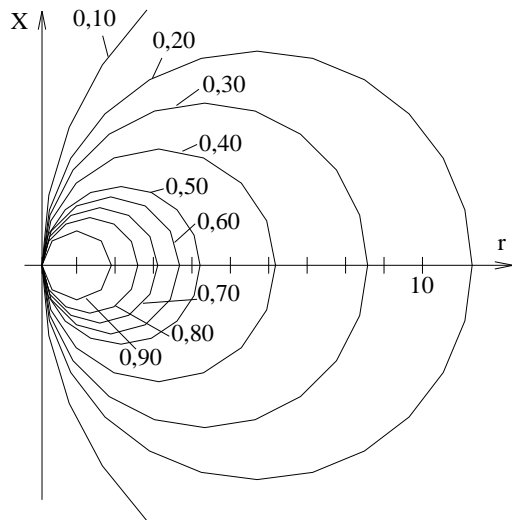


Fig. 3.11.
 Diagramă pentru determinarea
 coeficientului de absorbție
 ultraacustică a unui material.

Coeficientul de absorbție fiind funcție de rezistența și reactanța ultraacustică specifică a materialului respectiv, maximele funcției sunt definite de relația:

$$\frac{\partial \alpha_a}{\partial r} = \frac{4[(r+1)^2 + x^2] - 4r[2(r+1)]}{[(r+1)^2 - x^2]^2} = 0, \quad (3.124)$$

și

$$\frac{\partial \alpha_a}{\partial x} = -\frac{8rx}{[(r+1)^2 - x^2]^2} = 0, \quad (3.125)$$

Din (3.125) se deduce $x = 0$, care introdusă în (3.124) conduce la $r = 1$, ceea ce demonstrează că absorbția unui sistem ultraacustic este maximă când reactanța este nulă, deci la rezonanță.

Experimental se constată că valorile coeficientului de absorbție ultraacustică diferă de la un material la altul și chiar la același material depind de caracteristicile sale mecanice și geometrice, de frecvență și de modul de formare a planului de separație de către impuritățile existente în gazul purtător în care s-a creat câmpul ultrasonic.

3.4. CONTRIBUȚII ORIGINALE PRIVIND CONTRIBUȚIA ȘI PROIECTAREA UNOR FILTRE ULTRASONICE CARE CONDUC LA ÎMBUNĂTĂȚIREA PROCESELOR DE FILTRARE A GAZELOR NATURALE

Analizând principalele fenomene și efecte ce se produc la propagarea ultrasunetelor prin mediile gazoase și ținând cont de cinetica procesului de filtrare a gazelor naturale au fost construite și încercate o serie de filtre care să realizeze operația de filtrare și proiectare cu un randament sporit și în condițiile unei eficiențe economice mai ridicate.

În alegerea metodei de filtrare și a filtrului corespunzător s-au avut în vedere următoarele:

- ✓ construcția să fie cât mai simplă și ușor de montat în zonele corespunzătoare;
- ✓ să nu necesite schimbări în elementele de poziționare și fixare în cazul înlocuirii filtrului clasic cu un filtru ultrasonic;

- ✓ să nu necesite demontarea pentru curățirea elementului filtrant, curățirea efectuându-se periodic în momentul în care căderea de presiune ajunge la o valoare limită comandând funcționarea transductorului ultrasonic;
- ✓ să permită reținerea și celor mai fine particule rezultând spre consumatorul final (în unele procese tehnologice) gazul natural pur;
- ✓ să aibă o durată de funcționare mult mai mare decât a filtrelor clasice, în sensul că elementele filtrante, activate ultrasonic, să aibă o fiabilitate sporită;
- ✓ să realizeze o cădere de presiune într-o gamă de valori restrânsă, practic să fie menținută constantă sau cu variații foarte mici;
- ✓ să creeze unde staționare pentru a permite nu numai reținerea particulelor foarte fine ci și uscarea gazelor astfel încât în instrumentele de măsurare, verificare și contorizare să pătrundă gazele naturale fără impurități și uscate;
- ✓ să permită o ușoară întreținere, costurile exploatării acestora să nu depășească cheltuielile cu cele clasice.

În aceste condiții se propun în continuare câteva modele de filtru ultrasonic, care prin forma și dimensiunile elementului final creează câmpul ultrasonic corespunzător procesului de filtrare dorit.

3.4.1. Elemente de proiectare și construcție pentru un filtru ciclon ultrasonic

Acest tip de filtru este proiectat în așa fel încât în corpul filtrului să se excite unde ultrasonice staționare și să lucreze în regim de rezonanță din când în când (fig. 3.12).

Datorită realizării unui câmp de unde staționare apare fenomenul de coalescență în antinodurile de presiune și adâncimea de reținere a acestui tip de filtru este foarte mare. Particulele fine și foarte fine sunt adunate în antinodurile de presiune unde formează particule de dimensiuni mai mari care apoi sunt antrenate pe traiectoriile exterioare fiind proiectate pe peretele filtrului și trimise spre dispozitivul de scurgere a impurităților solide și lichide.

De asemenea, ultrasunetele în timpul propagării lor realizând zone succesive de presiune și depresiune vor conduce și la extragerea continuă a lichidului sau vaporilor existenți în curentul de gaze. Viteza de evaporare la suprafața limită dintre lichidul din gaze și gaze v_{er} se determină cu o relație de forma:

$$v_{er} = \frac{k \cdot s(p - p)}{p_0}, \quad (3.126)$$

în care:

P -este presiunea de saturație a vaporilor la temperatura lichidului;

p -presiunea vaporilor în gazul natural;

p_0 - presiunea gazelor;

S - suprafața impurităților solide;

K -coeficient ce depinde de gradul de turbulență a gazului deasupra suprafeței de separare lichid – gaz.

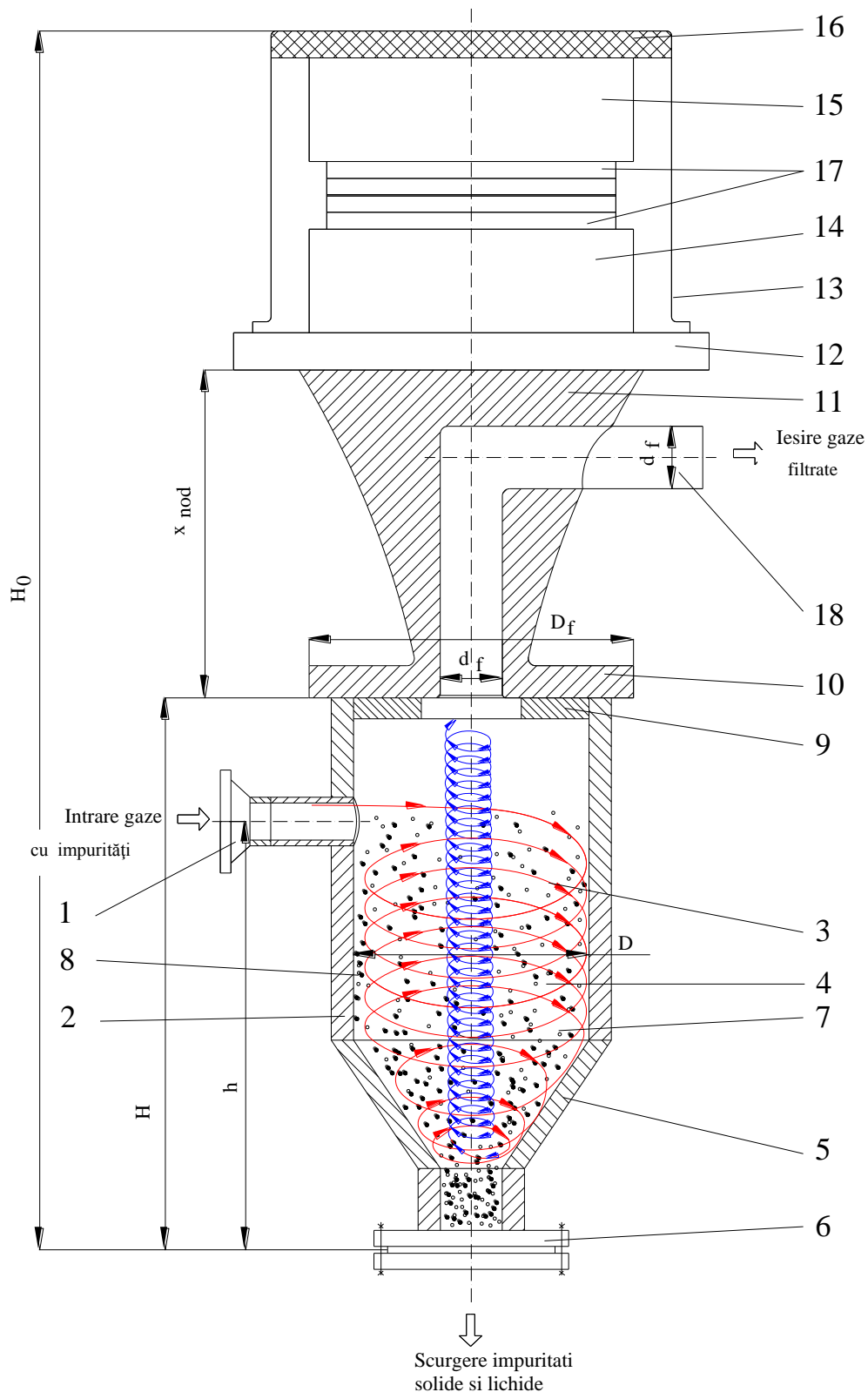


Fig. 3.12. Filtru ciclon ultrasonic model FCU 01

1 – conducta intrare gaze impure; 2 – perete filtru ciclon; 3 – curent elicoidal; 4 – impuritati solide; 5 – perete decantor; 6 – dispozitiv de scurgere impuritati solide si lichide; 7 – picaturi lichide; 8 – praf depus pe peretii filtrului; 9 – inel etansare; 10 – disc radiant; 11 – concentrator de energie ultrasonica; 12 – flansa nodala; 13 – carcasa transductor ultrasonic; 14 – element radiant; 15 – element reflector; 16 – izolant acustic; 17 – discuri PZT; 18 – conducta iesire gaze purificate.

În afara acestui fenomen, ultrasunetele mai produc o turbulență intensă a gazului la nivelul suprafeței impurităților solide, în acest mod rezultând creșterea vitezei de evaporare.

Partea cea mai importantă a acestui filtru ultrasonic model FCU 01 este sistemul ultraacustic deoarece de modul de construcție și de dimensiunea acestuia depinde funcționarea și randamentul filtrului. De aceea, se va face o modelare folosind MEF pentru determinarea apriorică a modului de vibrație.

Determinarea modurilor de vibrație ce apar într-un sistem ultraacustic reprezintă principala preocupare în etapa de proiectare a acestuia. Prin cunoașterea frecvențelor de vibrație și a modurilor în care acesta vibrează se poate lua decizia activării sistemului ultraacustic în vederea îndeplinirii rolului funcțional pentru care a fost construit. În același timp, etapa de experimentare prin care se determină în mod practic frecvențele de lucru utile, este foarte mult scurtată întrucât modurile naturale de vibrație ale sistemului sunt cunoscute iar experimentările se vor concretiza prin încercări numai în jurul acestor frecvențe determinate prin metoda elementului finit.

În figura 3.13 se prezintă geometria sistemului ultraacustic utilizat în construcția filtrului ciclon de gaz. După cum se poate observa, în partea conică a concentratorului este realizat un canal cu diametrul $d = 20$ mm.

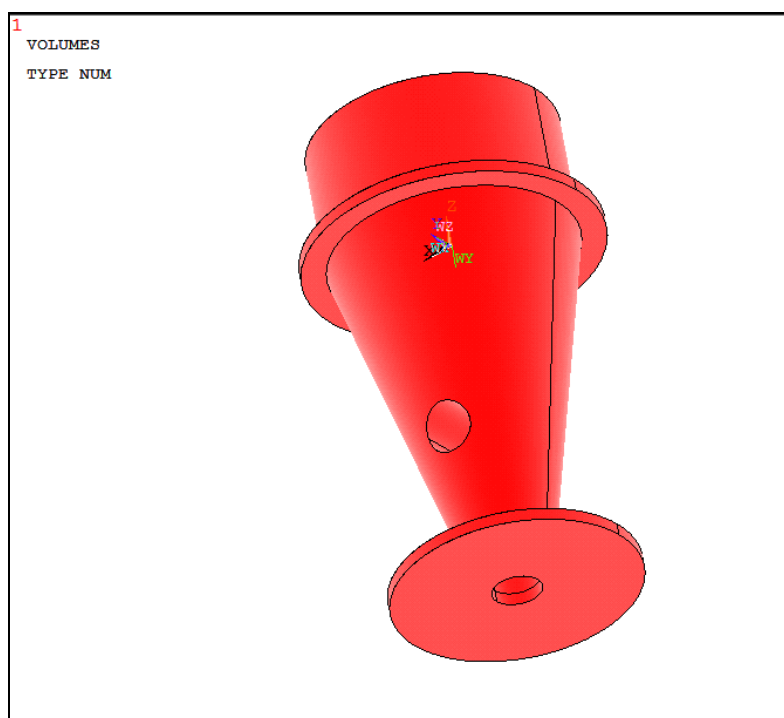


Fig. 3.13 Definierea geometriei sistemului ultraacustic

În cea a doua etapă de proiectare, în program se introduc proprietățile de material, în acest caz, proprietățile oțelului. Pentru a se putea rezolva problema de calcul ingineresc, în continuare se vor selecta parametrii necesari discretizării structurii studiate. În urma rezolvării acestei etape, programul va prezenta mesharea structurii după cum se poate vedea în figura 3.14. Analizând această imagine se poate observa cum în jurul zonelor de interes, în acest caz acestea fiind reprezentate de cele două orificii din volumul concentratorului, discretizarea structurii este realizată cu elemente de dimensiuni mici, mai “fine” ce sunt necesare pentru a capta mai bine comportarea sistemului în zonele amintite.

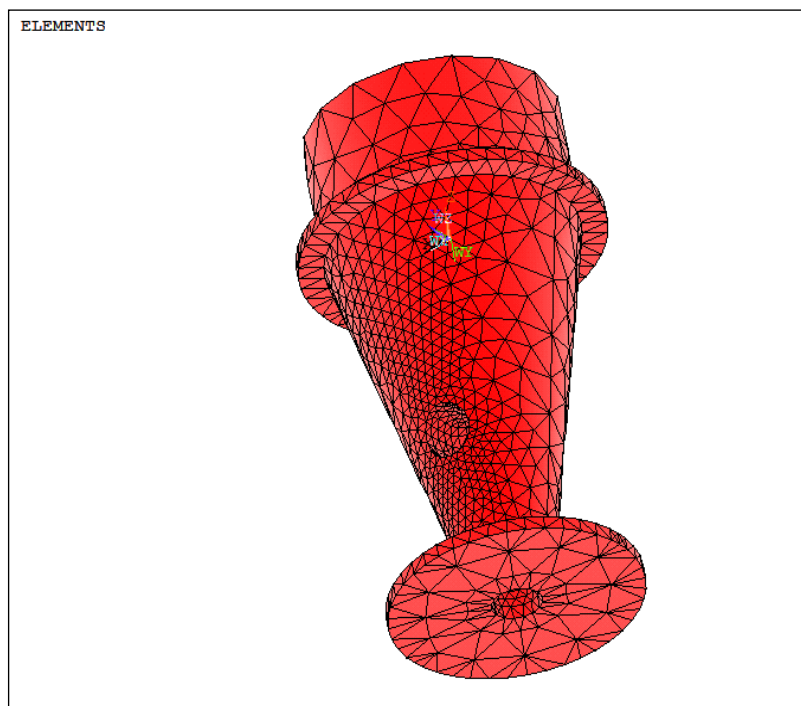


Fig. 3.14. Discretizarea sistemului ultrasonic

Odată încheiată etapa de preprocesare, se vor urma comenzile necesare ce definesc etapa de soluționare a problemei. În acest sens, se va defini intervalul de frecvențe în care se dorește a se lucra cu sistemul ultrasonic. În cazul studiat, frecvențele de lucru sunt căutate în domeniul $f = 18\text{Khz} \dots 100\text{ Khz}$. În cazul acestei probleme numărul frecvențelor de oscilație căutate a fost stabilit la $n = 5$. Rezolvarea acestei probleme se poate face prin selectarea unui anumit tip de analiză, în acest caz analiza fiind de tip “Modal”.

În etapa următoare se va urmări introducerea în sistem a încărcărilor specifice acestui tip de problemă. Pentru aceasta se va urmări realizarea încastrărilor ansamblului concentrator ce corespund în realitate cu fixarea acestuia pe suportul întregului sistem ultrasonic. Pentru rezolvarea acestei probleme, se va utiliza comanda “Aply/Displacements/ On Nodes” prin intermediul căreia se vor selecta nodurile corespunzătoare fixării cu șuruburi a flanșei nodale a sistemului pe suportul ansamblului. În zona flanșei nodale, din proiectarea sistemului ultrasonic se va urmări ca amplitudinea vibrațiilor să fie egală cu zero. În caz contrar, asamblarea cu șuruburi va fi puternic vibrată, tensionată urmând ca într-un timp definit să se producă desfacerea sau ruperea acestora. Pentru o fixare cât mai rigidă se va urmări fixarea în opt puncte a flanșei nodale. În figura 3.15 se prezintă rigidizarea ansamblului ultraacustic.

În urma soluționării problemei prin comanda ”Solve”, programul calculează modurile naturale de vibrație în domeniul de frecvențe selectat. În cazul problemei prezentate, programul a găsit doar trei frecvențe de vibrație și anume $f_1 = 18700\text{ Hz}$, $f_2 = 19038\text{ Hz}$ și $f_3 = 19620\text{ Hz}$. În figura 3.16 este prezentată fereastra prezentată de program cu frecvențele rezultate.

Pentru prima frecvență de vibrație, la $f_1 = 18700\text{ Hz}$, modul de oscilație al sistemului este prezentat în figura 3.17. După cum se poate observa din modulul de animație al programului și din figura corespunzătoare, parte conică a ansamblului oscilează sinusoidal iar partea inferioară de forma unui disc, de care se va fixa filtrul de gaz, prezintă o oscilație de tip “stanga-dreapta”. Această vibrație, în plan, poate fi utilizată foarte bine pentru eliminarea impurităților și curățarea peretelui filtrului, operație care nu este necesară a fi făcută permanent, ci periodic, la comanda căderii de presiune.

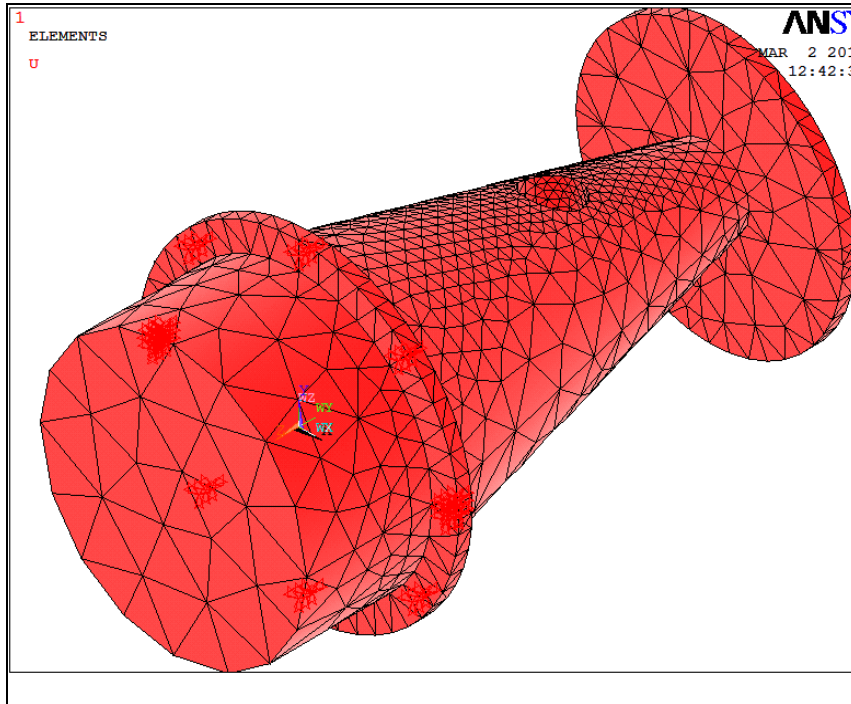


Fig. 3.15. Incastrarea sistemului ultrasonic

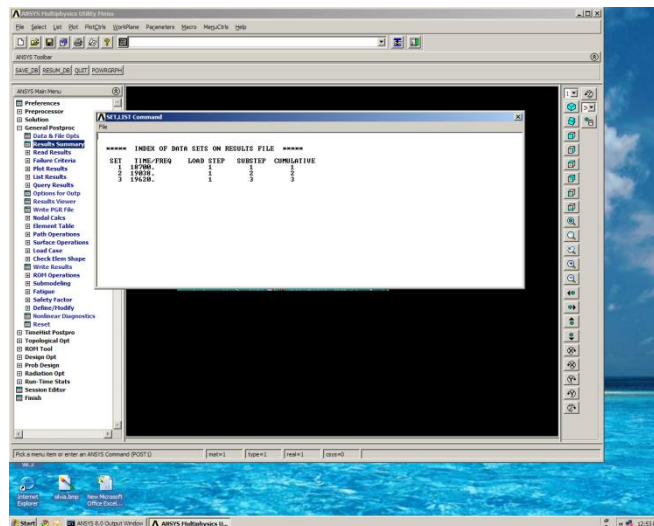


Fig. 3.16. Gama frecvențelor sistemului ultrasonic în domeniul $f = 18 \dots 50$ KHz.

Cea de a doua frecvență de vibrație se produce la valoarea $f_2 = 19038$ Hz. În figura 3.18 se prezintă acest mod de vibrație care este asemănător cu cel prezentat anterior. În această situație și cea de a doua frecvență poate fi folosită la eliminarea impurităților din jetul de gaz care străbate concentratorul ultrasonic.



Fig. 3.17. Modul de vibrație al sistemului la frecvența $f = 18700$ Hz.



Fig. 3.18. Modul de vibrație la frecvența $f_2 = 19038$ Hz

Cel de al treilea mod de vibrație, la frecvența $f_3 = 19620$ Hz, este diferit față de primele două în sensul în care oscilațiile se produc pe lungimea concentratorului de formă conică. La capătul liber al acestuia oscilațiile prezintă un maxim însă discul atașat nu se mai deformează ci rămâne rigid. Totuși, pe lungimea conului se produc oscilații de tip sinusoidal care ajută la purificarea jetului de gaz sub presiune. In figura 3.19 se prezintă acest tip de oscilație.

```

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =3
FREQ=19620
USUM (AVG)
RSYS=0
DMX =1.544
SMN =.003028
SMX =1.544

```

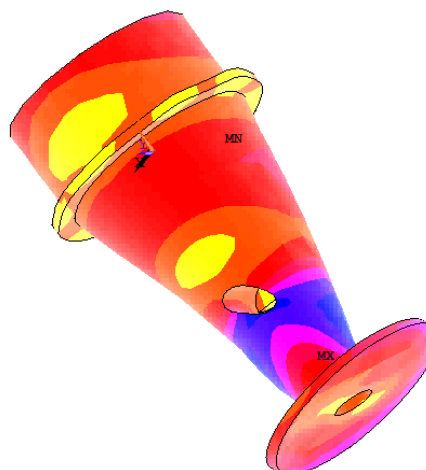


Fig. 3.19. Modul de vibrație la frecvența $f_3 = 19620$ Hz

În concluzie, se poate spune că utilizând metoda elementului finit s-au determinat modurile de vibrație ale sistemului ultraacustic folosit pentru filtrarea unui jet de gaz ce conține impurități. Primele două moduri de vibrație sunt mai utile rolul funcțional al sistemului fiind îndeplinit mai bine în aceste situații. Prin utilizarea acestei metode se cunosc cu precizie frecvențele de lucru ce oferă un randament maxim în anumite situații, funcție de ceea ce se vrea obține în urma procesului de filtrare.

3.4.2 Elemente de proiectare și construcție pentru un filtru vertical de gaze cu ultrasunete

Acest tip de filtru se propune din necesitatea eliminării operației de curățire a elementului filtrant după ce se întâmplă colmatarea acestuia. În acest caz (fig. 3.20), elementul filtrant face corp comun cu partea activă finală a unui sistem ultraacustic. Avantajul mare al acestui tip de filtru este acela că intră în funcționare în momentul în care s-a colmatat elementul activ și căderea de presiune a ajuns la o anumită valoare limită comandând intrarea în funcționare a generatorului ultrasonic și respectiv a sistemului ultraacustic.

Durata de funcționare este practic nelimitată, ea fiind dată de durata de viață a elementului activ al filtrului.

Pentru o dimensionare corectă a întregului sistem ultraacustic, care trebuie să lucreze în regim de rezonanță este necesară determinarea modurilor de vibrație, care se face prin modelare folosind MEF.

Determinarea modurilor de vibrație utile în funcționarea unui sistem de filtrare vertical a gazului este foarte utilă întrucât poate da informații complete privind frecvențele de lucru ale sistemului ultrasonic precum și modurile de vibrație ale acestuia.

În figura 3.21 se prezintă geometria unui amplificator ultrasonic ce are atașat în punctul de concentrare maximă a energiei un disc ce reprezintă suportul filtrului de gaz.

În figura 3.22 se prezintă geometria studiată ce constă dintr-un cilindru de diametru dat, o flanșă nodală de diametru corespunzător, un concentrator ultrasonic de formă conică cu

diametrul mare $D=205$ mm, diametru mic $d=35$ mm și înălțimea funcție de sistemul de fixare. Diametrul discului support al filtrului este $d=55$ mm.

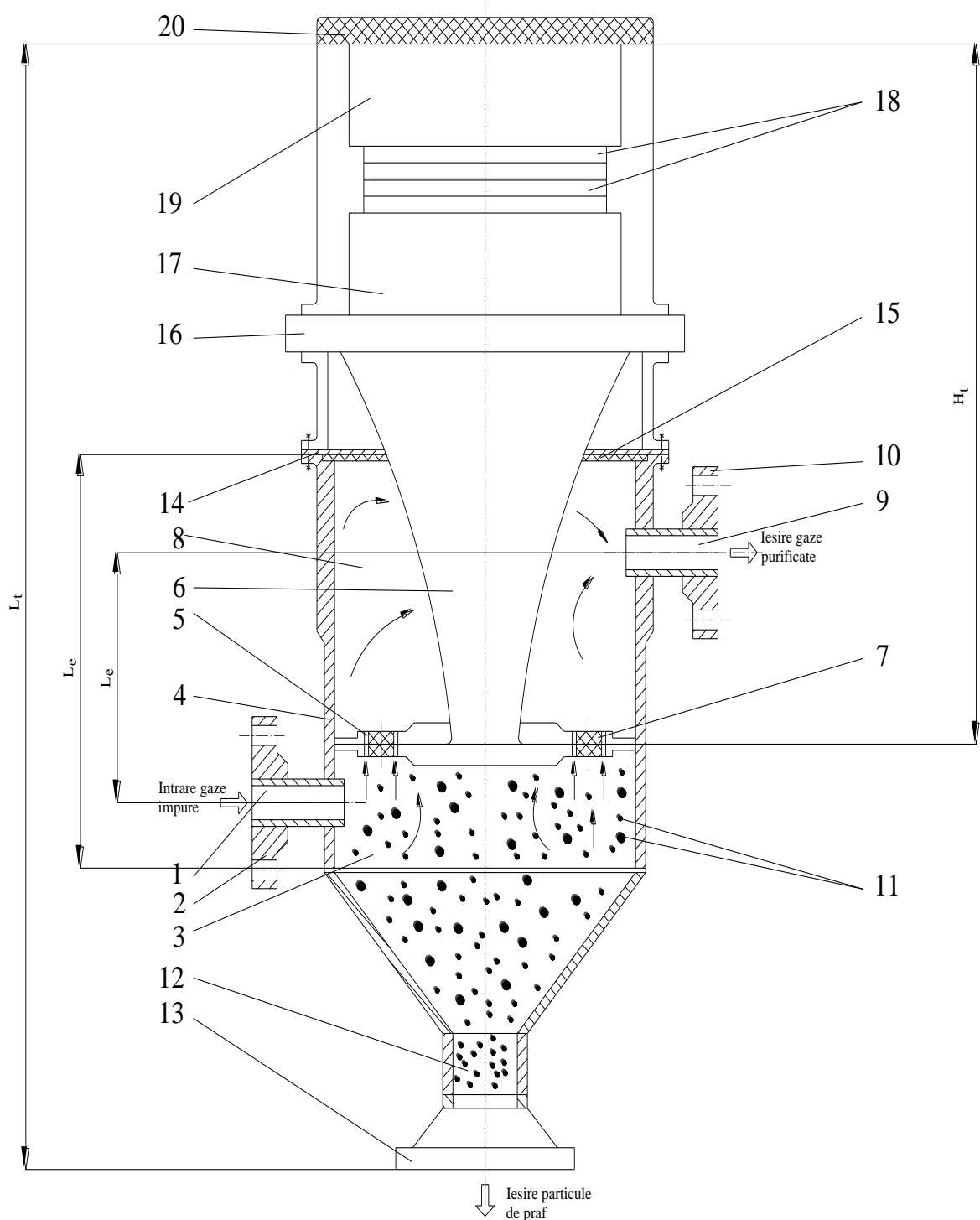


Fig. 3.20. Filtru vertical de gaze cu ultrasunete, model FGVU 01:

1 – conducta intrare gaze impure; 2 – flanșa fixare; 3 – conducta de fixare; 4 – peretele filtrului; 5 – elementul activ al filtru; 6 – concentrator de energie ultrasonica; 7 – orificii filtrare; 8 – circuitul de gaze filtrate; 9 – conducta evacuare gaze purificate; 10 – flanșa prindere; 11 – particule de praf; 12 – colector; 13 – robinet purjare; 14; 15 – inele etanșare; 16 – flanșa nodala; 17 – element radiant; 18 – discuri piezoceramice; 19 – element reflector; 20 – izolant acustic.

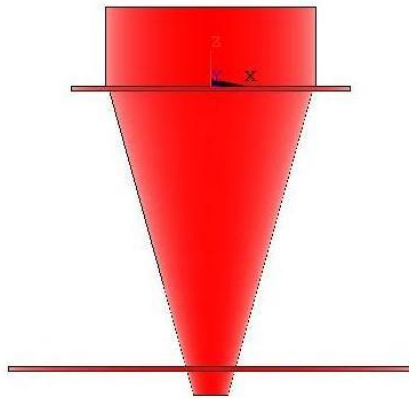


Fig. 3.21. Geometria sistemului ultraacustic de la filtrul vertical ultrasonic

Pentru introducerea modului de soluționare a problemei și a constrângerilor sistemului se va utiliza modulul “Solution”. Se va alege astfel realizarea unei analize de tip “Modal” ce va determina modurile de vibrație libere ale sistemului studiat. În cadrul acestei analize se va selecta gama de frecvențe în care se dorește funcționarea. Se vor selecta astfel frecvențele în domeniul $f = 18\text{Khz} \dots\dots\dots 100 \text{ Khz}$. Și se vor căuta 10 moduri de vibrație. Pentru determinarea acestora este necesar a se defini punctele de încastrare ale amplificatorului pe flanșa nodală. Pentru aceasta s-au selectat opt puncte cu deplasare egală cu zero după cum este prezentat și în figura 3.22.

.MENTS

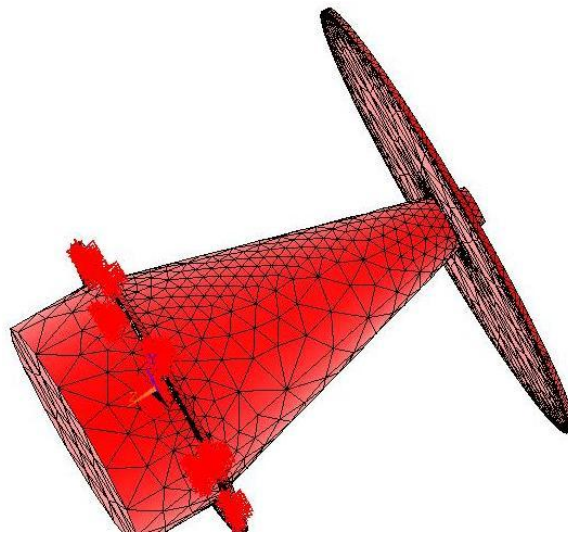


Fig. 3.22. Mesharea sistemului și încastrarea acestuia

În aceste puncte se va fixa în realitate și ansamblul ultrasonic realizat în mod practic. În urma soluționării problemei se observă cum programul oferă patru moduri de vibrație cu toate că s-au solicitat zece. Aceasta demonstrează că sistemul nu poate vibra liber la frecvențe mai mari de 19 Khz. În figura 3.22 se prezintă cele patru frecvențe de vibrație determinate de programul ANSYS $f_1 = 18155 \text{ Hz}$, $f_2 = 18157 \text{ Hz}$, $f_3 = 18396 \text{ Hz}$, $f_4 = 18686 \text{ Hz}$.

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****					
SET	TIME/FREQ	LOAD	STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	18155.		1	1	1
2	18157.		1	2	2
3	18396.		1	3	3
4	18686.		1	4	4

Fig. 3.23. Frecventele de vibrație ale sistemului

În figura 3.24 se prezintă primul mod de vibrație la frecvența $f_1 = 18155$ Hz. După cum se poate observa din analiza animației oferită de program și din imaginea prezentată se observă cum flanșa de prindere de la extremitatea concentratorului execută o mișcare de rotație în jurul axei OZ. În același timp se observă și o ușoară oscilație de tip traveling a discului. Acest mod de vibrație poate fi util scopului propus și anume, un fel de scuturare a elementului filtrant cu frecvența ultrasonică.

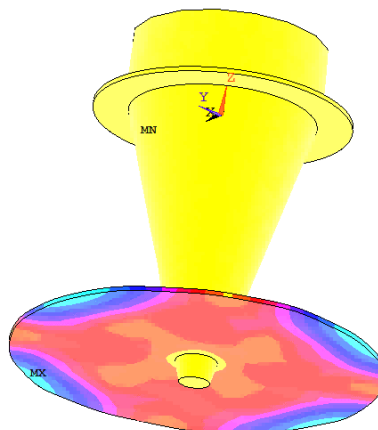


Fig. 3.24. Modul de vibrație la frecvența $f = 18155$ Hz

Cel de al doilea mod de oscilație se produce la frecvența $f_2 = 18157$ Hz. În mod similar, din observarea tipului de vibrație, se observă cum acesta este foarte apropiat de primul. În acest mod extremitatea inferioară a concentratorului execută aceeași mișcare de rotație în jurul axei OZ dar și o foarte ușoară oscilație de tip traveling. Această frecvență este utilă de asemenea scopului propus și este prezentată în figura 3.25.

Cel de al treilea mod de vibrație se produce la frecvența $f_3 = 18396$ Hz. După cum se poate observa și din figura 3.26, oscilațiile sunt complexe, asemănătoare unor vibrații de tip “traveling” și prezintă cea mai mare eficiență în procesul de curățire prin vibrație a filtrului de gaz.

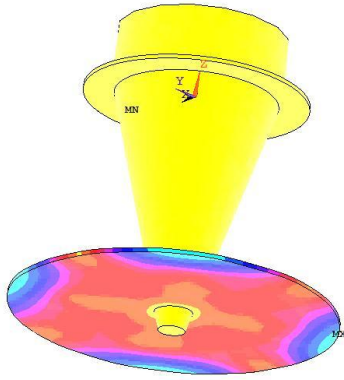


Fig. 3.25. Modul de vibrație la frecvența $f = 18157$ Hz



Fig. 3.26. Oscilațiile sistemului la frecvența $f_3 = 18396$ Hz

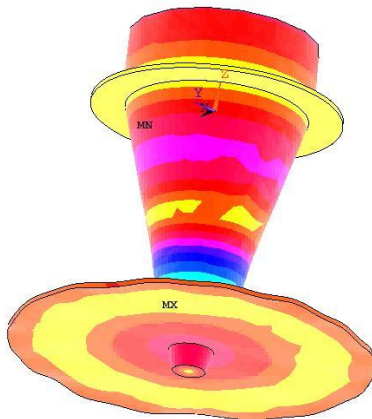


Fig. 3.27. Modul de vibrație la frecvența $f_4 = 18686$ Hz

Cel de al patrulea mod de vibrație, la frecvența $f_4 = 18686$ Hz, diferă total de cele anterioare întrucât concentratorul conic execută oscilații longitudinale, în lungul axei OZ. Deoarece în funcționarea sistemului, acesta este dispus cu axa OZ pe verticală, atunci vibrațiile la frecvența precizată se produc sub forma unor „scuturări” ale filtrului de gaz pe direcția menționată. Și în aceste condiții acest mod de vibrație este foarte util scopului propus (fig.3.27).

3.4.3. Elemente de proiectare și construcție pentru un filtru conic orizontal ultrasonic

Acest tip de filtru este conceput într-o construcție corespunzătoare unui filtru conic clasic, dar care permite reținerea totală a particulelor de lichid existente în gazele naturale.

Sistemul ultraacustic este proiectat și calculat să lucreze în regim de rezonanță, intrarea lui în funcțiune făcându-se în momentul în care căderea de presiune pe elementul filtrant activ ajunge la o valoare limită care comandă intrarea în funcțiune a generatorului ultrasonic și respectiv a sistemului ultraacustic. Partea finală a sistemului ultraacustic (fig. 3.28) vine în contact direct cu elementul (cartușul) filtrant activ permițând „scuturarea ultrasonică” a acestuia, nemaexistând situația de îmbâcsire, respectiv de colmatare a cartușului filtrant.

O astfel de construcție permite funcționarea continuă a filtrului, durata de funcționare a acestuia fiind dată de durata de viață a cartușului filtrant.

Acest tip de filtru mai prezintă un avantaj că fiind în poziție orizontală permite reținerea particulelor lichide și evacuarea lor împreună cu impuritățile solide. Adâncimea de reținere a filtrului depinde de dimensiunile ochiurilor elementului filtrant.

Elementele de calcul și construcție ale sistemului ultraacustic sunt asemănătoare cu cele prezentate anterior, modurile de vibrație fiind în domeniul $f = 18,5 \dots 22,8$ KHz.

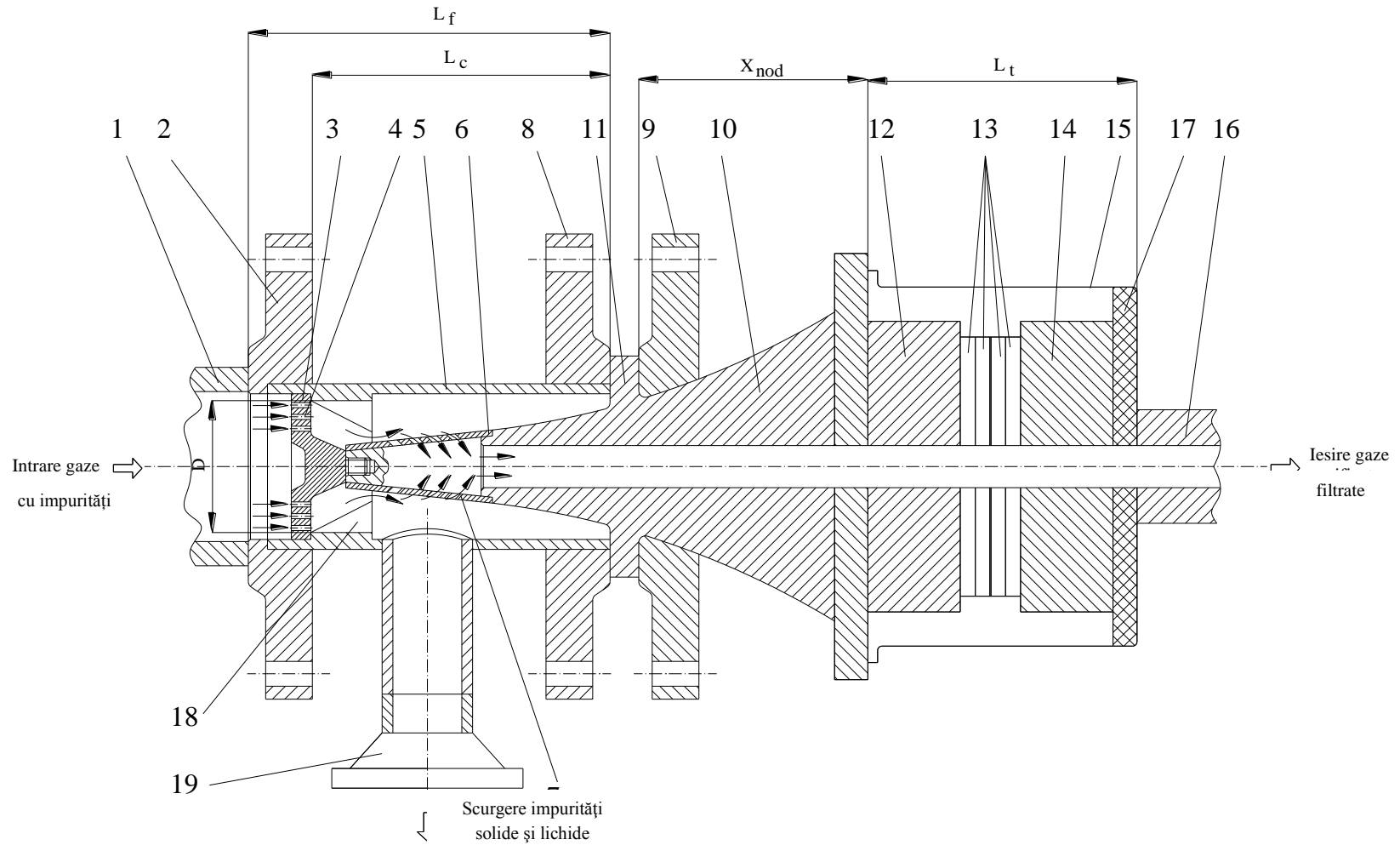


Fig. 3.28. Filtru conic orizontal ultrasonic, model FCOU 01:

1 – conducta intrare gaze; 2 – flansa de prindere; 3 – filtru talpa; 4 – orificii; 5 – manta filtru; 6 – filtru conic; 7 – orificii; 8 ; 9 – flansa fixare; 10 – concentrator de energie ultrasonica; 11 – flansa nodala; 12 – element radiant; 13 – discuri piezoceramice; 14 – element reflector; 15 – carcasa; 16 – conducta iesire gaze purificate; 17 – izolant acustic; 18 – rampa scurge

3.4.4. Elemente de calcul, construcție și proiectare pentru un filtru final de gaze cu ultrasunete

Aceste tipuri de filtre se pun în general la consumatorul final, prin urmare, la ieșirea din aceste filtre, gazele naturale trebuie să fie purificate și filtrate total.

Un astfel de filtru de gaze este filtrul model FTG (fig. 3.29) care prezintă însă un mare dezavantaj. Principalul dezavantaj este legat de colmatarea, uneori destul de rapidă, a elementului activ filtrant, respectiv demonstrarea acestuia și curățirea cu un jet de aer în sens contrar sau înlocuirea acestuia. Această operație presupune întreruperea funcționării, respectiv a alimentării cu gaze sau punerea în funcționare a coloanei tandem.

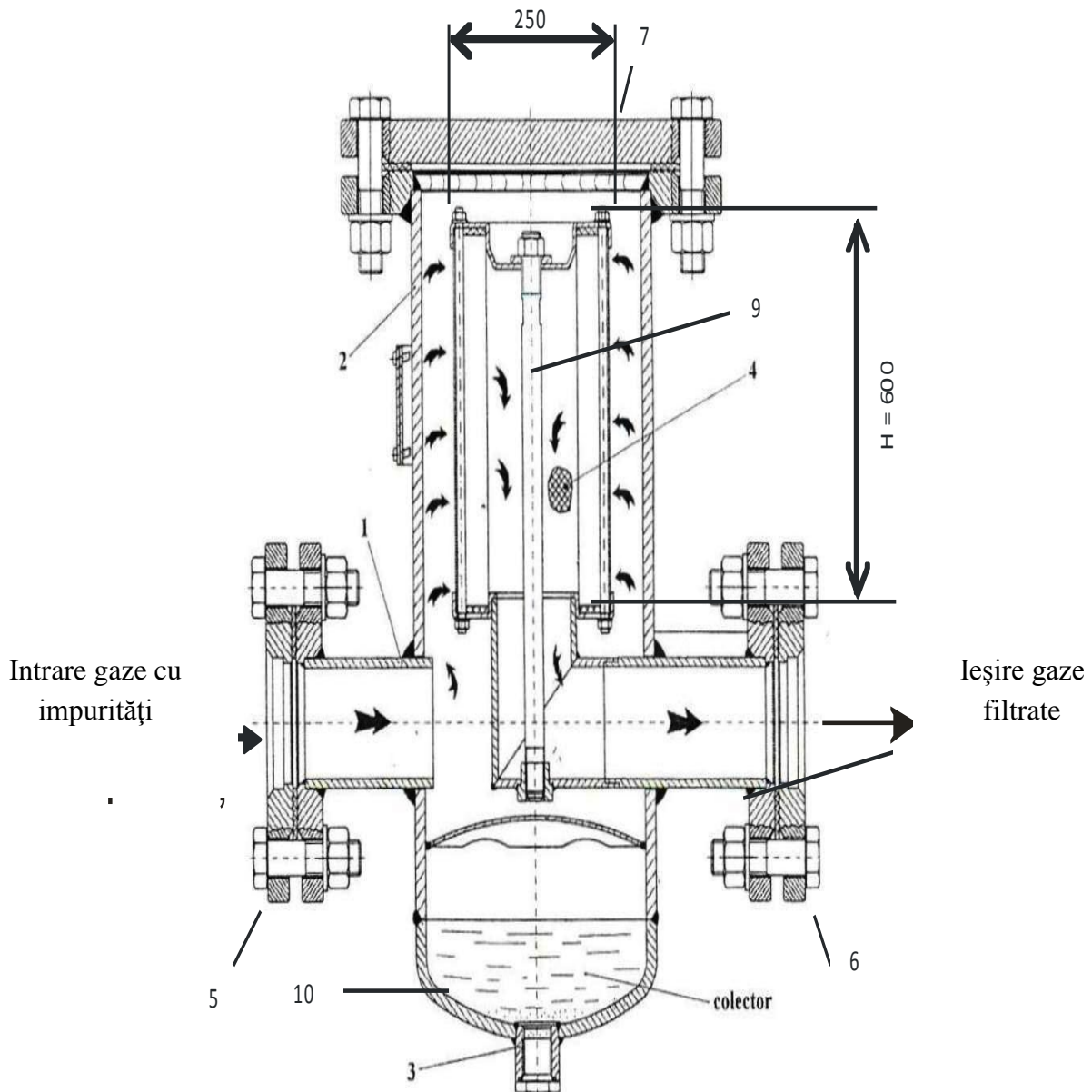


Fig. 3.29. Filtru FTG:

1 - conduct intrare gaze natural impure; 2 - corpul filtrului; 3 - record de purificare;
4 - elemental filtrant activ; 5,6 - flanșe racordare la conducta de transport; 7 - capac etanșare; 8 - conduct ieșire gaze filtrate; 9 - tije fixare element active filtrant; 10 - impurități + apă

Având în vedere rezultatele experimentale obținute în cazul filtrelor prezentate anterior se propune un model de filtru final cu ultrasunete model FFGU – 01 (fig. 3.30) care nu se deosebește

esențial de filtru clasic din punct de vedere constructiv. Evident că apare în plus sistemul ultraacustic, care este în așa fel proiectat și calculat să lucreze în regim de rezonanță la anumite moduri de vibrație. Partea finală a sistemului ultraacustic se sprijină pe elementul activ filtrant, astfel încât, în momentul când intră în funcțiune sistemul ultraacustic se produce o „scuturare ultrasonică” a cartușului filtrant, impuritățile solide și lichide ajungând în colector.

Sistemul ultraacustic poate fi proiectat în așa fel încât să existe în mediu unde staționare, dar se presupune că elementul activ filtrant este suficient să rețină toate impuritățile solide de orice dimensiuni.

În cazul filtrului FTG clasic, conform figurii 3.29 gazul pătrunde prin racordul de intrare 1 și ajunge în corpul filtrului 2, unde are loc o reducere a vitezei. În urma acestei reduceri de viteză, particulele solide de dimensiuni mari precum și cele lichide se separă de gaz. Acestea se acumulează în partea inferioară a recipientului, de unde pot fi evacuate periodic prin racordul de purjare 3. Gazul trece apoi, de la exterior spre interior, prin elementul filtrant 4, care reține particulele solide rămase (funcție de finețea sitei cartușului filtrant). Gazul curat circulă mai departe spre ieșirea din filtru 8.

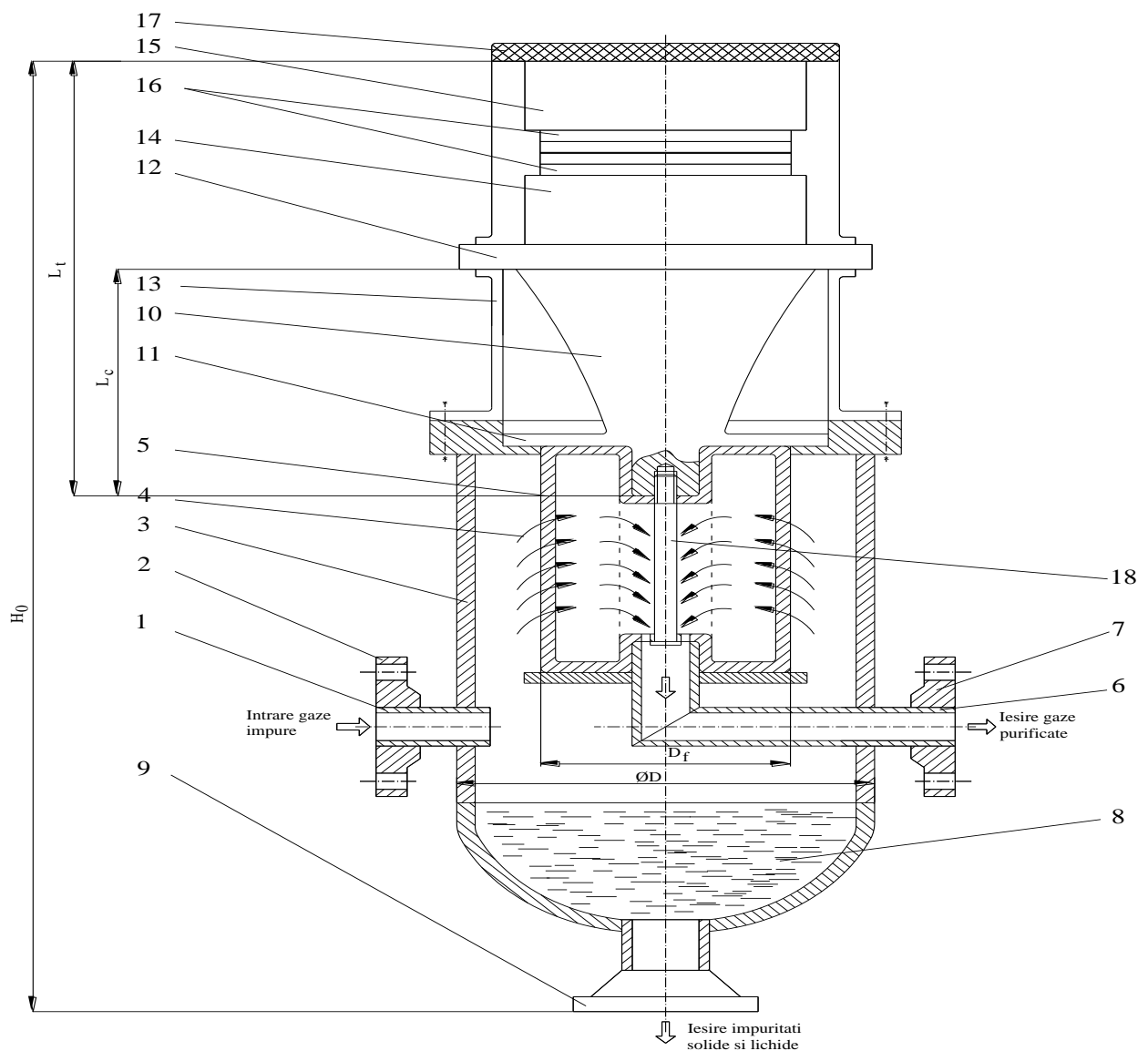


Fig. 3.30. Filtru final de gaze cu ultrasunete model FFGU - 01: 1 – conducta intrare gaze impure; 2 – flansa fixare; 3 – perete filtru; 4 – gaze ce patrund prin orificiile sitei; 5 – sita; 6 – conducta evacuare gaze purificate; 7 – flansa prindere; 8 – colector praf; 9 – racord de purjare; 10 – concentrator de energie ultrasonica; 11 – disc radiant; 12 – flansa nodala; 13 – carcasa; 14 – element radiant; 15 – element reflector; 16 – discuri piezoceramice; 17 – izolant acustic; 18 – element fixare.

Închiderea filtrelor de acest tip se realizează la partea superioară a acestuia cu ajutorul unei flanșe oarbe (fig. 3.31) sau în cazul presiunilor mari cu ajutorul unui capac de închidere rapidă (fig. 3.32). În primul caz, flanșa oarbă este fixată cu ajutorul șuruburilor 1 de flanșa 9, sudată pe corp. Etanșarea se realizează între cele două flanșe cu ajutorul garniturii de marsit.

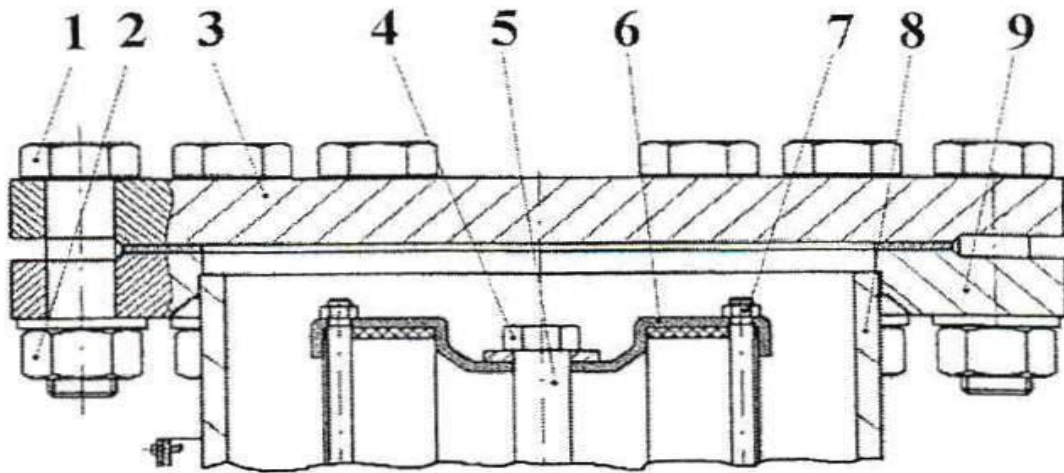


Fig.3.31. Detaliu închidere filtru cu flanșe oarbe

În cel de al doilea caz (fig. 3.32) închiderea se realizează cu ajutorul capacului de închidere 2, fixat cu ajutorul segmentelor de inel 6, contra deplasării axiale. Etanșarea dintre corpul capacului 8, sudat de corpul filtrului, și capacul de închidere 2, se realizează radial cu elementul de etanșare 1. Deplasarea radială a segmentelor de inel către interior, este împiedicată de o țevă secționată, fixată pe capul de protecție.

În cazul filtrului ultrasonic, acesta se prinde prin intermediul flanșei – disc 11 în capul de etanșare și prin flanșa modală 12 în carcasa transductorului 13.

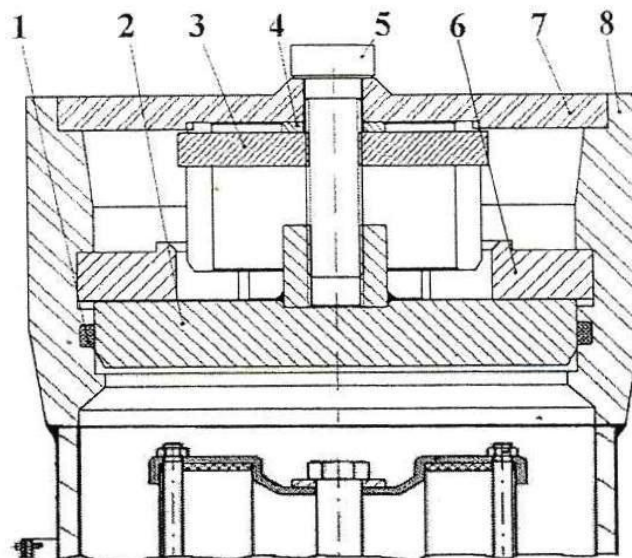


Fig. 3.32 Detaliu închidere filtre cu capac de închidere rapidă

Înainte de a instala un filtru ultrasonic este necesar să se verifice dacă:

- filtru încape în spațiul alocat și dacă există suficient spațiu de acces pentru operațiunile de întreținere;
- racordul dintre amonte de filtru și cel din aval sunt la același nivel și sunt capabile să suporte greutatea acestuia;
- flanșele de pe racordurile unde se va monta filtrul sunt paralele;
- flanșele de pe racordurile filtrului sunt curate și dacă filtrul nu a suferit defecțiuni în timpul transportului;
- țevile din amonte de filtru au fost curățate de stropi de sudură, nisip, resturi de vopsea, apă, etc;
- sistemul ultrasonic este bine protejat.

Filtrele sunt livrate standard cu contra - flanșe.

La cerere pot fi echipate cu manometru diferențial pentru a putea verifica gradul de îmbâcsire a filtrului.

După instalare, se verifică dacă robinetul de purjare este închis. Înainte de punerea în funcțiune se recomandă să se verifice dacă condițiile de lucru corespund caracteristicilor tehnice marcate pe placa timbru a echipamentului (fig. 3.33).



Fig. 3.33. Placă timbru pentru filtre

Se verifică etanșeitarea. Etanșeitarea este garantată dacă nu apare nici o bulă în momentul în care este aplicată spumă de săpun peste elementele sub presiune și îmbinările acestora.

Înainte oricărei operații este important să se asigure că tronsonul pe care se află filtrul a fost scos de sub presiune. Frecvența operațiilor de întreținere depinde în cea mai mare parte din cantitatea de gaz care circulă prin instalație și implicit de cantitatea de particule solide și lichide din gaz.

Întreținerea preventivă, este recomandată de cele mai multe ori, și trebuie făcută cu o frecvență care dacă nu este precizată în manual depinde de:

- calitatea gazului ce trece prin instalație;
 - cantitatea de impurități și gradul de conservare a instalației din amonte de filtru;
- Înainte de a începe demontarea filtrului se verifică dacă:

- există un set de piese de schimb recomandate de firma producătoare;
- există sculele necesare;

Câteva variante constructive și dimensiuni de filtre tip FTG sunt date în tabelul 3.11, iar variantele de poziționare a racordurilor la filtre sunt redată în figura 3.36. În mod curent, filtrele se execută

având racordul de intrare și cel de ieșire dispuse la 180° în același plan vertical (varianta a).
 Celelalte modele sunt realizate la cerere (b, c, d, e, f)

De asemenea construcția filtrelor având la baza alte standarde este posibilă la cerere a beneficiarului.

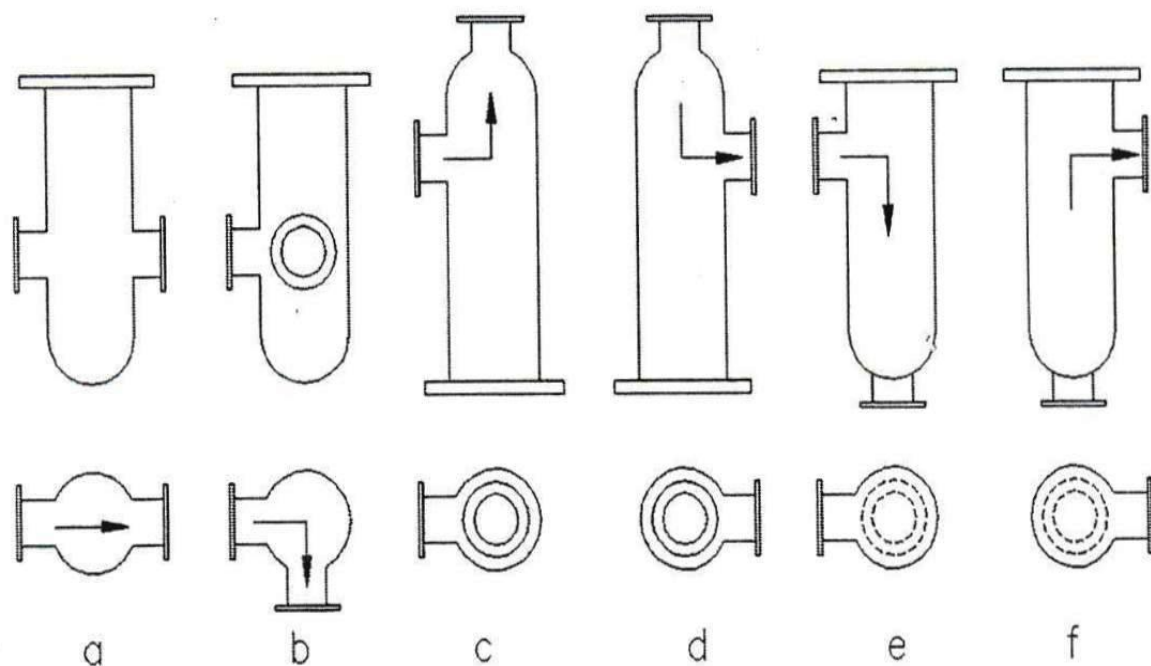


Fig. 3.34. Variante de poziționare a racordurilor la filtre

Tabelul 3.11. Filtre de tip FTG Pn6

Di	De	Hi	Ht	D	Pn	L	Supraf. filtrare
[Dn]	[Dn]	[mm]	[mm]	[mm]	[Pn]	[mm]	[Mp]
25	25	130	350	133	6	250	0.0625
32	32	130	350	133	6	250	0.0625
40	40	130	350	133	6	250	0.0625
50	50	170	445	168.3	6	350	0.125
65	65	170	445	168.3	6	350	0.125
80	80	247	550	219.1	6	500	0.167
100	100	237	550	219.1	6	500	0.167
125	125	240	650	323.9	6	500	0.250
150	150	240	650	323.9	6	500	0.500
200	200	350	900	406.4	6	620	0.668
250	250	365	1100	406.4	6	720	1.00
300	300	500	1300	508	6	800	1.250
350	350	500	1300	508	6	900	1.500
400	400	600	2000	738	6	1100	2.000
500	500	600	2400	738	6	1100	3.000

3.4.5. Alte tipuri de filtre la care se pot adapta sisteme ultraacustice corespunzătoare

O construcție relativ asemănătoare cu filtrul FTG ultrasonic ar putea avea și filtru pentru gaz uscat (fig. 3.35).

Seriile 30 sunt proiectate pentru a manevra debite de curgere înalte, a asigura capacități mari de încărcare a impurităților și a furniza capacități eficiente de îndepărtare ale particulelor. Câteva din modelele folosite și caracteristicile lor se prezintă în tabelele 3.12, 3.13 și 3.14.

Tabelul 3.12. Filtre seriile 30/30A, capacități în CFH (x1000) la 20" W.C., 14.73 PSIA presiune de bază

PSIG intrare	Număr model								
	30-2-150	30-3-150	30-4-150	30-2-300	30-3-300	30-4-300	30-2-600	30-3-600	30-4-600
0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	25	48	77	25	48	77	25	48	77
5	27	52	84	27	52	84	27	52	84
10	30	58	94	30	58	94	30	58	94
20	36	69	112	36	69	112	36	69	112
40	45	88	141	45	88	141	45	88	141
75	58	112	181	58	112	181	58	112	181
100	66	127	205	66	127	205	66	127	205
150	79	153	246	79	153	246	79	153	246
200	90	174	281	90	174	281	90	174	281
300	109	211	340	109	211	340	109	211	340
400	125	242	391	125	242	391	125	242	391
600	153	295	476	153	295	476	153 <td 295	476	
800	176	340	548	176	340	548	176	340	548
1000	196	379	611	196	379	611	196	379	611
1200	214	415	669	214	415	669	214	415	669
1400	231	448	722	231	448	722	231	448	722

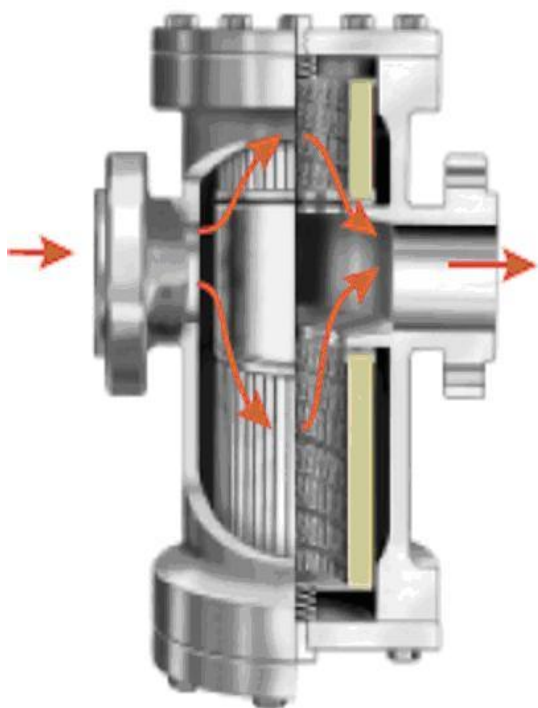


Fig. 3.35. Filtru pentru gaz uscat. Seria 30/30A

Tabelul 3.13. *Filtre seriile 30/30A, capacității în CFH (X 1000) la 1" PSID, 14.73 PSIA presiune de bază*

PSIG intrare	Număr model								
	30-2- 150	30-3- 150	30-4- 150	30-2- 300	30-3- 300	30-4- 300	30-2- 600	30-3- 600	30-4- 600
0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	29	56	90	29	56	90	29	56	90
5	31	61	98	31	61	98	31	61	98
10	35	68	110	35	68	110	35	68	110
20	42	81	131	42	81	131	42	81	131
40	53	103	166	53	103	166	53	103	166
75	68	132	213	68	132	213	68	132	213
100	77	149	241	77	149	241	77	149	241
150	93	179	289	93	179	289	93	179	289
200	106	205	330	106	205	330	106	205	330
300	128	248	400	128	248	400	128	248	400
400	147	285	460	147	285	460	147	285	460
600	179	347	560	179	347	560	179	347	560
800	207	400	645	207	400	645	207	400	645
1000	231	446	720	231	446	720	231	446	720
1200	252	488	787	252	488	787	252	488	787
1400	272	527	850	272	527	850	272	527	850

Tabelul 3.14. *Filtre seriile 30/30A, capacității în CFH (X 1000) la 2" PSID, 14.73 PSIA presiune de bază*

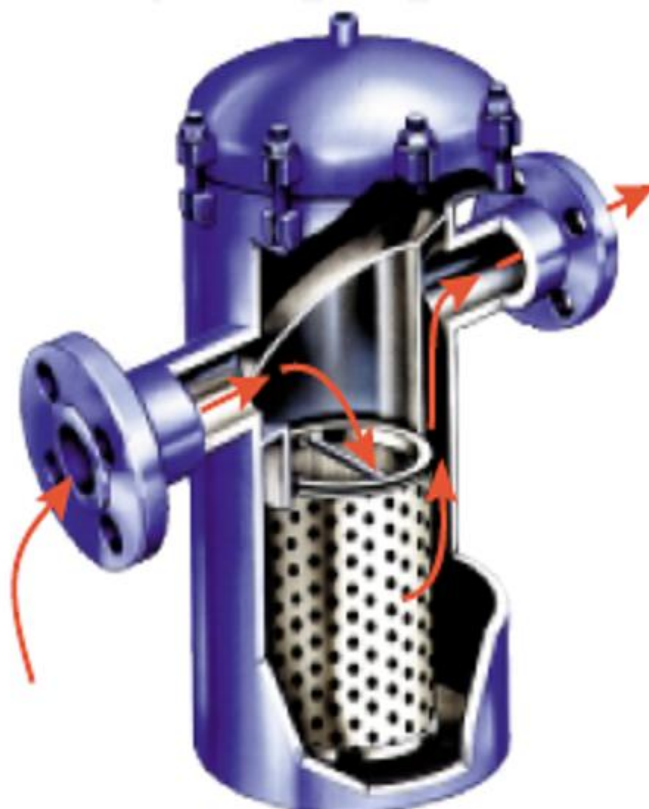
PSIG intrare	Număr model								
	30-2- 150	30-3- 150	30-4- 150	30-2- 300	30-3- 300	30-4- 300	30-2- 600	30-3- 600	30-4- 600
0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	43	83	135	43	83	135	43	83	135
10	49	95	152	49	95	152	49	95	152
20	59	113	183	59	113	183	59	113	183
40	74	144	232	74	144	232	74	144	232
75	96	186	299	96	186	299	96	186	299
100	109	210	345	109	210	345	109	210	345
150	131	253	408	131	253	408	131	253	408
200	149	289	466	149	289	466	149	289	466
300	181	351	565	181	351	565	181	351	565
400	208	403	649	208	403	649	208	403	649
600	254	491	791	254	491	791	254	491	791
800	292	565	911	292	565	911	292	565	911
1000	326	631	1017	326	631	1017	326	631	1017
1200	357	690	1113	357	690	1113	357	690	1113
1400	385	745	1201	385	745	1201	385	745	1201

Seria 30A oferă o alternativă economică la standardul seriei 30. Este caracterizat prin greutate foarte redusă datorită carcasei de aluminiu turnat, 30A fiind compatibilă pentru ANSI.

Seria 30F (fig. 3.36) oferă aceeași gamă de filtre de debit cu design compact ca și seria 30, cu avantajul suplimentar de operare ușoară. Închiderea șurubului articulată și elementul cupă asigură înlocuirea ușoară a pieselor/elementelor.

Caracteristicile unor filtre seria 30F, utilizate în SNTGN se prezintă în tabelele 3.15, 3.16 și 3.17.

Fig. 3.36.
Filtru pentru gaz uscat. Seria 30F



Tabelul 3.15. *Filtre seria 30F capacității în CFH (x1000) la 20" W.C PSIA presiune de bază*

PSIG intrare	Număr model							
	30F-1- 559-8- 2"	30F-1- 559-8- 3"	30F-1- 5519-8- 4"	30F-1- 819-10- 6"	30F-2- 5519-16- 8"	30F-2- 819-20- 10"	30F-4- 5519-22- 10"	30F-3- 819-24- 12"
0.25	30.32	61.53	77.45	178.10	303.60	515.84	518.90	798.19
2	32.22	65.40	82.31	189.29	322.67	548.25	551.50	848.34
5	33.37	67.52	84.99	195.45	333.17	566.08	569.44	875.93
10	41.00	83.20	104.72	240.82	410.51	697.48	701.63	1079.27
20	48.59	96.61	124.12	285.42	486.54	826.67	831.58	1279.16
40	61.05	123.89	155.94	358.59	611.27	1038.60	1044.77	1607.10
75	78.15	158.60	199.63	459.06	782.54	1329.60	1337.50	2057.38
100	88.36	179.32	225.71	519.05	884.80	1503.35	1512.29	2326.24
150	105.87	214.86	270.44	621.91	1060.14	1801.26	1811.97	2787.22
200	120.87	245.30	308.76	710.02	1210.33	2056.46	2068.68	3182.10
300	146.33	296.96	373.79	859.56	1465.25	2489.58	2504..37	3852.29
400	167.82	340.57	428.67	985.78	1680.40	2855.14	2872.11	4417.96
600	204.37	414.75	522.04	1200.49	2046.41	3477.03	3497.70	5380.25
800	235.31	477.54	601.08	1382.25	2356.24	4003.46	4027.25	6194.82
1000	262.63	532.99	670.87	1542.74	2629.82	4468.29	4494.84	6914.09
1200	287.37	583.18	734.06	1688.03	2877.50	4889.12	4918.18	7565.27
1400	307.23	623.49	784.79	1804.70	3076.37	5227.02	5258.09	8088.13

Tabelul 3.16. Filtre seria 30F capacității în CFH (x100) la 1” PSID, 14,73 presiune de bază

PSIG intrare	Număr model							
	30F-1- 559-8- 2”	30F-1- 559-8- 3”	30F-1- 5519-8- 4”	30F-1- 819-10- 6”	30F-2- 5519-16- 8”	30F-2- 819-20- 10”	30F-4- 5519-22- 10”	30F-3- 819-24- 12”
0.25	35.67	72.38	91.11	209.51	357.15	606.82	610.43	938.98
2	37.91	76.93	96.83	222.68	379.59	644.95	648.78	997.98
5	39.14	79.43	99.98	229.92	391.93	665.93	669.89	1034.43
10	48.23	97.87	123.19	283.29	482.92	820.51	825.39	1269.64
20	57.16	116.00	146.01	335.76	572.36	972.48	978.26	1504.79
40	71.81	145.74	183.44	421.84	719.09	1221.80	1229.06	1890.57
75	91.93	186.57	234.84	540.03	920.57	1564.12	1573.42	2420.27
100	103.95	210.95	265.53	610.61	1040.87	1768.53	1779.04	2736.56
150	124.55	252.76	318.15	731.61	1247.139	2118.99	2131.58	3278.85
200	142.19	288.57	363.22	835.26	1423.82	2419.20	2433.58	3743.39
300	172.14	349.34	439.72	1011.18	1723.70	2928.71	2946.12	4531.80
400	197.42	400.64	504.29	1159.66	1976.80	3358.76	3378.72	5197.23
600	240.42	487.90	614.13	1412.24	2407.38	4090.34	4114.65	6329.27
800	276.82	561.77	707.11	1626.06	2771.86	4709.62	4737.62	7287.52
1000	308.96	627.00	789.21	1814.86	3093.69	5256.46	5287.69	8133.66
1200	338.05	686.05	863.54	1985.78	3385.06	5751.51	5785.69	8899.71
1400	361.42	733.47	923.22	2123.03	3619.01	6149.01	6185.56	9514.78

Tabelul 3.17 Filtre seria 30F capacității în CFH (X 1000) la 2” PSID, 14,73 presiune de bază
PSIA

PSIG intrare	Număr model							
	30F-1- 559-8- 2”	30F-1- 559-8- 3”	30F-1- 5519-8- 4”	30F-1- 819-10- 6”	30F-2- 5519-16- 8”	30F-2- 819-20- 10”	30F-4- 5519-22- 10”	30F-3- 819-24- 12”
0.25	50.44	102.37	128.85	296.30	505.08	858.18	863.28	1327.92
2	53.61	108.80	136.94	314.91	536.82	912.10	917.52	1411.35
5	55.35	112.34	141.40	325.16	554.28	941.76	947.36	1457.26
10	68.20	138.41	174.22	400.64	682.94	1160.38	1167.28	1795.54
20	80.84	164.05	206.49	474.84	809.44	1375.30	1383.47	2128.10
40	101.56	206.11	259.43	596.57	1016.95	1727.88	1738.15	2673.67
75	130.01	263.85	332.11	763.72	1301.88	2212.00	2225.15	3422.79
100	147.00	298.33	375.51	863.53	1472.01	2501.08	2515.94	3870.08
150	176.14	357.45	449.93	1034.65	1763.71	2996.70	3014.51	4637.67
200	201.09	408.09	513.67	1181.24	2013.71	3421.26	3441.60	5293.95
300	243.44	494.04	621.86	1430.02	2437.68	4141.82	4166.44	6408.93
400	279.19	566.59	713.17	1640.00	2795.62	4750.00	4778.23	7350.00
600	340.00	690.00	868.51	1997.22	3404.55	5784.62	5819.00	8950.93
800	391.48	794.47	1000.00	2299.60	3920.00	6660.41	6700.00	10306.11
1000	436.93	886.71	1116.11	2566.60	4375.14	7433.86	7477.92	11502.73
1200	478.08	970.22	1221.23	2808.32	4787.20	8133.86	8182.21	12586.09
1400	511.12	1037.28	1305.63	3002.41	5118.06	8696.01	8747.70	13455.94

3.5. CONCLUZII

- Operația de filtrare depinde de foarte mulți factori, cei mai importanți fiind următorii: natura și locul de extracție a gazelor naturale; natura zăcământului și a rocilor magazin; presiunea de erupție și presiunea de intrare în aparat; debitul de gaze naturale transportat și cerut; natura și dimensiunile particulelor solide; forma și mărimea particulelor solide și lichide; debitul de gaz și densitatea de praf antrenată; temperatura de exploatare; adâncimea de filtrare; nivelul de filtrare; regimul de funcționare;

- La vitezele mari cu care curg gazele și particulele de praf antrenate se produce evadarea scaunelor și sertarelor vaselor și acestea nu se mai închid, erodarea scaunelor și ventilelor aparatului de reglare și de siguranță și acestea nu mai reglează corect, respectiv nu mai funcționează corespunzător, înfundarea și erodarea orificiilor calibrate ale instalațiilor de măsurare și control și acestea conduc la erori, care nu pot fi evaluate cantitativ etc;

- Limitarea vitezei de curgere a gazelor naturale prin conducte, recomandată de unii autori, pentru evitarea evaporării, nu mai poate fi luată în considerare în condițiile țării noastre deoarece conductele sunt deja în exploatare și capacitatea lor nu mai poate fi modificată la latitudinea noastră, rămânând alte soluții pentru acestea;

- Experimental și teoretic s-a constatat că viteza medie a gazului pentru care particulele de praf încep să plutească este de peste două ori mai mare decât viteza de la care particulele de praf încep să fie antrenate;

- Cele mai importante dezavantaje ale procedeelelor clasice de filtrare și purificare sunt: necesitatea curățirii periodice a elementelor filtrante care se colmatează; imposibilitatea reținerii tuturor particulelor solide și lichide, cele rămase constituind un agent de corodare agresiv al tuturor părților cu care gazele naturale vin în contact prin conductele de transport, în aparatura de măsură, control și distribuție; pierderea depresiune variabilă; costurile de exploatare și întreținere ridicate;

- Particularitățile propagării undelor ultrasonice în mediul de gaze naturale care antrenează particulele solide și lichide, depind de fenomenele și efectele ce apar datorită creării câmpului ultrasonic și anume: viteza de propagare; comprimarea și rarefierea mediului în funcție de natura undelor ultrasonice; reflexia și refracția undelor ultrasonice la interfața gaz – solid; crearea de unde staționare și apariția de noduri și antinoduri de presiune; difracția și difuzia undelor ultrasonice; atenuare energiei ultraacustice; absorbția ultraacustică; cavitația ultrasonică etc;

- Proiectarea unui filtru ultrasonic în așa fel încât în el să existe unde staționare permite reținerea celor mai fine particule de praf deoarece în antinodurile de presiune apare fenomenul de coalescență care presupune adunarea particulelor fine într-o particulă mai mare ($>10 \mu\text{m}$) care nu mai reprezintă o problemă de reținere, astfel încât un filtru ultrasonic are o adâncime de reținere de aproape 100%;

- Pe timpul propagării undelor ultrasonice în mediu gazos se produc compresiuni și rarefierii și temperatura în zona de compresiune devine mai ridicată decât în zona de rarefiere și prin urmare în zona de depresiune are loc extragerea apei din mediu iar în zona de compresiune are loc vaporizarea ei;

- Prin „aglomerarea ultrasonică” a particulelor fine, masa inițială a acestora crește prin coalescență de 2500...3500 ori în comparație cu masa particulelor primare, purtând fi captate cu ușurință de elementul filtrant;

- Prin „scuturare ultrasonică” se evită fenomenul de îmbâcsire al cartușului filtrant sau de colmatare a acestuia, realizându-se curățirea în timpul funcționării, fără a necesita întreruperea transportului gazelor și demontarea filtrului;

- Pentru o adâncime de filtrare maximă, o eficiență sporită a procesului de filtrare și purificare este necesară o succesiune logică de filtre ultrasonice montate corespunzător cu

posibilitățile acestora de a reține în totalitate particulele solide, de a elimina particulele de apă și de a usca gazele naturale ce trec prin aceste filtre;

- Partea cea mai importantă a oricărui filtru ultrasonic este sistemul ultraacustic care trebuie calculat, proiectat și executat în așa fel încât să producă un câmp de unde staționare (cazul filtrelor ciclon ultrasonice) sau să lucreze în regim de rezonanță (cazul celorlalte tipuri de filtre);

- Un filtru ultrasonic intră în funcțiune automat în momentul în care căderea de presiune a ajuns la o anumite limită (reglată anterior) aceasta punând în funcțiune generatorul ultrasonic, respectiv sistemul ultraacustic care produce scuturarea ultrasonică a elementului filtrant până când căderea de presiune este cea inițială;

- Un filtru ultrasonic nu necesită demontare și curățire periodică, durata de funcționare a lui fiind dată de durata de viață a elementului filtrant care este supus fenomenului de „scuturare ultrasonică” ori de câte ori este nevoie.

CAPITOLUL IV

CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND CALCULUL ȘI PROIECTAREA SISTEMELOR ULTRAACUSTICE FOLOSITE LA CONSTRUCȚIA FILTRELOR ȘI SEPARATOARELOR PENTRU GAZE NATURALE

4.1. CONTRIBUȚII PRIVIND TIPURILE DE TRANSDUCTOARE ULTRASONICE, COMPUNEREA ȘI ELEMENTELE CONSTRUCTIVE SPECIFICE UTILIZĂRII LOR LA FILTRAREA ȘI PURIFICAREA GAZELOR NATURALE

Transductorul ultrasonic este acea parte a sistemului ultraacustic ce realizează transferul de energie ultrasonică de la generator la elementul filtrant, astfel încât într-o mare măsură randamentul și performanțele elementului filtrant cu ultrasunete depind de modul de construcție, de corectitudinea dimensionării, de natura materialelor din care e confecționat, de modul de adaptare a lui la generatorul de înaltă frecvență și de modul de adaptare a transductorului ultrasonic la schema cinematică concretă a filtrului cu ultrasunete a gazelor naturale.

Sistemul ultraacustic este format dintr-un element activ – transductorul – cel care convertește oscilațiile electrice în oscilații mecanice cu frecvența ultrasonoră și un element pasiv – concentratorul de energie ultrasonică – cel care conduce, concentrează și focalizează energia ultrasonică în zona de îmbinare, care se termină cu partea în legătură directă cu elementul filtrant.

În proiectarea și execuția sistemului ultraacustic trebuie avute în vedere cerințele acustice, mecanice și tehnologice pe care trebuie să le satisfacă un sistem ultraacustic folosit la oricare dintre aplicațiile active ale ultrasunetelor.

Cerințele mecanice și tehnologice depind în mare măsură de tipul filtrării ce se vrea executată și se referă la: precizia de execuție a sistemului acustic, calitatea suprafețelor, natura materialului din care e confecționat, tratamentul termic, rezistența la uzură și oboseală, rigiditatea, stabilitatea termică, configurația geometrică a părții active etc.

Cerințele acustice sunt condiționate de necesitatea creerii în sistem a unui regim de funcționare în rezonanță sau de unde staționare. Aceste cerințe pot fi formulate astfel:

- transferul maxim de energie acustică de la concentrator în zona de tratat, realizabil numai în cazul lucrului în regim de rezonanță;

- pierderi minime de energie în elementele sistemului ultraacustic însuși și în elementele pasive ale filtrului pentru realizarea operației propuse.

Aceste pierderi depind de materialul din care elementele componente sunt confecționate, precum și de particularitățile și calitățile construcției sistemului acustic. Pierderile interioare de energie în material sunt cauzate de diferite mecanisme unificate sub noțiunea de “frecare internă” a cărei măsură este decrementul logaritmic al amortizării;

- concentrarea maximă a energiei acustice nemijlocit în focarul de intervenție sau tratament, cerință ce se realizează numai prin alegerea, calculul, construcția și execuția corectă a părților de lucru, concentratoarelor de energie ultrasonică și elementelor active ;

- stabilitatea regimului de rezonanță în funcționarea sistemului ultraacustic la variația în limite foarte largi a sarcinii statice care acționează asupra lui. Această stabilitate depinde de alegerea corespunzătoare a dimensiunilor de rezonanță a diferitelor elemente componente, de modul cum se realizează izolarea acustică, precum și de modul de utilizare a generatorului de ultrasunete;

- uniformitatea radiației energiei ultrasonice pe toată aria focarului de intervenție, de ea depinzând calitatea filtrării obținute în urma procesului de activare. Depinde de alegerea corectă

a formei concentratorului și părții active, de locul de dispunere a elementelor filtrante și de dimensiunile lor constructive;

- stabilitatea sistemului ultraacustic în timp, la o exploatare de lungă durată. Aceasta depinde de stabilitatea funcționării generatorului, de gradul de conservare a parametrilor întregului sistem transductor – concentrator – element filtrant și de variația rezistenței sarcinii;

- simplitate tehnologică și constructivă a elementelor și a întregului sistem ultraacustic în ansamblu. Aceasta este indicatorul cel mai important al oricărei instalații. El se obține prin îmbinarea diferitelor subansamble ale sistemului acustic, prin posibilitatea reglării și înlocuirii rapide a lor, prin simplitatea formelor constructive, prin posibilitatea schimbării rapide a concentratorului și elementului filtrant, accesul la focarul de concentrare (zona de separare), prin simplitatea reglării diferiților parametri ai sistemului ultraacustic etc.

O etapă importantă în realizarea unui filtrau de gaze cu ultrasunete a gazelor naturale a fost și aceea a realizării unui sistem ultraacustic corespunzător operației de separare și filtrare prin această metodă nouă. Principalele probleme privind sistemul ultraacustic care au fost luate în studiu și care au trebuit rezolvate se pot conchide în următoarele:

- dimensionarea elementelor componente ale transductorului ultrasonic pentru lucru în regim de rezonanță;

- alegerea schemei de montaj și fixare în carcasă, a modului de răcire a transductorului și a modului de izolare acustică a întregului sistem ultraacustic;

- decizia adoptării tipului de transductor magnetostrictiv, electrostrictiv, piezoceramic;

- tehnologia de execuție și montaj a elementelor sistemului ultraacustic și realizarea ajustărilor necesare pentru funcționarea cât mai stabilă la rezonanță;

- stabilirea corectă a regimurilor de excitație în gol și în sarcină;

- stabilirea criteriilor de eficiență a sistemelor ultraacustice și măsuri ce trebuie luate pentru îmbunătățirea ei.

4.2. MATERIALE FOLOSITE LA CONSTRUCTIA TRANSDUCTORILOR ULTRASONICI

Progresele realizate în construcția aparatelor cu ultrasunete se datoresc în foarte mare măsură punerii la punct a unor materiale care să fie utilizate cu eficiență maximă în construcția transductorilor ultrasonici. Utilizarea ultrasunetelor de mare putere în aplicații active a fost posibilă numai după realizarea vibratorului magnetostrictiv (Pierce 1928). Abia după 1956 se face un salt prin utilizarea pe lângă nichel și a aliajelor pe bază de nichel (nichel și aluminiu; nichel, fier și aluminiu; fier și nichel; nichel, fier și cobalt) cu compoziție optimă (Clark 1957). În ultima vreme se utilizează cu deosebit succes piezoceramicele (cel mai des folosite fiind zirconat titanat de plumb), feritele magnetostrictive, datorită proprietăților piezoelectrice foarte bune și cu proprietăți funcționale și tehnologice deosebite.

Datorită specificului proceselor de filtrare și separare cu ultrasunete a gazelor naturale, unde sunt necesare forțe statice de cele mai variate mărimi, majoritatea cercetărilor s-au făcut, pentru început utilizându-se transductoare magnetostrictive.

Alegerea materialelor pentru construcția transductoarelor se face folosind criterii comparative pe baza randamentului eficienței potențiale η_{pot} , sau pe baza factorului de cuplaj electromecanic efectiv k_{ef} . Pentru transductorii magnetostrictivi eficiența poate fi definită cu ajutorul unei expresii aproximative de forma:

$$\eta_{pot} = f(k_{ef}^2 Q_m Q_e) = 1 - \frac{2}{k_{ef}^2 Q_m Q_e}, \quad (4.1)$$

în care: Q_m este factorul de calitate mecanic; Q_e este factorul de calitate magnetic.

Eficacitatea unui transductor pe bază de ceramici electrostrictivi sau piezoelectrice poate fi exprimată prin factorul de cuplaj k_{ef} , definit ca raport între energia mecanică produsă și energia totală furnizată sistemului, adică:

$$k_{ef}^2 = \frac{e^2}{\epsilon s}, \quad (4.2)$$

în care: e este constanta piezoelectrică, în C/N; ϵ - permitivitatea, în F/m; s - rigiditatea, în N/m².

Factorul de cuplaj electromagnetic k_{ef} (magnetomecanic) la transductoarele magnetostrictive este definit prin relația:

$$k_{ef}^2 = \frac{d^2}{s\mu}, \quad (4.3)$$

în care: d este constanta magnetostrictivă; μ permeabilitatea, în Gs; s – rigiditatea, în N/m².

În construirea unui transductor ultrasonic folosit la aparatele de filtrare și separare cu ultrasunete a gazelor naturale, criteriul de bază rămâne factorul de cuplaj electromecanic și în mai mică măsură eficiența potențială.

Materialele magnetostrictive se împart în două categorii: materiale magnetostrictive metalice și ceramice. Dintre materialele metalice cel mai des utilizate sunt: nichelul, aliajele de nichel și aluminiu, de fier și aluminiu, de fier și nichel și aliajele de fier și cobalt. Acestea sunt fabricate sub forma unor benzi laminate la rece, precum și sub formă de tuburi.

În tabelul 4.1. sunt prezentate valorile unor constante caracteristice ale materialelor magnetostrictive metalice pentru nichel, permalloy 45, permendur și alfer foarte des utilizat în construcția unor transductoare ultrasonice care ar putea fi folosite la realizarea filtrelor de gaze naturale de diferite tipuri.

Tabelul 4.1 Constantele caracteristice ale unor materiale magnetostrictiv

Constanta	Nichel	45 Permalloy	Alfer	Permendur
H_0 . [Am ⁻¹]	160	600	800	200
B_0 .[Wbn ⁻²]	0,25	1,43	1,15	2,4
μ	1250	1900	1150	4500
μ_1	137	230	190	700
$\Delta l/l$ la H_0	-8 10 ⁻⁶	+14 10 ⁻⁶	+26 10 ⁻⁶	+70 10 ⁻⁶
h [mWb ⁻²]	-1 10 ⁻⁴	6,9 10 ⁶	19,5 10 ⁻⁶	-
Λ [NWb ⁻¹]	-4,8 10 ⁶	2,7 10 ⁶	6,7 10 ⁶	-
Y_0 [Nm ⁻²]	20 10 ⁻¹⁰	13,8 10 ¹⁰	15 10 ¹⁰	2,18
ρ [Kg m ⁻³]	8,7 10 ³	8,25 10 ³	6,7 10 ³	8,1 10 ³
K_c [%]	14	12,4	27	25
ρ_c [Ω m]	7 10 ⁻⁸	7 10 ⁻⁷	9 10 ⁻⁷	2,6 10 ⁻⁷
T_c [°C]	380		500	980
T_f [Pa]	3600 10 ⁵			5000 10 ⁵

Ceramicile magnetostrictive sunt ferite preparate din pulberi de oxizi de fier, zinc, nichel, mangan, cobalt, etc. omogenizate, presate în formele și dimensiunile dorite și sinterizate la temperaturi de aproximativ 1300 la 1400°C.

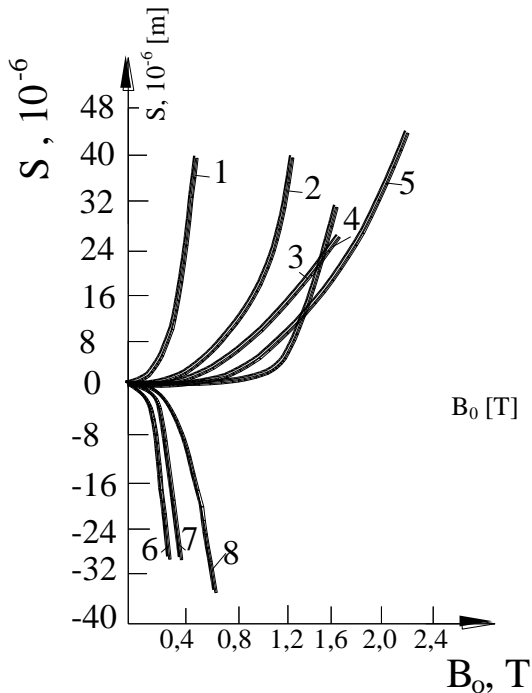


Fig. 4.1. Variația deformării S , funcție de inducție B_0 , a câmpului magnetic de polarizare pentru materiale magnetostrictive metalice și ceramice:

1 - magnetită; 2 - 12 alfer; 3 - permendur 50KΦ; 4 - 45 permalloy; 5 - permendur; 6 - feroxcub 7B și 4E; 7 - feroxcub 7A₁ și 7A₂; 8 - nichel.

Proprietățile unor tipuri de ferite magnetostrictive sunt prezentate în tabelul 4.2. În figura 4.1 este prezentată variația deformării S , în funcție de inducția magnetică B , pentru câteva ferite și metale magnetostrictive.

Teoretic se observă că atât constanta magnetostrictivă de tensiune Λ , cât și coeficientul de cuplaj magnetomecanic k_e , depind de mărimea câmpului de magnetizare. În figura 4.2 sunt prezentate aceste dependente pentru materialele magnetostrictive ceramice și metalice. Pentru anumite valori ale câmpului de magnetizare aceste mărimi au un maxim sau ajung la saturație.

Variația permeabilității dinamice relative μ_1 / μ_0 cu intensitatea câmpului de polarizare H_0 , respectiv inducția magnetică B este prezentată în fig. 4.2, a și b.

Deși coeficienții de cuplaj sunt relativ mici comparativ cu cei ai ceramicilor piezoelectrice, materialele magnetostrictive metalice sunt utilizate frecvent în construcția transductoarelor, datorită rezistenței mari la solicitări mecanice și temperaturii Curie ridicate.

Feritele magnetostrictive au o rezistență mică la solicitare și din această cauză nu pot fi folosite în special în aplicațiile de putere mare. Ceea ce limitează însă utilizarea materialelor magnetostrictive în special a celor metalice, sunt pierderile magnetice mari prin histeresis și curenți turbionari, care sunt cu atât mai importante cu cât frecvența câmpului aplicat este mai mare. Astfel, pierderile magnetice în cazul nichelului se dublează la frecvența de aproximativ 65 kHz față de pierderile la frecvența de 40 kHz. Domeniul frecvențelor de lucru este limitat practic la 100 kHz.

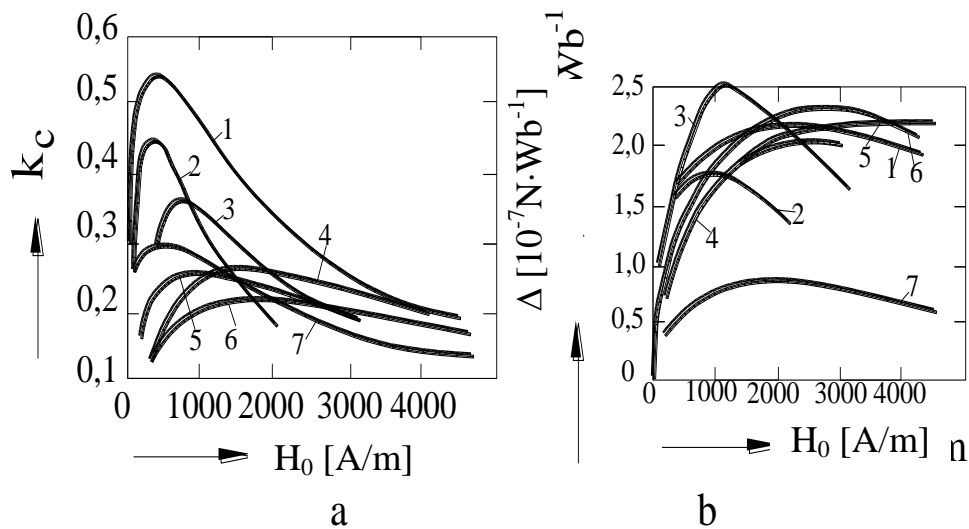


Fig. 4.2. Variația coeficientului de cuplaj magnetomecanic (a) și a constantei magnetostrictive Λ (b) funcție de intensitatea câmpului de polarizare:

1 - permandur 50 KΦ; 2 - aliaj magnetostrictiv; 3 - ferită Φ107;
4 - nichel; 5 - ferită Φ86; 6 - ferită 21 CπA; 7 - aliaj 12 PO.

Tabelul 4.2. Caracteristicile unor ferite magnetostrictive.

Constanta	Ferita Ø 86	Ferita Ø 107	Ferita 21 CπA
ρ [Kg m ⁻³]	5200	5200	5200
Y^B [Pa]	17 10 ¹⁰	17 10 ¹⁰	17,9 10 ¹⁰
C^B [m ⁻¹]	5700	5700	5860
H_0 [s m ⁻¹]	-	-	224
B_s [T]	0,4	0,36	0,38
Δ/l	-19 10 ⁻⁶	-	-26 10 ⁻⁶
Λ [N Wb ⁻¹]	2,0	2,6	2,36
K_{33}	0,27	0,38	0,21
γ [Wb N ⁻¹]	-	5,8 10 ⁻⁹	2,8 10 ⁻⁹
$\text{tg}\delta$ [%]	0,2	2,0	3,5
T_f [Pa]	314 10 ⁵	340 10 ⁵	200 10 ⁵

4.3. CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ELEMENTELE DE CALCUL ȘI PROIECTARE A TRANSDUCTOARELOR MAGNETOSTRICTIVE FOLOSITE LA CONSTRUCȚIA SISTEMELOR ULTRAACUSTICE

Teoria propagării undelor elastice în medii magnetostrictive împreună cu ecuațiile ce descriu mediul respectiv și condițiile limită pe care trebuie să le satisfacă, aplicate pentru fiecare caz particular, conduc la aflarea modurilor de vibrație și caracteristicilor de funcționare ale transductoarelor magnetostrictive. Cel mai utilizat mod de vibrație este modul longitudinal, caracterizat de o undă elastică longitudinală, excitată în circuitul magnetic respectiv, prin intermediul bobinei de comandă. Modul de dispunere al acestora în raport cu transductorul condiționează excitarea modurilor pare sau impare de vibrație.

Transductoarele magnetostrictive metalice, spre deosebire de cele ceramice care au rezistivitatea electrică foarte mare, nu se pot confecționa compacte la dimensiunile uzuale, ci numai sub formă de pachet de tole laminate subțiri, izolate electric, pentru micșorarea pierderilor magnetice prin curenți turbionari. Câteva tipuri de astfel de transductoare posibil a fi utilizate în construcția filtrelor de gaze naturale: sunt prezente în figura 4.3.

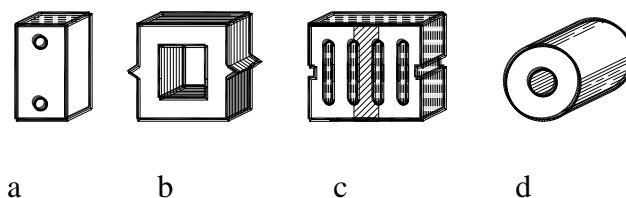


Fig. 4.3. Câteva tipuri de transductoare magnetostrictive metalice din tole laminate posibil a fi utilizate în construcția filtrelor de gaze naturale:
a - tip bară; b, c - tip fereastră; d - cilindric.

După structura sistemului ultraacustic, transductoarele magnetostrictive sunt de două feluri: simple și compuse. Din categoria structurilor simple fac parte: transductoarele de tip bară (cu secțiune rectangulară sau circulară) și transductoarele cilindrice. Transductoarele compuse sunt în formă de pachet cu una sau mai multe ferestre (fig. 4.3, b și c). Spre deosebire de transductoarele de tip bară, cele tip fereastră și cilindrice prezintă avantajul eliminării pierderilor de flux magnetic și demagnetizarea prin închiderea circuitului magnetic. Cele mai adecvate elementelor active ale filtrelor folosite la separare și filtrare sunt transductoarele tip bară și transductoarele cilindrice.

4.3.1. Transductoarele tip bară

Sunt confecționate din țevi de metal magnetostrictiv, din tole laminate, ca în figura 4.3, a sau în formă de bară compactă (în cazul feritelor magnetostrictive). Frecvența de vibrație longitudinală f_0 , a unei bare de lungimea l , cu capete libere se determină cu relația:

$$f_0 = (n/2l)\sqrt{Y/\rho} \quad , \quad (4.4)$$

unde: Y este modulul lui Young; ρ - densitatea materialului; n - ordinul armonicii ($n = 1, 2, 3$)

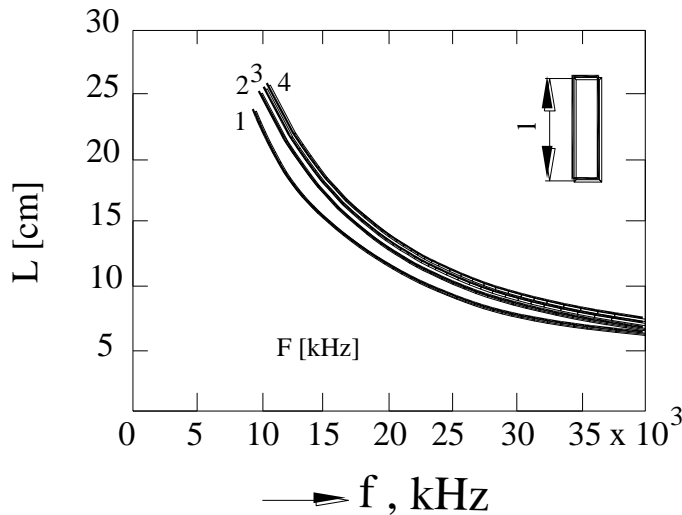


Fig. 4.4. Variația frecvenței traductorului magnetostrictiv tip bară în funcție de lungimea lui, pentru diverse materiale:

- 1 – nichel;
- 2 – permendur K65;
- 3 – alfer;
- 4 – permendur K4 Ø2.

În figura 4.4 sunt reprezentate diagramele de variație a frecvenței de vibrație a transduoarelor magnetostrictive în formă de bară în funcție de lungimea lor, pentru diverse materiale magnetostrictive.

Dacă bara este fixată la un capăt, frecvența de vibrație f_0 se calculează cu relația:

$$f_0 = \frac{2n-1}{4l} \sqrt{Y/\rho} \quad , \quad (4.5)$$

În cazul barei cu un capăt fixat și cu celălalt încărcat cu o masă concentrată m , cazul cel mai des folosit la filtrare și purificare, frecvența de vibrație longitudinală f_0 se determină cu relația:

$$f_0 = \frac{F(m_t/m)}{2\pi l} \sqrt{Y/\rho} \quad , \quad (4.6)$$

unde: $F(m_t/m)$ este o funcție de raportul dintre masa concentrată m și masa m_t , a transductorului, ale cărei valori sunt date în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3. Valorile funcției $F(m_t/m)$

m_t /m	0,1	0,3	0,5	0,7	1	2	3	5	10
F	0,32	0,52	0,65	0,75	0,86	1,13	1,20	1,32	1,4

4.3.2. Transductoare cilindrice

Se confecționează de obicei sub forma unui pachet de tole inelare. Bobinajul de excitație se înfășoară pe miez sau este așezat în orificii speciale, practicate în pachetul de tole. Transductorul vibrează radial având o frecvență de rezonanță f_0 , ce poate fi calculată cu relația:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi r} \sqrt{\frac{Y}{\rho} [1 + (1-n)^2]}, \quad (4.7)$$

unde: r este raza medie a cilindrului, iar n este ordinul armonicii ($n = 1, 2, 3, \dots$).

Înălțimea cilindrului trebuie să fie mult mai mică decât lungimea de undă λ , în materialul din care este confecționat transductorul, pentru a se evita apariția modurilor de vibrație complexe.

În figura 4.5. este reprezentată variația razei medii a cilindrului magnetostrictiv funcție de frecvență, pentru diverse materiale utilizate în construcția unui astfel de transductor.

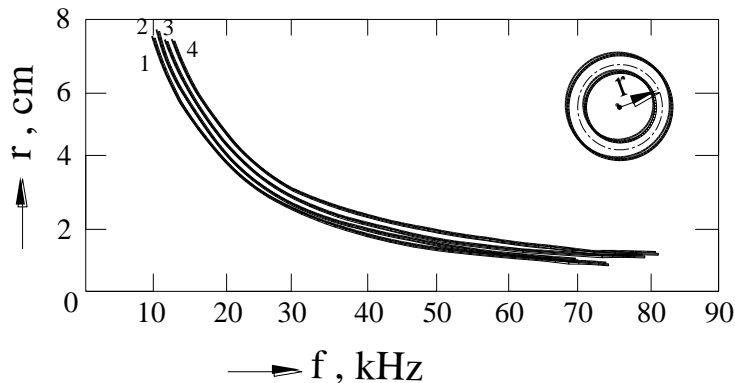


Fig. 4.5. Variația razei medii a transductoarelor magnetostrictive cilindrice funcție de frecvența vibrațiilor radiale emise, pentru diverse materiale:

1 – nichel; 2 – permendur K 65; 3 – alfer; 4 – permendur K 49Ø.

4.3.3. Parametrii de funcționare ai transductoarelor magnetostrictive

Funcționarea transductoarelor magnetostrictive este definită de următorii parametrii caracteristici: frecvența de rezonanță mecanică, frecvența de rezonanță electromecanică, coeficientul de transformare electromecanic, parametrii echivalenți concentrați, factorul de calitate mecanic, tensiunea electrică produsă la rezonanță, inducția magnetică la rezonanță, caracteristica de frecvență a puterii acustice în vecinătatea rezonanței, impedanța electrică, puterea electrică consumată, randamentul electromecanic și curenții electrici la rezonanță.

Dintre tipurile constructive de transductoare magnetostrictive, cele mai des utilizate în cazul filtrării și purificării cu ultrasunete a gazelor naturale te sunt transductoarele cilindrice care vor fi analizate în continuare din punctul de vedere al proiectării.

4.3.3.1 Transductorul magnetostrictiv cilindric

Acest tip de transductor, este ca și cel tip fereastră, dar prezintă avantajul că circuitul magnetic este închis. Parametrii geometrici care intră în calculul mărimilor sunt raza medie r , grosimea peretelui d și înălțimea h . Elementele de calcul și proiectare sunt următoarele:

➤ *frecvența de rezonanță mecanică* f_0 , care se calculează cu formula (4.7), în care, în loc de mărimea Y se folosește mărimea Y^s , care este modulul Young la inducție magnetică

constantă. Expresia (4.7) este aproximativă, fiind valabilă pentru cilindri cu înălțimea mică și grosimea peretelui mică în raport cu raza medie.

Pentru transductorul încărcat, frecvența de rezonanță mecanică f_r se modifică datorită masei suplimentare de radiație și se calculează cu relația:

$$f_r = f_0 / \sqrt{1 + \beta(\omega) \rho_m c_m / (\omega_r d \rho)} - f_0 / \sqrt{1 + \beta(\omega) \rho_m c_m r / (\rho c^B d)} \quad , \quad (4.8)$$

unde: $\beta(\omega)$ este coeficientul impedanței reactive de radiație (fig.4.6) pentru cilindru vibrator;
 $\rho_m c_m$ - impedanța acustică a mediului de radiație;

➤ *frecvența de rezonanță electromagnetică* f'_0 , diferă de frecvența de rezonanță mecanică printr-un factor de corecție, astfel:

$$f'_0 = f_0 \sqrt{1 - K_{33}^2} \quad , \quad (4.9)$$

unde: K_{33}^2 este coeficientul de cuplaj magnetomecanic longitudinal;

➤ *coeficientul transformării electromecanice* n se calculează cu relația:

$$n = 2\pi\gamma / (\omega N) \quad , \quad (4.10)$$

unde: N este numărul de spire; γ - constanta magnetostrictivă;

➤ *parametrii concentrați echivalenți* (masa echivalentă m_{ech} și respectiv complianța elastică echivalentă K_{ech}) se calculează cu relațiile:

$$m_{ech} = 2\pi r d h \rho \quad ; \quad k_{ech} = \frac{r}{2\pi Y^Y dk} \quad , \quad (4.11)$$

și depind de caracteristicile geometrice și elastice ale transductorului;

➤ *factorul de calitate mecanic* Q_m se calculează pentru transductorul încărcat, cu relația:

$$Q_m = \frac{\rho c^B \eta_{am} d F_r}{\alpha_\omega \alpha(\omega_r) r f_0} \quad , \quad (4.12)$$

unde:

$$\alpha\omega = 1 - [1 - \alpha(\omega) / \alpha(\omega_r)] \eta_{am} \quad ; \quad \text{iar}$$

$\alpha(\omega)$ este coeficientul impedanței active de radiație a cilindrului vibrator (fig. 4.6);

$\alpha(\omega_r)$ este valoarea coeficientului $\alpha(\omega)$ pentru $\omega = \omega_r = 2\pi f_r$;

c^B este viteza de propagare a oscilațiilor longitudinale la inducție magnetică nulă;

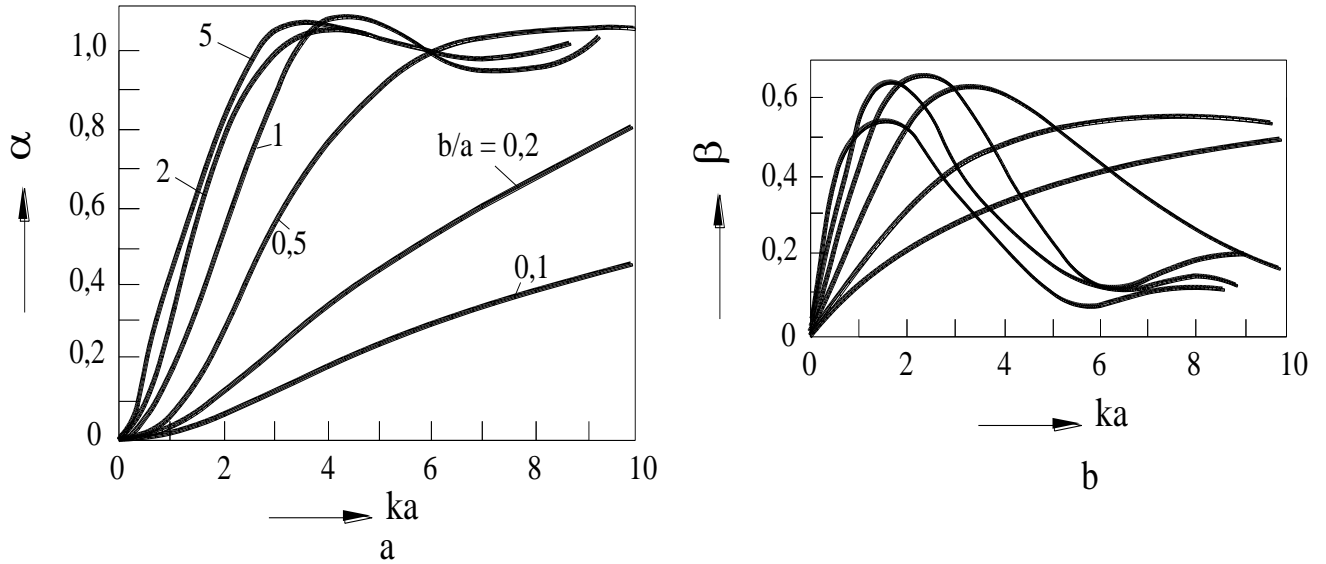


Fig. 4.6. Coeficienții de impedanță activă α fig. (4.6, a) și respectiv β fig. (4.6, b) ai pistonului rectangular radiant (de lungime a și lățime b) Parametrul curbelor este raportul a/b .

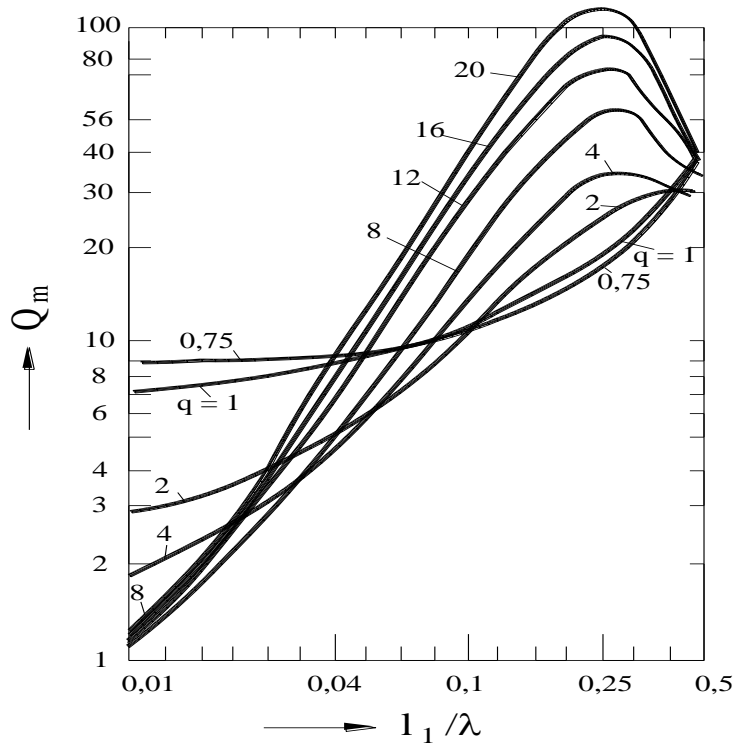


Fig. 4.7. Dependența factorului de calitate mecanic Q_m funcție de raportul l_1/λ (parametrul curbelor este raportul secțiunilor q).

➤ tensiunea electrică U , necesară pentru producerea unei puteri acustice date la regim de rezonanță, se calculează cu relația:

$$U = \frac{A}{m\eta_{am}} \sqrt{\alpha(\omega_r) \rho_m c_m P_{as}^0} \quad , \quad (4.13)$$

unde: $A = 2\pi rh$ este aria secțiunii de radiație (aria laterală a cilindrului); P_{as}^2 - puterea acustică specifică emisă la rezonanță;

➤ *puterea acustică emisă la rezonanța mecanică* P_a^0 este dată de relația:

$$P_a^0 = \frac{n^2 \eta_{am}^2 U^2}{\alpha(\omega_r) \rho_m c_m A} , \quad (4.14)$$

și depinde de tensiunea aplicată U , coeficientul de transformare n , impedanța acustică a mediului $\rho_m c_m$, valoarea coeficientului $\alpha(\omega_r)$ și aria secțiunii de radiație A ;

➤ *caracteristica de frecvență a puterii acustice în vecinătatea rezonanței* este dată de expresia:

$$\frac{P_a}{P_a^0} = \frac{\alpha(\omega)}{\alpha(\omega_r) \alpha_\omega^2} \frac{1}{1 + Q_m^2 (f / f_r - f_r / f)} , \quad (4.15)$$

➤ *impedanța electrică a transductorului magnetostrictiv cilindric* este compusă din elementele:

- reactanța inductivă X_L , de forma:

$$X_L = j\omega L_0 = j\omega \mu^s N A_0 / (2\pi r) , \quad (4.16)$$

unde: $A_0 = dh$ este aria secțiunii axiale a cilindrului;

- impedanța electrică de radiație activă R_R , de forma:

$$R_R = \alpha_\omega \alpha(\omega_r) \rho_m c_m A / (n^2 \eta_{am}) , \quad (4.17)$$

- impedanța de pierderi electromagnetice R_p , de forma:

$$R_p = \frac{\omega^2 L_0}{2\mu^s \sigma_p} , \quad (4.18)$$

- impedanța electrică la rezonanța Z_r , de forma :

$$Z_r = \frac{1}{\frac{R_R + R_p}{R_R R_p} + \frac{1}{j\omega_r L_0}} , \quad (4.19)$$

- impedanța electrică în vecinătatea rezonanței Z , de forma:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_M + jX_m} + \frac{1}{R_p} + \frac{1}{j\omega_r L_0}} , \quad (4.20)$$

unde:

$$R_M = \frac{\alpha(\omega) \rho_m c_m A}{4n^2 \eta_{am}} , \quad X_M = \frac{\alpha(\omega) \rho_m c_m A Q}{4n^2 \eta_{am}} (f / f_r - f_r / f) , \quad (4.21)$$

➤ *Randamentul electromecanic al traductorului* η_{en} depinde de raportul r/d , de mărirea constantei magnetostrictive și se calculează cu relația:

$$\eta_{en} = \frac{1}{1 + \frac{2\alpha(\omega) \alpha(\omega_r) \sigma_p \rho_m c_m r^2}{\gamma^2 \eta_{am} d}} , \quad (4.22)$$

➤ *Puterea electrică necesară* P_e , pentru producerea puterii acustice date se determină cu relația:

$$P_e = U^2 \frac{R_R + R_p}{R_R R_p} = \frac{P_a}{\eta_{em} \eta_{am}}, \quad (4.23)$$

➤ *Curenții electrici la rezonanță* sunt:

- curentul de magnetizare I_m , care se determină cu relația:

$$I_m = \frac{U}{\omega_r L_0} = \frac{2\pi r B}{q N \mu^s}, \quad (4.24)$$

- curentul de lucru I , care se determină cu relația:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\omega_r N B d' h}{R_R}, \quad (4.25)$$

- curentul de pierderi la rezonanța I_p , care se determină cu relația:

$$I_p = \frac{U}{R_p} = \frac{\omega_r N B d h}{R_p} = \frac{\sigma_p 2\pi r B}{\omega_r N}, \quad (4.26)$$

- curentul de polarizare I_{pol} , care se determină cu relația:

$$I_{pol} = \frac{H_0 2\pi r}{N}, \quad (4.27)$$

- curentul total necesar la rezonanța I_t , care se determină cu relația:

$$I_t = \sqrt{I_{pol}^2 + (I_p + I)^2 + I_m^2}, \quad (4.28)$$

4.3.3.2. Particularitățile fabricării transductoarelor magnetostrictive

Pentru reducerea pierderilor prin curenți turbionari, transductoarele magnetostrictive metalice se fabrică din tole subțiri decupate din tablă laminată subțire, (grosimea $s = 0,05 \dots 0,1 \text{ mm}$) ansamblate într-un pachet la înălțimea necesară și izolate electric fiecare unele cu altele. Prin operația de laminare datorită modului de curgere al metalului rezultă o anizotropie magnetică în ansamblul tolei deformată. De aceea, pentru obținerea unei bune eficiențe, decuparea tolelor se face astfel încât direcția liniilor de forță magnetică să coincidă cu direcția liniilor de curgere la laminare sau să facă un unghi de 45° de grade cu direcția de laminare.

Pentru izolarea electrică a tolelor se depun straturi de izolație speciale între ele sau se supune materialul la un tratament termic de recoacere, prin care se formează pe suprafața sa un strat de oxid care se comportă ca un bun izolant. Ca urmare a tratamentului de recoacere, structura de echilibru obținută face ca pierderile prin histerezis și prin curenți turbionari să fie mai mici, iar inducția de saturație să fie mai mare.

Tratamentul de recoacere elimină de asemenea și tensiunile interne rezultate în urma laminării și decupării după contur, precum și deformațiile remanente, ceea ce permite obținerea unor pachete de tole cu configurația geometrică dorită. În cazul tolelor confecționate din nichel, stratul de oxid izolant rezultat prin tratamentul de recoacere asigură o izolație electrică foarte bună. Pelicula de oxid se formează ușor, prin introducerea, în cazul recoacerii în vid sau în atmosferă de hidrogen, a unei cantități de aer în cuptor, la sfârșitul recoacerii, sau prin încălzire în aer a tolelor până la 600°C . Unele materiale magnetostrictive (de tipul aliajelor fier – cobalt)

nu formează prin acest tratament o peliculă de oxid suficient de solidă, de aceea pentru izolarea tolelor este necesar un strat de lac electrotehnic.

De o mare importanță în funcționarea la parametri optimi a transductoarelor magnetostrictive, ca și a celorlalte tipuri de transductoare electromecanice este acordul care se realizează între parametrii de intrare ai traductorului (frecvența de rezonanță, impedanța) și parametrii de ieșire ai generatorului, astfel încât randamentul transformării electromecanice să fie maxim. Reactanța inductivă a bobinei transductoarelor magnetostrictive se adaptează de obicei printr-un condensator serie, care blochează în același timp curentul continuu de polarizare pentru a nu ajunge la generatorul de înaltă frecvență. Datorită rezistenței mecanice superioare a materialelor magnetostrictive, care permite utilizarea la puteri electrice mari și solicitări mari, în timpul funcționării, transductoarele magnetostrictive metalice sunt utilizate prioritar pentru producerea puterilor mari la frecvențe apropiate de limita inferioară a domeniului ultrasonor (20....42kHz). O dată cu creșterea frecvenței, pierderile magnetice cresc, astfel încât la frecvențe mai mari (peste 80 kHz) se impune utilizarea transductoarelor confecționate din materiale ceramice.

4.4. CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ELEMENTELE DE CALCUL ȘI PROIECTARE A TRANSDUCTOARELOR PIEZOCERAMICE COMPUSE FOLOSITE LA CONSTRUCȚIA SISTEMELOR ULTRAACUSTICE DIN COMPONENTA FILTRELOR ULTRASONICE

La acest tip de transductoare elementul activ (compact sau secționat) este asamblat între două elemente pasive (de obicei metalice) identice (fig. 4.8), de aceea, transductorul se numește simetric.

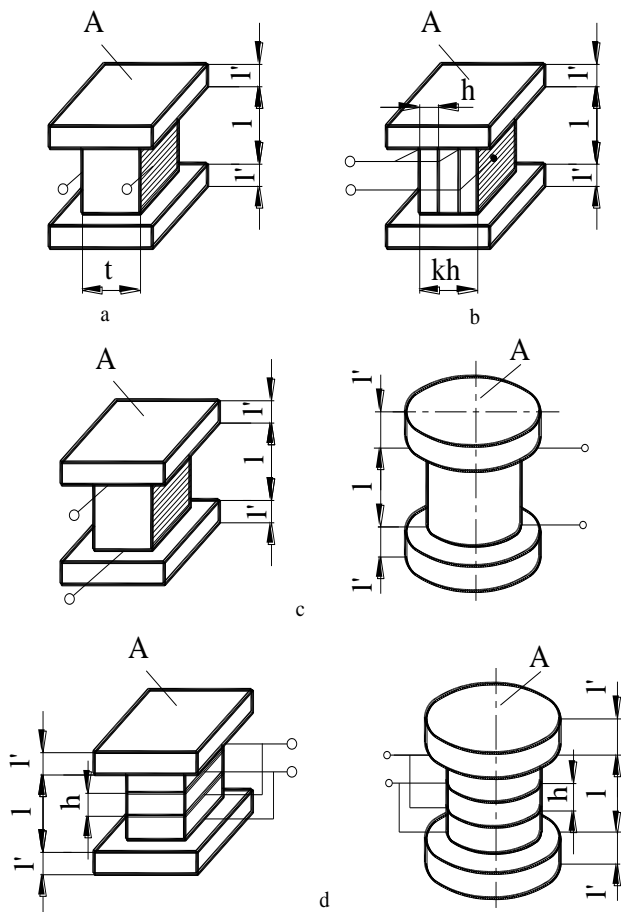


Fig. 4.8. Transductoare piezoceramice compuse cu două elemente pasive identice:

- a - compacte cu efect piezoelectric transversal;*
- b - secționate, cu efect piezoelectric transversal;*
- c - compacte, cu efect piezoelectric longitudinal;*
- d - secționate, cu efect piezoelectric longitudinal.*

Asamblarea elementelor active și pasive se face fie prin lipire cu abrazivi speciali, fie prin strângere cu ajutorul unui șurub, astfel încât să se asigure un contact ultraacustic perfect.

Parametrii transductoarelor cu element activ secționat, ale cărui secțiuni sunt înseriate coincid cu ai transductoarelor cu element activ compact. Pentru legarea în paralel parametrii au indicele “c”.

Pentru calcul și proiectarea lor trebuie parcurse următoarele etape:

➤ *condiția de rezonanță mecanică*, rezultată din egalitatea:

$$\rho'v'A'tg(\omega_0 l' / v') = \rho v^E A \operatorname{ctg}[\omega_0 l / (2v)^E], \quad (4.29)$$

sau:

$$\operatorname{ctg}(\omega_0 l' / v') \operatorname{ctg}[\omega_0 l / (2v)^E] = q, \quad (4.30)$$

unde: $\rho'v'A'$ și $\rho v^E A$ sunt impedanțele acustice caracteristice ale elementului pasiv și respectiv ale elementului activ; l' și l - lungimile acestora; q raportul impedanțelor caracteristice;

➤ *condiția de rezonanță electromecanică* rezultă din egalitatea:

$$\rho'v'A'tg(\omega'_0 l' / v') = \rho v^D A \operatorname{ctg}[\omega'_0 l / (2v^D)], \quad (4.31)$$

➤ *puterea acustică* P_a^0 , emisă la rezonanța P_a^0 este:

$$P_a^0 = \frac{4n^2 U^2 \cos^2(\omega_0 l' / v') \eta_{am}^2}{\alpha_0 \rho_m v_m A'}, \quad (4.32)$$

în care: n este coeficientul de transformare electromecanică;

➤ *puterea acustică la frecvențe joase* P_{aj} ($j \ll f_0$) se calculează cu relația:

$$P_{aj}^0 = \frac{\alpha_n^2 U^2 \rho_m v_m A' \omega^2}{4(v')^2 (\rho v^E A)^2}, \quad (4.33)$$

➤ *caracteristica de frecvență a puterii acustice în apropierea rezonanței* P_a este dată de relația:

$$P_a = \frac{\alpha \rho_m v_m A' n^2 U^2}{|Z|^2 \cos^2(\omega_0 l' / v')}, \quad (4.34)$$

unde:

$$|Z| = \tau^2 + \chi^2, \quad (4.35)$$

$$\tau = \tau_0 [1 + (\alpha / \alpha_0 - 1) \eta_{am}], \quad (4.36)$$

iar

$$\tau_0 = \frac{\alpha_0 \rho_m v_m A'}{4 \eta_{am} \cos^2(\omega_0 l' / v')}, \quad (4.37)$$

Coeficientul χ , din expresia impedanței este dat de relația:

$$\chi = 0,5 [\rho'v'A'tg(\omega l' / v') - \rho v^E A \operatorname{ctg}[\omega l / (2v)^E]], \quad (4.38)$$

Formula aproximativă a dependenței de frecvență a puterii, în apropierea rezonanței este dată de expresia:

$$\frac{P_a}{P_a^0} = \frac{1}{1 + Q_m^2 (f / f_0 - f_0 / f)^2}, \quad (4.39)$$

unde: Q_m este factorul de calitate mecanic, care se obține din relația:

$$Q_m = \frac{4\pi f_0 \eta_{am} m' [1 + (m/2m') [\cos^2(\omega l' / v') + q^2 \sin^2(\omega l' / v')]]}{\alpha \rho_m v_m A'} , \quad (4.40)$$

În relația (4.40) m este masa elementului activ; m' - masa elementului pasiv; q – raportul impedanțelor caracteristice.

➤ *impedanța caracteristică Z , a transductorului în apropierea rezonanței se obține din relația cunoscută sub forma:*

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_m + jX_m} + j\omega C} , \quad (4.41)$$

unde: R_p este rezistența de pierderi electrice; R_m ; X_m - rezistența, respectiv reactanța mecanică, date de relațiile:

$$R_p = \frac{1}{\omega C \operatorname{tg} \delta} , \quad R_m = \frac{\tau}{n^2} , \quad X_m = \frac{\chi}{n^2} , \quad (4.42)$$

Coeficienții τ și χ se obțin din relațiile (5.36), respectiv (5.38), iar la frecvența de rezonanță $X_m = 0$.

➤ *randamentul electroacustic al transductorului η_{ea} . Randamentul electroacustic este reprezentat de produsul:*

$$\eta_{ea} = \eta_{am} \eta_{em} , \quad (4.43)$$

Randamentul acustomecanic η_{am} are o valoare aproximativ constantă (0,6...0,8), iar randamentul electromecanic η_{em} se obține din relația:

$$\eta_{em} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha_0 \rho_m v_m A \omega_0 \operatorname{tg} \delta}{4n^2 \eta_{am}}} , \quad (4.44)$$

➤ *sensibilitatea transductorului în regim de recepție la rezonanța electromecanică f'_0 se obține din relația:*

$$v'_0 = \frac{2n \eta_{am} \cos(\omega_0 l' / v')}{\alpha_0 \rho_m v_m \omega'_0 C} , \quad (4.45)$$

Pentru transductorul cu element activ secționat are formula:

$$v'_{0C} = \frac{v_0}{k} , \quad (4.46)$$

unde: k este numărul secțiunilor.

➤ *sensibilitatea receptorului la frecvențe joase $v_j(f \ll f'_0)$ se obține din relația:*

$$v_j = \frac{dA' w}{2qa} = \frac{dY^E w}{2\epsilon Y^D A} , \quad (4.47)$$

unde: w este distanța dintre electrozi a cărei valoare este: $w = t$, pentru transductoarele din figura 4.7,a; $w = h$, pentru transductoarele din figura 4.7, b, d; $w = 1$, pentru transductoarele din figura

4.7, c; d- constanta piezoelectrică (pentru efect longitudinal constanta piezoelectrică este d_{33} , iar pentru efect transversal este d_{31}).

Pentru transductorul cu element activ secționat, sensibilitatea la frecvențe joase este:

$$v'_{jc} = \frac{v_j}{k}, \quad (4.48)$$

➤ *caracteristica de frecvență a sensibilității transductorului în regim de recepție* se obține din relația:

$$\frac{v}{v'_0} = \frac{(f'_0/f)}{2\alpha_\omega \cos(\omega l'/v') \cos(\omega'_0 l'/v')} \times \left\{ \left[1 - \frac{v^D/V^E}{\sin(\omega l/v^D) [qtg(\omega l'/v') + F]} \left(1 - \frac{1}{q} t g \frac{\omega l'}{v'} \right) \left(qtg \frac{\omega l'}{v'} + 2F \right) \right]^2 + \left(\frac{\rho' v' \eta_{am}}{\rho_m v_m \alpha'_0 \alpha_\omega} \right)^2 \left[\frac{1}{q} \left(qtg \frac{\omega l'}{v'} + F \right) - \frac{2v^D/v^E}{\sin(\omega l/v^D)} \right]^2 \right\}^{-1/2}, \quad (4.49)$$

unde:

$$F = \frac{v^D}{v^E} t g \frac{\omega l}{2v^D}, \quad (4.50)$$

pentru efect piezoelectric transversal și

$$F = t g \frac{\omega l}{2v^D}, \quad (4.51)$$

pentru efect piezoelectric longitudinal, iar α_ω se obține din relația:

$$\alpha_\omega = 1 + (\alpha - 1) \eta_{am}, \quad (4.52)$$

➤ *sensibilitatea specifică de recepție* v'_{os} se obține relația v'_{os} se obține din relația:

$$v'_{os} = \frac{v_0}{\sqrt{|Z|}} = \frac{2nwn\eta_{am} \cos(\omega'_0 l'/v')}{\alpha'_0 \rho_m v_m \sqrt{\epsilon \omega'_0 \phi A}}, \quad (4.53)$$

4.4.1. Transductoare compuse polarizate mecanic

Polarizarea mecanică a transductoarelor compuse constă în tensionarea mecanică a elementului activ piezoceramic între cele două elemente pasive metalice prin intermediul unui dispozitiv de strângere, în scopul creșterii nivelului de putere acustică.

Influența polarizării mecanice asupra comportării elastoelectrice a transductorului compus poate fi studiată considerând cazul general al unui transductor compus format din elementul activ piezoceramic strâns între două elemente pasive, ca în figura 4.9.

Grosimea plăcii piezoceramice este a , iar tensiunea electrică alternativă V se aplică între $x = 0$ și $x = 1$, (1(a)). Elementele pasive au impedanțele acustice Z_1 și Z_2 la $x = 0$ respectiv $x = a$, iar elementul piezoceramic are impedanța acustică Z_c .

Tensiunea aplicată V este de forma:

$$V = V_0 e^{-\omega t} H(t), \quad (4.54)$$

unde: V_0 este amplitudinea maximă a semnalului, ω - frecvența semnalului, $H(t)$ - funcția Heaviside definită prin relațiile:

$$H(t) = \begin{cases} 1 \text{ cind } t > 0 \\ 0 \text{ cind } t \leq 0 \end{cases}, \quad (4.55)$$

Ecuatiile fundamentale ale problemei sunt:

- ecuațiile piezoelectrice:

$$\begin{aligned} T &= c^D a - hD \\ E &= -hS + D / \varepsilon^s, \end{aligned} \quad (4.56)$$

- ecuațiile de sarcină:

$$\Delta D = 0, \quad (4.57)$$

- ecuațiile de mișcare:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = c^D \frac{\partial S}{\partial x}, \quad (4.58)$$

unde: T și S sunt tensiunea, respectiv deformarea mecanică; E și D – intensitatea, respectiv inducția câmpului electric; c^D – constanta elastică la inducție constantă; h – constanta piezoelectrică; ε^s – permitivitatea dielectrică constrânsă.

Deformarea S și deplasarea elastică ξ sunt legate prin relația:

$$S = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad (4.59)$$

Condiția inițială a problemei este:

$$\xi|_{t=0} = (x - a/2)S_0, \quad (4.60)$$

unde S_0 ($S_0 = \partial \xi / \partial x|_{t=0}$) este deformarea inițială la momentul $t=0$, care se produce datorită polarizării mecanice a transductorului.

Ecuatia de mișcare (4.58) se mai poate scrie sub forma:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\xi x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \quad (4.61)$$

unde:

$$v = c^D / \rho, \quad (4.62)$$

Pentru rezolvarea ecuațiilor este convenabil să se utilizeze transformatele Laplace ale funcțiilor respective, care se vor nota cu bară. Aplicând transformarea Laplace de parametru p se obține:

$$\bar{V} = -h(\bar{\xi}_1 - \bar{\xi}_0) + \bar{Q} / c, \quad (4.63)$$

unde: c este capacitatea electrică a transductorului; V – tensiunea între punctele $x=0$ și $x=1$; Q – sarcina electrică.

Din relațiile (4.60) și (4.61) se obține ecuația de vibrație pentru transductorul polarizat mecanic, de forma:

$$\frac{D^2 \xi}{dx^2} = \frac{p^2}{v^2} - \frac{pS_0 a}{v^2} \left(\frac{x}{a} - \frac{l}{2} \right), \quad (4.64)$$

Soluția acestei ecuații este de forma:

$$\bar{\xi} = A e^{-px/v} + B e^{px/v} + S_0 a / p(x/a - 1/2), \quad (4.65)$$

Pentru cealaltă parte a transductorului, soluția are aceeași formă și anume:

$$\bar{\xi}' = A' e^{-px/v} + B' e^{px/v} + S_0 a / p(x/a - 1/2), \quad (4.66)$$

În aceste relații A, B, A', B' sunt constante.

Asupra suprafeței normale pe direcția axei x se exercită o forță F , ce rezultă din relația

$$\bar{F} + h\bar{Q} = pZ_c - \left(-A e^{-px/v} + B e^{px/v} + S_0 v / p^2 \right), \quad (4.67)$$

unde: Z_c este impedanța elementului piezoceramic.

Condițiile de continuitate ale forței și ale deplasării la limita ($x = 0, x = a$ și $x = l$) sunt:

$$- \text{la } x = 0, \quad (\bar{F}_1)_0 = (\bar{F})_0, (\bar{\xi}_1)_0 = (\xi)_0, \quad (4.68)$$

$$- \text{la } x = l, \quad (\bar{F})_1 = (\bar{F}')_1, (\xi)_1 = (\bar{\xi}')_1, \quad (4.69)$$

$$- \text{la } x = a, \quad (\bar{F}')_a = (\bar{F}_2)_a, (\bar{\xi}')_a = (\bar{\xi}_2)_a, \quad (4.70)$$

Presupunând elementul reflector rigidizat, constantele A_1 și B_1 sunt nule.

Ecuția (4.63) poate fi rescrisă în forma:

$$V = Ah(1 - e^{-pl/v}) + Bh(1 - e^{pl/v})S_0lh / p + Q / c, \quad (4.71)$$

Din această ecuație și din condițiile de continuitate se obține un sistem de două ecuații cu necunoscutele A și B , care se introduc în (4.65) și rezultă:

$$(\bar{\xi})_0 = A + B - S_0a / (2p), \quad (4.72)$$

Neglijând termenii de ordin superior în $1/p$ se obține în prima aproximație:

$$(\bar{\xi})_0 = \frac{[S_0vZ_c / (p^2Z_2) - S_0v / p^2 - S_0C_0lh^2 / (Z_2p^2) - v h C_0(pZ_2)]}{\lambda_4[1 - C_0h^2 / (pZ_2\lambda_4)]} - \frac{S_0v\lambda_1Ch^2 / (p^3Z_2)}{\lambda_2\lambda_4[1 - Ch^2 / (pZ_2\lambda_4)]} - \frac{S_0a}{2p}, \quad (4.73)$$

unde:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1 - Z_c / Z'_c, & \lambda_2 &= 1 + Z_c / Z'_c \\ \lambda_3 &= Z_c / Z_2 - 1, & \lambda_4 &= Z_c / Z_2 + 1, \end{aligned} \quad (4.74)$$

Substituind $V = v_0 / (p + \omega)$ în (4.73), neglijând din nou termenii de ordin superior în $1/p$ și aplicând apoi transformarea Laplace inversă se obține expresia lui $(\xi)_0$ dată de relația:

$$(\xi)_0 = L_1 + L_2t + L_3t^2 / l^2 + L_4e^{-\omega t}, \quad (4.75)$$

unde:

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{V_0C^2h^3}{\lambda_4^2Z_2^2\omega^2} - \frac{V_0Ch}{\lambda_4Z_2\omega} - \frac{S_0a}{2} \\ L_2 &= \frac{S_0vZ_c}{Z_2\lambda_4} - \frac{S_0v}{\lambda_4} - \frac{S_0Clh^2}{Z_2\lambda_4} - \frac{S_0vCh^2\lambda_1}{\lambda_2\lambda_4Z_2} - \frac{V_0C^2h^3}{\lambda_4^2Z_2^2\omega} \\ L_3 &= \frac{S_0vZ_0Ch^2}{Z_2^2\lambda_4^2} + \frac{S_0v lh^2}{Z_2\lambda_4^2} - \frac{S_0C^2lh^4}{Z_2^2} - \frac{S_0v\lambda_1C^2h^4}{\lambda_2\lambda_4^2Z_2^2} \\ L_4 &= \frac{V_0hC}{\lambda_4Z_2} - \frac{V_0C^2h^3}{\lambda_4^2Z_2^2\omega^2} \end{aligned}, \quad (4.76)$$

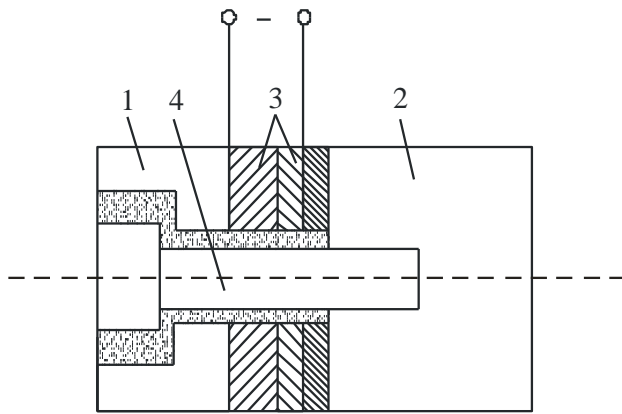


Fig. 4.9. Transductor compus polarizat mecanic:
 1 – element reflector; 2- element radiant;
 3 – elemente active; 4 – șurub de polarizare
 mecanică.

Deci răspunsul mecanic al transductorului polarizat mecanic este format din: o parte independentă de timp, o parte funcție polinomială de timp, iar a treia parte funcție exponențială de timp. Numai primele două părți sunt afectate de mărimea polarizării mecanice S_0 . La momentul $t = 0$ mărimea deplasării este:

$$(\xi)_0 = -S_0 a / 2, \quad (4.77)$$

În figura 4.10 este prezentat un transductor a cărui parte activă este formată din $2n$ elemente ceramice, cu electrozi metalici între ele, care servesc totodată și ca disipatori de căldură. Întregul ansamblu este polarizat mecanic prin intermediul unui șurub de rezistență mare. Planul nodal de vibrație (unde viteza de vibrație este minimă) este întotdeauna localizat în partea activă a transductorului. Acest transductor poate fi reprezentat prin circuitul mecanic echivalent din figura 4.11, unde v_1 , v_n și v_2 sunt vitezele de vibrație ale elementului reflector, modulului de vibrație și respectiv elementului radiant.

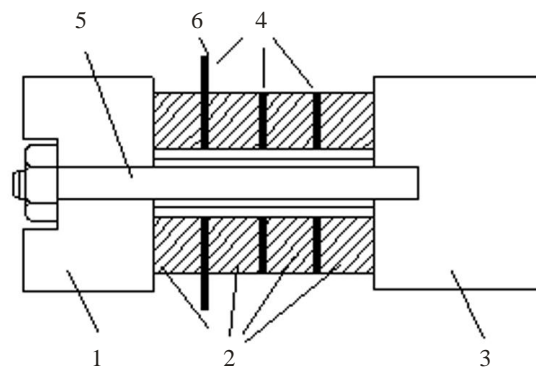


Fig. 4.10. Transductor compus polarizat mecanic, având $2n$ elemente active piezoceramice:
 1 - element reflector; 2 - elemente piezoceramice; 3 - element radiant; 4 - electrozi; 5 - șurub de polarizare
 mecanică; 6 - planul nodal de vibrație.

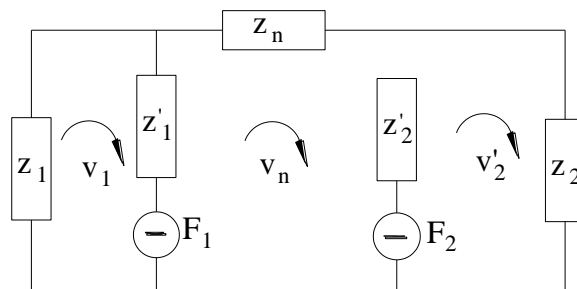


Fig. 4.11. Circuitul mecanic echivalent al transductorului compus reprezentat în figura 4.10.

Prin rezolvarea celor trei ecuații omogene derivate din circuitul echivalent se pot afla vitezele, în cazurile particulare când impedanța nodului Z_n ia valorile: $Z_n = \infty$ ($v_n = 0$), $Z_n = 0$ (nod liber) și $Z_n \neq 0$; în ultima situație (cea mai uzuală) și pentru ca fixarea să nu influențeze comportarea traductorului este necesar ca:

$$Z_n \gg \frac{(Y'_1 + Y_2) + (Y'_2 + Y_1)}{(Y'_1 + Y_2)(Y'_2 + Y_1)}, \quad (4.78)$$

unde Y'_1 și Y'_2 sunt admitanțele secțiunilor ceramice, iar Y_1 și Y_2 sunt admitanțele elementului reflector, respectiv radiant. Materialele prezintă proprietatea tipică materialelor ceramice de a avea o rezistență la comprimare de câteva zeci de ori mai mare decât la dilatare.

4.4.2. Transductoarele piezoceramice simple și transductoarele piezoceramice compuse nepolarizate mecanice

Rolul polarizării mecanice este de a tensiona ceramica astfel încât în funcționare oscilațiile tensiunii elastice să se efectueze nu în jurul valorii de zero, ci față de nivelul introdus prin polarizarea mecanică a transductorului (fig.4.12). Convenind ca dilatării mecanice să i se asocieze semnul pozitiv, iar comprimării – semnul negativ rezultă că polarizarea mecanică a transductorului este negativă. Datorită șurubului de polarizare care introduce o tensiune mecanică de comprimare T_0 , transductorul își schimbă ușor proprietățile din cauză că șurubul adaugă o masă și o elasticitate suplimentară. De asemenea, constantele piezoelectrice ale ceramicii se modifică. Factorul de amplificare G , al transductorului se modifică de asemenea, devenind G' și are expresia:

$$G' = 1 - 2/\sqrt{N}, \quad (4.79)$$

unde:

$$N = K_{ef}^2 Q_m Q_e, \quad (4.80)$$

Pentru ca transductorul să prezinte proprietăți optime, domeniul maxim de variație al coeficientului de cuplaj efectiv K_{ef} este:

$$K_{33} \leq K_{ef} \leq \frac{2\sqrt{2}}{\pi} K_{33}, \quad (4.81)$$

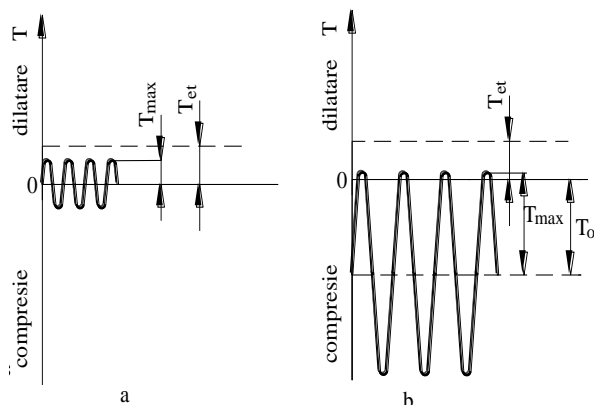


Fig.4.12. Influența polarizării mecanice T_0 , asupra valorii maxime a tensiunii mecanice T_{max} , care se poate aplica asupra transductorului compus în timpul funcționării:
a - fără polarizare mecanică ($T_0 = 0$); T_{max} este limitat de rezistența la dilatare mecanică maximă a ceramicii piezoelectrice T_f ; *b* - cu polarizare mecanică; T_{max} este limitat de rezistența la oboseală a șurubului de polarizare mecanică.

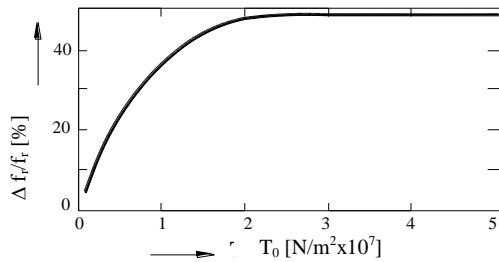


Fig. 4.13. *Înfluența tensiunii de polarizare mecanică T_0 asupra frecvenței de rezonanță a traductorului.*

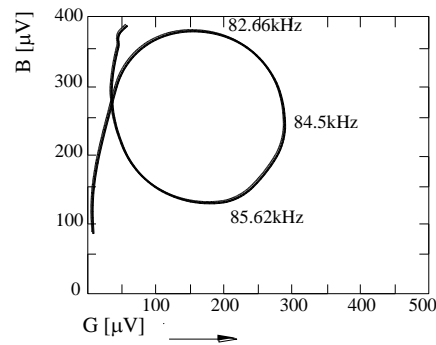


Fig. 4.14 *Diagrama admitanței unui traductor compus piezoceramic $G = f(B)$.*

Factorul de calitate mecanic fără sarcină Q_m este dat de relația:

$$Q_m = \frac{\omega_0}{R_m} \frac{m_2}{m_1} (m_1 + m_2) , \quad (4.82)$$

unde: R_m este rezistența mecanică (datorită pierderilor interne, frecării etc.), iar m_1 și m_2 sunt masele elementului reflector și respectiv radiant.

Elementul piezoceramic nu contribuie semnificativ la masa echivalentă M_{ech} . ($M_{ech} = m_1 + m_2 / m_1 m_2$) a sistemului vibrant. Factorul de calitate electric Q_e este caracteristic ceramicii piezoelectrice și depinde de nivelul de acționare al transductorului. Domeniul său de variație este de 400...200 pentru nivel mic și coboară până la 50 pentru nivel mare.

Datorită polarizării mecanice, puterea acustică pe unitatea de volum P_{av} , emisă de transductorul compus polarizat mecanic crește cu pătratul tensiunii mecanice de polarizare T_0 , având forma:

$$P_{av} = \frac{d_{33}^2}{K_{33}^2} (T + T_0)^2 Q_m \omega_0 \eta , \quad (4.83)$$

unde: T este tensiunea mecanică de funcționare.

Figura 4.13 prezintă influența tensiunii de polarizare asupra frecvenței de rezonanță a traductorului polarizat mecanic. Pentru valori mici ale lui T_0 , raportul $\Delta f_r / f_r$ este foarte mare (f_r este frecvența de rezonanță a transductorului nepolarizat) până la o anumită valoare peste care frecvența de rezonanță rămâne constantă.

Materialul șurubului de polarizare trebuie să aibă caracteristici similare cu acelea ale elementului reflector. Șurubul trebuie să asigure tensiunea de polarizare mecanică și să aibă o complianță mare. Deci, prin aplicarea tensiunii de polarizare mecanică se pot obține intensități și puteri acustice mari de la aceeași structură acustică. Pe de altă parte, acordarea pe aceeași frecvență a transductoarelor dintr-un ansamblu (sirena acustică, de exemplu) se poate realiza, în cazul unei acordări fine, nu atât prin prelucrarea mecanică a părților mecanice, care este o metodă ireversibilă, ci prin procesul de polarizare mecanică diferențială a transductoarelor.

Studiile experimentale asupra transductoarelor polarizate în care direcția polarizării mecanice coincide cu direcția polarizării electrice au evidențiat schimbările proprietăților la trecerea dintr-o stare de polarizare mecanică nulă ($T_0 = 0$) denumită starea minus la o stare cu tensiune nenulă ($T_0 > 0$) denumită starea plus, precum și cazul invers.

Comportarea transductorului compus la polarizare mecanică a fost studiată în următoarele ipoteze: unde elastice plane; mase metalice infinit rigide; direcția de polarizare mecanică aceeași

cu direcția de polarizare electrică și cu axa de simetrie a transductorilor; domeniul frecvențelor de experimentare situat în jurul frecvenței de rezonanță; masa ceramicii neglijabilă în raport cu masele metalice.

În aceste condiții impedanța echivalentă a traductorului Z_t este dată de relația:

$$Z_t = R_m + j(L_m \omega + 1/\omega C_m), \quad (4.84)$$

Impedanța Z_t este reprezentată printr-un circuit rezonant serie R_m , L_m , C_m , în paralel cu capacitatea statică C_0 ; componenta R_2 este suma a doi termeni $R_1 + R_2$, unde R_1 este rezistența de pierderi mecanice, iar R_s este rezistența de sarcină. În paralel cu C_1 este totdeauna o rezistență R_d de pierderi electrice în sistem.

În figura 4.14 este reprezentată diagrama $G = f(B)$ a unui traductor, G și B fiind conductanța respectiv susceptanța transductorului. Dacă se introduce o schimbare în starea de polarizare axială apar diferite efecte și în particular, parametrii care caracterizează circuitul echivalent al transductorului se schimbă. Au fost măsurate aceste variații, precum și variația în timp a acestora. Din momentul introducerii polarizării mecanice și cu ajutorul unui program stabilit în prealabil s-au înregistrat grafic diagramele admitanței corespunzătoare cu ajutorul unui dispozitiv automat de măsurare a unui înregistrator $x - y$, determinându-se:

- frecvența de rezonanță f_r (la conductanța maximă G_m);
- frecvențele care limitează lățimea benzii (la 3 dB), f_1 , f_2 (conductanța $G_m/2$);
- frecvența de rezonanță mecanică f_0 (susceptanța zero) când pierderile sunt mici, ce rezultă din:

$$\omega_0^2 = \frac{C_m + C_1}{L_m C_m C_1}, \quad (4.85)$$

Cu ajutorul acestor parametrii și ai reprezentării grafice a admitanței electrice s-au calculat parametrii:

$$\text{-lățimea benzii} \quad \Delta f = f_2 - f_1, \quad (4.86)$$

$$\text{-factorul de calitate mecanic} \quad Q_m = f_r / \Delta f,$$

$$\text{-capacitatea} \quad C_1 = (C_a + C_b)/2, \quad (4.87)$$

Capacitățile C_a și C_b corespund frecvențelor f_1 și f_2 respectiv:

- capacitatea dinamică C_m , de forma:

$$C_m = (C_a - C_b)/Q, \quad (4.88)$$

- coeficientul de cuplaj k_t , de forma:

$$k_t = \pi/2 \sqrt{C_m / [2(C_1 + C_m)]}, \quad (4.89)$$

Figura 4.15 prezintă inversul diametrului cercului admitanțelor, deci valorile rezistenței R_m . Se poate observa că rezistența R_m , în trecerea de la starea “-“ la starea “+” crește în mod apreciabil și după 10^4 minute atinge 210Ω . După schimbarea stării de polarizare axială (“+” trece în “-“) și la capătul unei săptămâni, valoarea lui R_m scade la 200Ω , valoare aproximativă obținută în procesul invers. Schimbarea frecvenței de rezonanță a transductorilor compuse a fost aproximativ de $\pm 4\%$ față de valoarea inițială. Figura 4.15 reprezintă variația factorului Q_m . Forma sa amintește de cea a lui R_m , din figura 4.14. Factorul Q_m descrește la trecerea de la “-“

la “+” datorită efectului sarcinii acustice a polarizării mecanice în timp ce în procesul invers de trecere de la “+” la “-”, Q_m prezintă o creștere foarte rapidă (fig 4.16).

Variația k_t , între cele două procese de tensionare și detensionare, într-un timp de două luni este dată de relația:

$$\frac{k_t'^2}{1+k_t'} = \frac{a}{a+1} \frac{k_t^2}{1+k_t}, \quad (4.90)$$

unde: k_t' și k_t reprezintă coeficienții de cuplaj cu polarizare și fără polarizare mecanică și unde a este o constantă legată de complianța elementului ceramic și a șurubului de polarizare mecanică.

Starea de polarizare mecanică influențează considerabil comportarea electroacustică a transductorului, care este la rândul său funcție de timpul scurs de la schimbarea stării de polarizare, precum și de valoarea polarizării mecanice.

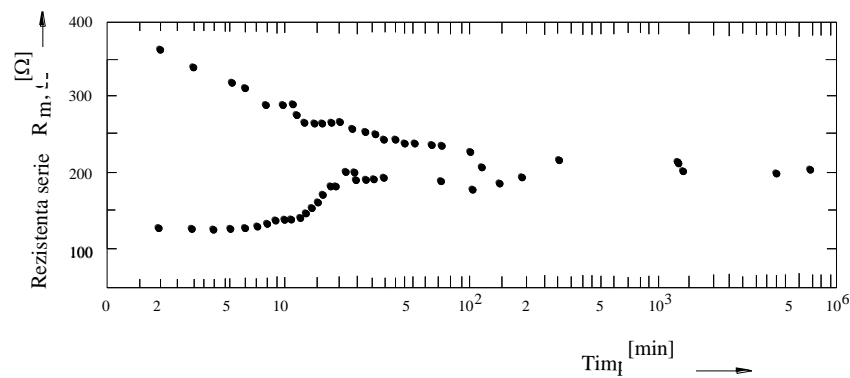


Fig.4.15. Variația rezistenței serie R_m , cu timpul scurs de la schimbarea stării de polarizare mecanică axială.

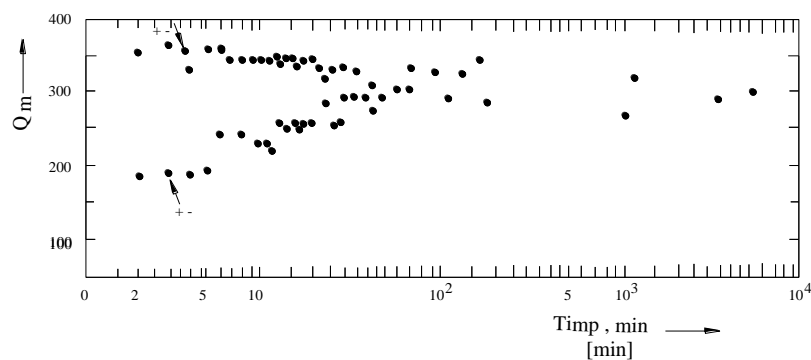


Fig. 4.16. Variația factorului de calitate mecanică Q_m , cu timpul scurs de la schimbarea stării de polarizare mecanică axială.

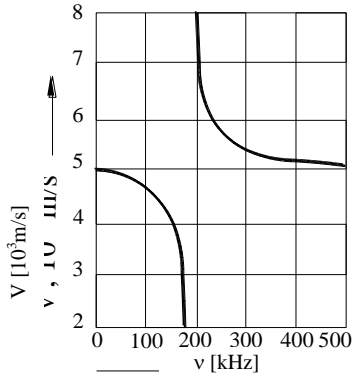


Fig. 4.17. Dispersia geometrică a undelor longitudinale într-o bară de nichel de lungime 100 mm, diametrul exterior 8,6 mm și diametrul interior 8,3 mm.

Acordarea pe aceeași frecvență a unui ansamblu de transductoare dintr-o rețea este practic realizabilă cu ajutorul polarizării mecanice adecvate (în limita unor abateri mici).

Corectarea unor variații mari nu este recomandabilă deoarece antrenează variații mari ale altor parametri.

În proiectarea transductoarelor piezoceramice în scopul obținerii rezonanței la o anumită frecvență se observă că utilizarea rezultatelor modelului matematic simplificat conduce la abateri mari de frecvență, ceea ce se poate explica prin utilizarea aproximației de undă longitudinală fără a se lua în considerare existența cuplajului transversal, atât în cazul elementelor piezoceramice simple cât și în cazul transductoarelor compuse, atât în elementele active cât și în cele pasive. Pentru lungimea de undă a vibrațiilor mult mai mare decât dimensiunile secțiunii transversale, în cazul propagării vibrațiilor, printr-o bară, viteza undelor elastice în bară v_{long} este dată de relația binecunoscută:

$$v_{long} = \sqrt{Y/\rho} \quad , \quad (4.91)$$

Când lungimea de undă este mult mai mică decât diametrul barei, aceasta se comportă ca un mediu solid nelimitat și viteza undelor elastice v_v va fi:

$$v_v = \frac{\sqrt{E(1-\sigma)}}{\sqrt{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad , \quad (4.92)$$

unde: σ este coeficientul Poisson, iar v_v se mai numește și viteza undelor volumice.

Experiența a arătat că în cazul lungimilor de undă comparabile cu dimensiunile secțiunii transversale a barei există un domeniu de dispersie, în care viteza undelor longitudinale depinde de lungimea de undă.

În figura 4.17 este prezentată viteza de propagare a undelor longitudinale într-o bară de nichel. Se observă că în banda de frecvență 150 - 250 kHz, când lungimea de undă este comparabilă cu diametrul barei, apare dispersia vibrațiilor (numită dispersie geometrică, pentru că nu se datorește structurii interne a materialului ci unor factori geometrici).

Pentru propagarea undelor longitudinale într-o bară infinit de lungă, ecuația de frecvență este:

$$2\mu \frac{\partial^2 J_0(ha)}{\partial a^2} = \frac{p^2 \rho \wedge}{\wedge + 2\mu} J_0(ha) \quad 2\mu k \frac{\partial J_1(\gamma a)}{\partial a} = 0 \quad , \quad (4.93)$$

$$2k \frac{\partial J_0(ha)}{\partial a} \quad 2k^2 \frac{\omega^2 \rho}{\mu} J_0(\gamma a)$$

care, prin anumite substituții și calcule, se reduce la ecuația:

$$(x-1)^2 \varphi(ha) - (\beta x - 1)[x - \varphi(\gamma a)] = 0, \quad (4.94)$$

În ecuațiile (4.93) și (4.94) semnificația mărimilor este următoarea:

λ, μ sunt constantele Lamé;

ω – frecvența unghiulară;

$\beta = (1 - 2\sigma)/(1 - \sigma)$;

σ - coeficientul Poisson;

$x = (v/v_{long})^2 (1 + \sigma)$;

λ - lungimea de undă;

a - raza barei;

v_{long} - viteza ultrasunetului în bară;

v - viteza undei;

$$h = k\sqrt{\beta x - 1}; \quad \gamma = k\sqrt{2x - 1}; \quad k = 2\pi/\lambda; \quad \varphi(y) = yJ_0(y)/J_1(y), \quad (4.95)$$

Ecuația (4.94) este de forma:

$$F(x, \beta, ka) = 0, \quad (4.96)$$

Proprietățile funcției $\varphi(y)$ sunt:

$$\varphi(y) = \varphi(-y), \quad \varphi(0) = 2, \quad \lim_{y \rightarrow \infty} (iy) = y, \quad (4.97)$$

Punctele de zero și polii funcției φ corespund cu cele ale funcțiilor J_0 , respectiv J_1 .

Presupunând că (4.94) se poate rezolva explicit pentru x , se poate exprima x , în forma:

$$x = x(\beta, ka), \quad (4.98)$$

care reprezintă o familie de suprafețe. Dintre aceste suprafețe cea mai importantă este prima suprafață, corespunzătoare propagării obișnuite a undelor longitudinale. Variabila dependentă este v/v_{long} , iar variabilele independente sunt σ și $2a/\lambda$.

În figura 4.18 curbele v/v_{long} sunt reprezentate funcție de raportul $2a/\lambda$, pentru diferite valori ale lui σ .

Examinarea datelor experimentale a arătat existența câtorva tipuri de vibrații într-o bară concomitent sau excluzând modul longitudinal. Aceasta sugerează extensia tratării teoretice la moduri superioare de vibrație, pentru a obține curbele de dispersie pentru undele elastice asociate. Astfel de calcule sunt extrem de uzuale pentru studiul stabilității și interacției diferitelor moduri de vibrație.

Figura 4.19. prezintă curbele de dispersie ale modurilor longitudinale și de încovoiere pentru diferite valori ale coeficientului Poisson. Modurile de vibrație de încovoiere prezintă de asemenea o dispersie asemănătoare.

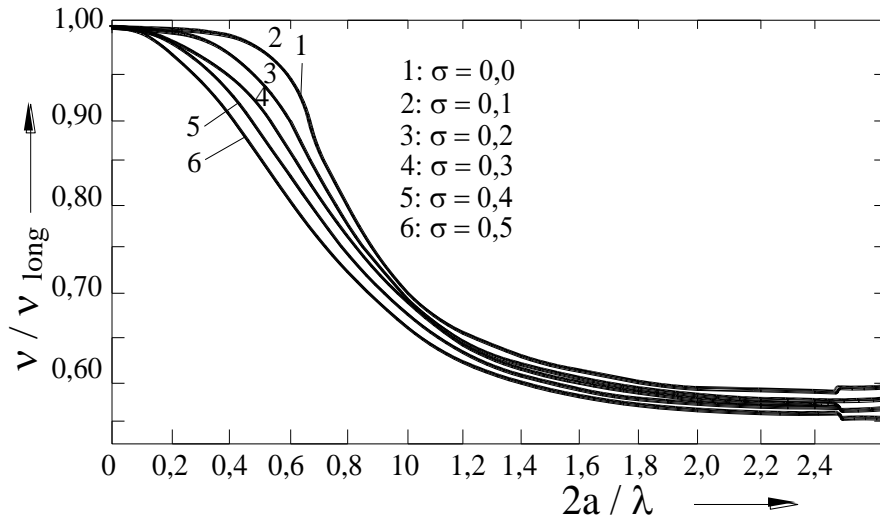


Fig. 4.18. Dependența coeficientului v/v_{long} , de mărimea $2a/\lambda$, pentru diferite valori ale raportului Poisson σ .

În mediile solide se pot propaga patru tipuri fundamentale de unde, fiecare dintre ele având viteze diferite. Viteza cea mai mare este viteza undelor volumice v_v , apoi viteza undelor longitudinale într-o bară subțire la frecvențe joase v_{long} (lungimea de undă mult mai mare decât diametrul). Undele de forfecare se propagă cu o viteză și mai joasă v_s . Vitezele cele mai mici sunt asociate cu undele de încovoiere. Atât undele longitudinale cât și cele de încovoiere în bare și plăci sunt dispersive. Când frecvența crește valorile vitezelor longitudinale și de încovoiere se apropie asimptotic de valoarea vitezei undelor de forfecare.

În această regiune de tranziție există un cuplaj între diferitele tipuri de mișcări: de forfecare, de compresie și de deplasări transversale. Relațiile tensiune – deformație, în această regiune sunt foarte complicat de exprimat mai ales pentru corpuri anizotrope. Totuși în general este posibil să se exprime elasticitatea efectivă pentru orice tip de undă.

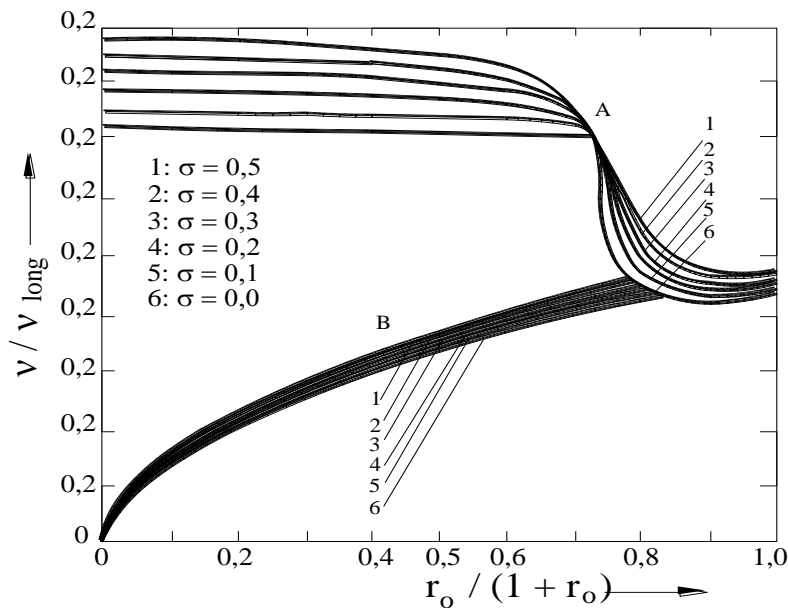


Fig. 4.19. Curbele teoretice de dispersie a undelor longitudinale A și de încovoiere B

Astfel, modurile fundamentale ale vibrațiilor tridimensionale cuplate, ale diferitelor transductoare ultrasonice piezoceramice inclusiv bare cu secțiuni rectangulare, plăci rectangulare, cilindru plin și cilindru gol, transductor piezoceramic compus se pot analiza utilizând metoda elasticității aparente (alte metode utilizate pentru analiză sunt: metoda diferențelor finite, metoda elementelor finite și metoda variațională Ritz).

Prin această metodă se obțin formule analitice simple pentru frecvențele de rezonanță, calculându-se constantele de frecvență ale vibrațiilor funcție de dimensiunile geometrice ale vibratoarelor. S-a obținut astfel forma dispersiei de frecvență pentru viteza de fază a undelor longitudinale în cilindri finiți care este prezentată comparativ cu cea dată pentru cilindri infiniți.

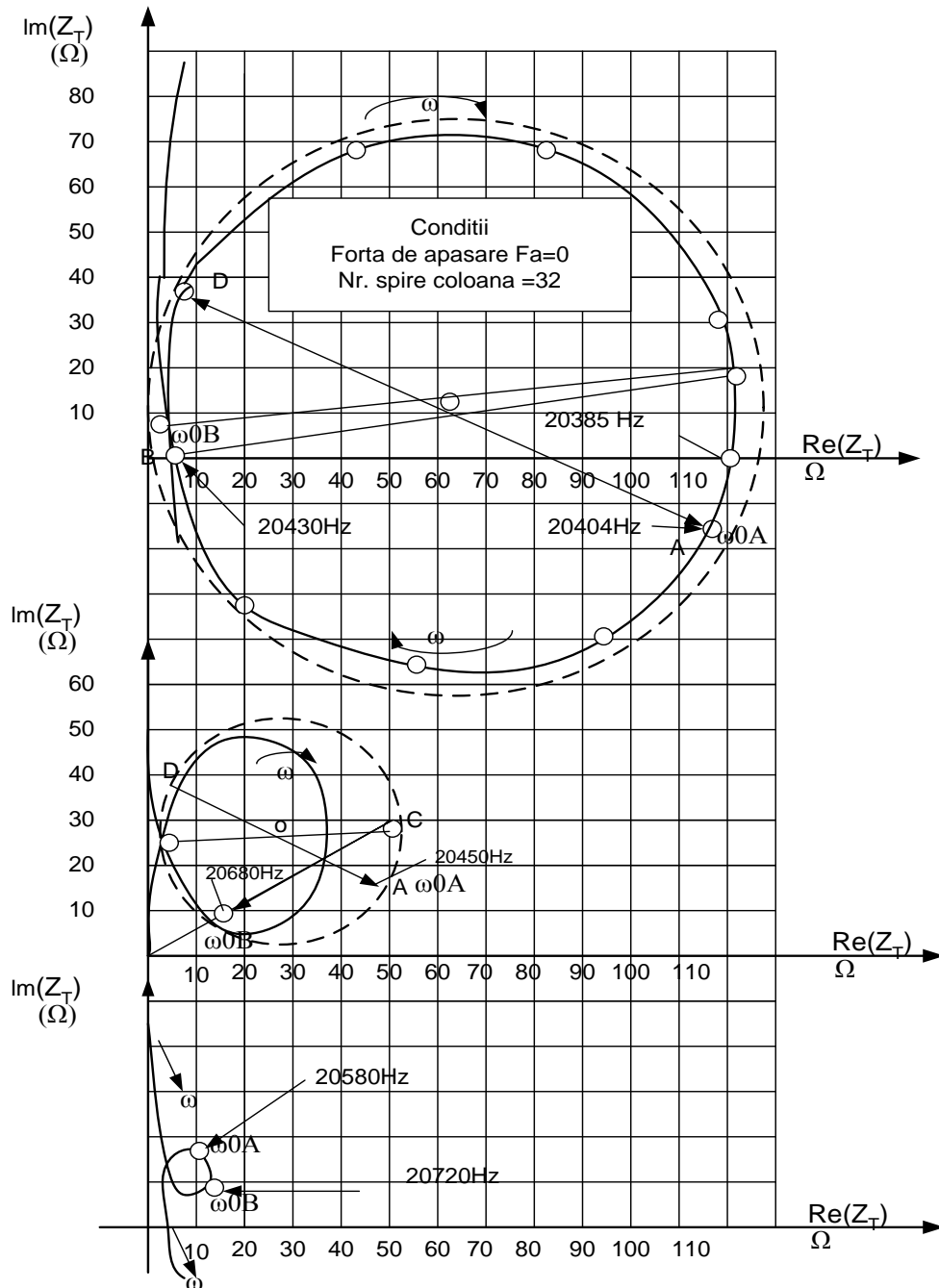


Fig. 4.20. Modul de variație al impedanței „ Z_T ”, pentru ansamblul transductor concentrator al sistemului ultraacustic folosit în experimentări.

Astfel, pentru o bară rectangulară de dimensiuni L , W , T , cu $L \gg T$ și $L \gg W$, ecuațiile de elasticitate se scriu sub forma:

$$S_y = s_{11}^E T_x + s_{12}^E T_y + s_{13}^E T_z \quad S_z = s_{21}^E T_x + s_{22}^E T_y + s_{23}^E T_z \quad , \quad (4.99)$$

$$0 = S_{11}^E T_x + s_{12}^E T_y + s_{13}^E T_z \quad ,$$

Folosind notațiile:

$$v_{12} = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}; \quad v_{13} = -\frac{s_{13}^E}{s_{11}^E}; \quad v_{32} = -\frac{s_{13}^E}{s_{33}^E}; \quad n = -\frac{T_z}{T_y} \quad , \quad (4.100)$$

ecuațiile (4.99) se scriu sub forma:

$$S_y = s_{11}^E \left[(1 - v_{12}^2) + v_{13}(1 + v_{12})n \right] T_y \quad ,$$

$$S_z = s_{33}^E \left[(1 - v_{31}v_{13}) + \frac{v_{31}(1 + v_{12})}{n} \right] T_z \quad (4.101)$$

iar modulele de elasticitate Y_y și Y_z sunt:

$$Y_y = \left\{ s_{11}^E \left[(1 - v_{12}^2) + v_{13}(1 + v_{12})n \right] \right\}^{-1} \quad , \quad (4.102)$$

$$Y_z = \left\{ s_{33}^E \left[(1 - v_{13}v_{31}) + \frac{v_{31}(1 + v_{12})}{n} \right] \right\}^{-1} \quad , \quad (4.103)$$

Condițiile de rezonanță a vibrațiilor pe dimensiunile secundare sunt date de expresiile:

$$k_y W = \pi; \quad k_z T = \pi \quad , \quad (4.104)$$

deci:
$$k_{oy} W = \pi \left[(1 - v_{12}^2) + v_{13}(1 + v_{12})n \right]^{\frac{1}{2}} \quad , \quad (4.105)$$

$$k_{oz} T = \pi \left[(1 - v_{13}v_{31}) + \frac{v_{31}(1 + v_{12})}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad , \quad (4.106)$$

unde:

$$k_y = \frac{\omega_0}{v_y}; \quad k_z = \frac{\omega_0}{v_z}; \quad v_y = \sqrt{\frac{Y_y}{\rho}}; \quad v_z = \sqrt{\frac{Y_z}{\rho}} \quad , \quad (4.107)$$

$$k_{oy} = \omega_0 \sqrt{\rho s_{11}^E} \quad k_{oz} = \omega_0 \sqrt{\rho s_{33}^E}; \quad \omega_0 = 2\pi f_0 \quad , \quad (4.108)$$

iar f_0 este frecvența de rezonanță.

Din relațiile (4.105) și (4.106) se obține expresia:

$$\frac{W}{T} = \sqrt{\frac{s_{33}^E}{s_{11}^E} \cdot \frac{(1 - \nu_{13}\nu_{31}) + \nu_{31}\left(1 + \frac{\nu_{12}}{n}\right)}{(1 - \nu_{12})^2 + \nu_{13}(1 + \nu_{12})n}} , \quad (4.109)$$

În cazul plăcii rectangulare, când tensiunea $T_z = 0$, se obține:

$$Y_x = \left[s_{11}^E \left(1 + \frac{\nu_{12}}{n} \right) \right]^{-1} ; \quad Y_y = \left[s_{11}^E (1 + \nu_{12}n) \right]^{-1} , \quad (4.110)$$

și

$$k_{0x}L = \pi \left(1 + \frac{\nu_{12}}{n} \right)^{\frac{1}{2}} ; \quad k_{0y}W = \pi (1 + \nu_{12}n)^{\frac{1}{2}} , \quad (4.111)$$

unde:

$$k_x = \frac{\omega_0}{\nu_x} ; \quad k_y = \frac{\omega_0}{\nu_y} ; \quad \nu_x = \sqrt{\frac{Y_x}{\rho}} ; \quad \nu_y = \sqrt{\frac{Y_y}{\rho}} , \quad (4.112)$$

$$k_{0x} = k_{0y} = \omega_0 \sqrt{\rho s_{11}^E} , \quad (4.113)$$

Din relațiile (4.111) se obține expresia:

$$\frac{W}{L} = \sqrt{\frac{1 + \frac{\nu_{12}}{n}}{1 + \nu_{12}n}} , \quad (4.114)$$

În cazul cilindrului plin finit, de dimensiuni $2l$ (l fiind lungimea) și $2a$ (a fiind diametrul) – cazul cel mai des întâlnit la filtrarea cu ultrasunete, ecuațiile de elasticitate în coordonate cilindrice sunt de forma:

$$\begin{aligned} S_z &= s_{13}^E T_r + s_{13}^E T_\theta + s_{33}^E T_z \\ S_r &= s_{11}^E T_r + s_{12}^E T_\theta + s_{13}^E T_z , \\ S_\theta &= s_{12}^E T_r + s_{11}^E T_\theta + s_{13}^E T_z \end{aligned} \quad (4.115)$$

În condiția de simetrie cilindrică $T_r = T_\theta$ și cu notația:

$$\frac{T_z}{T_r} = \frac{T_z}{T_\theta} = -n , \quad (4.116)$$

modulele de elasticitate se pot scrie sub forma:

$$Y_z = \left[s_{33}^E \left(1 + \frac{2\nu_{31}}{n} \right) \right]^{-1} ; \quad Y_r = s_{33}^E \left[(1 - \nu_{12}^2) + \nu_{13}(1 + \nu_{12}n) \right]^{-1} , \quad (4.117)$$

Punând condiția la rezonanță longitudinală se obține:

$$k_{0z} \cdot l = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{2v_{31}}{n} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.118)$$

iar condiția de rezonanță radială devine:

$$k_r a J_0(k_r a) = (1 - v_{12}) J_1(k_r a), \quad (4.119)$$

unde: $k_{0z} = \omega_0 \sqrt{\rho s_{33}^E}$

Dacă se face notația:

$$k_r \cdot a = R_1, \quad (4.120)$$

relația (4.119) devine:

$$k_{0r} \cdot a = R_1 (1 - v_{12}^2) + n v_{13} (1 + v_{12})^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.121)$$

În aceste relații s-a mai notat:

$$k_r = \frac{\omega_0}{\sqrt{Y_r / \rho}}; \quad k_{0r} = \omega_0 \sqrt{\rho s_{11}^E}, \quad (4.122)$$

Făcând raportul relațiilor (4.118) și (4.121) se obține expresia:

$$\frac{l}{a} = \frac{\pi}{2R_1} \cdot \sqrt{\frac{s_{11}^E}{s_{13}^E} \cdot \frac{(1 - v_{12}^2) + n v_{13} (1 + v_{12})}{1 + 2v_{13} / n}}, \quad (4.123)$$

raport extrem de important în dimensionarea oricărui element activ final al unui sistem ultraacustic folosit în construcția filtrelor ultrasonice.

În cazul unui cilindru gol de lungime $2l$, diametrul exterior a și diametrul interior b , modulele de elasticitate sunt:

$$Y_z \left[s_{33}^E \left(1 + 2 \frac{v_{31}}{n} \right) \right]^{-1}; \quad Y_r = \left\{ s_{11}^E \left[(1 - v_{12}^2) + v_{13} (1 + v_{12}) n \right] \right\}^{-1}, \quad (4.124)$$

Rezonanța longitudinală se obține pentru condiția:

$$k_{0z} \cdot l = \frac{\pi}{2} \left(1 + 2 \frac{v_{31}}{n} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.125)$$

unde:

$$k_{0z} = \omega_0 \sqrt{\rho s_{33}^E}, \quad (4.126)$$

Condiția de rezonanță radială se scrie sub forma:

$$\frac{k_r a N_0(k_r a) - (1 - v_{12}) N_1(k_r a)}{k_r a J_0(k_r a) - (1 - v_{12}) J_1(k_r a)} = \frac{k_r b N_0(k_r b) - (1 - v_{12}) N_1(k_r b)}{k_r b J_0(k_r b) - (1 - v_{12}) J_1(k_r b)}, \quad (4.127)$$

unde: J_n sunt funcțiile Bessel; N_n – funcțiile Newmann ($n=1, 2, \dots$)

Cu notațiile:

$$k_r a = R_1; \quad k_r = \frac{\omega_0}{v}; \quad \omega_0 = 2\pi f_0, \quad (4.128)$$

Din ecuația (4.127) se obține valoarea vitezei v , dată de expresia:

$$v = \left\{ \rho s_{11}^E \left[(1 - v_{12}^2) + v_{13}(1 + v_{12})n \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (4.129)$$

iar din relația (4.125) se obține raportul:

$$\frac{2l}{a} = \frac{\pi}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{s_{11}^E \cdot \left[(1 - v_{12}^2) + v_{13}(1 + v_{12})n \right]}}{\sqrt{s_{33}^E} \cdot \left[1 + 2v_{31}/n \right]}, \quad (4.130)$$

În cazul simetriei cilindrice, caracterizată prin egalitățile:

$$v_{12} = v_{13} = v_{31} = v; \quad s_{11}^E = s_{33}^E = \frac{1}{Y}, \quad (4.131)$$

modulele de elasticitate aparente devin:

$$Y_z = \frac{Y}{\sqrt{1 + 2v/n}}; \quad Y_r = \frac{Y}{(1 - v^2) + v(1 + v)n}, \quad (4.132)$$

iar condiția de rezonanță longitudinală se scrie sub forma:

$$k_{0z} \cdot l = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{2v}{n} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.133)$$

unde:

$$k_{0z} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho}{Y}}; \quad k_r = \frac{\omega_0}{v}; \quad \omega_0 = 2\pi f_0, \quad (4.134)$$

și viteza v are expresia:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho \left[(1 - v^2) + v(1 + v)n \right]}}, \quad (4.135)$$

În cazul transductorului piezoelectric compus simetric (fig. 4.21) format din două discuri piezoelectrice de diametre $2 a_1$, înălțimea h_p și impedanța acustică caracteristică $\rho_1 \cdot v_1 \cdot s_1$ și două elemente metalice identice pasive de înălțime h , diametru $2 a_2$ și impedanță acustică caracteristică $\rho_2 \cdot v_2 \cdot s_2$, modulele de elasticitate efectivă, pentru capetele de metal Y_z^m și Y_r^m au expresiile:

$$Y_z^m = \left[\frac{1}{Y} \left(1 + \frac{2v}{n_1} \right) \right]^{-1}, \quad (4.136)$$

$$Y_r^m = \left[\frac{1}{Y} (1 - v^2) + v(1 + v)n_1 \right]^{-1}, \quad (4.137)$$

unde : Y este modulul Young; ν - coeficientul Poisson, iar n_1 este dat de relația:

$$n_1 = -\frac{T_z}{T_r} = -\frac{T_z}{T_\theta}, \quad (4.138)$$

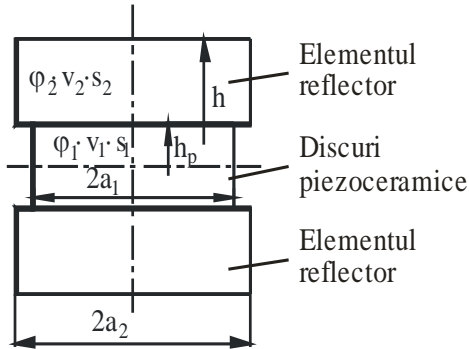


Fig.4.21. Traductor piezoceramic compus simetric.

Pentru discurile piezoceramice se obține:

$$Y_z = \left[s_{33}^E \left(1 + \frac{2\nu_{31}}{n} \right) \right]^{-1}, \quad (4.139)$$

$$Y_r = \left\{ s_{11}^E (1 - \nu_{12}^2) + \nu_{13} (1 + \nu_{12}) n_2 \right\}^{-1}, \quad (4.140)$$

unde ν_{12} este coeficientul Poisson și are expresia:

$$\nu_{12} = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}, \quad (4.141)$$

iar

$$\nu_{13} = -\frac{s_{13}^E}{s_{11}^E}; \quad \nu_{31} = -\frac{s_{13}^E}{s_{33}^E}; \quad n_2 = -\frac{T_z}{T_r} = -\frac{T_z}{T_\theta}, \quad (4.142)$$

Condiția de rezonanță pentru elementele pasive este:

$$k_r^m a_2 J_0(k_r^m a_2) = (1 - \nu) J_1(k_r^m a_2), \quad (4.143)$$

unde:

$$k_r^m = \omega_0 \sqrt{\rho_2 / Y_r^m}; \quad \omega_0 = 2\pi f_0, \quad (4.144)$$

Din relațiile (4.143) se obține expresia:

$$\omega_0 a_2 \sqrt{\frac{\rho_2}{Y}} = R_1^m (1 - \nu^2) + n_1 \nu (1 + \nu)^{-\frac{1}{2}}, \quad (4.145)$$

unde R_1^m este prima rădăcină a ecuației (4.143).

Condiția de rezonanță pentru elementele piezoceramice este de forma:

$$k_r a_1 J_0(k_r a_1) = (1 - \nu_{12}) J_1(k_r a_1), \quad (4.146)$$

unde:

$$k_r = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho_1}{Y}} \quad , \quad (4.147)$$

Din relațiile (4.146) se obține egalitatea:

$$\omega_0 a_1 \sqrt{\rho_1 s_{11}^E} = R_1 \left\{ (1 - v_{12}^2) + n_2 v_{13} (1 + v_{12}) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad , \quad (4.148)$$

Condiția de rezonanță pentru traductorul compus devine:

$$tg(k_1 l_1) tg(k_2 l_2) = \frac{\rho_1 v_1 S_1}{\rho_2 v_2 S_2} \quad , \quad (4.149)$$

unde s-a notat:

$$k_1 = \frac{\omega_0}{v_1}; \quad v_1 = \sqrt{\frac{Y_z}{\rho_1}}; \quad k_2 = \frac{\omega_0}{v_2}; \quad v_2 = \sqrt{\frac{Y^m}{\rho}} \quad , \quad (4.150)$$

iar l_1 , l_2 , S_1 și S_2 sunt dimensiunile ceramicii, respectiv ale elementelor pasive.

Condiția de rezonanță (4.149) se mai poate scrie și sub forma:

$$tg(k_1 y_0 h) tg[k(1 - y_0)h] = \frac{\rho_1 v_1 a_1^2}{\rho_2 v_2 a_2^2} \quad , \quad (4.151)$$

Experimental se constată că deși subansamblul ceramică - reflector transmite numai oscilații longitudinale elementului radiant, în acesta apar atât oscilații longitudinale cât și transversale datorită cuplajului existent într-un mediu solid. Aceste oscilații conform legii generalizate Hooke, se propagă independent iar impedanța caracteristică a elementului radiant este o sumă a impedanțelor caracteristice corespunzătoare fiecărui tip de radiații generate.

4.5. CONTRIBUTII PRIVIND ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A UNUI SISTEM ULTRAACUSTIC FOLOSIT LA FILTRAREA CU ULTRASUNETE A GAZELOR NATURALE

4.5.1. Considerații tehnice

Sistemul ultraacustic este subansamblul cel mai important al unei instalații de prelucrat cu ultrasunete deoarece el realizează parametrii acustici (intensitatea acustică, densitatea de energie acustică, amplitudinea de oscilație, tipul de undă, frecvența oscilațiilor) și parametrii mecanici (presiunea statică de apăsare și forța de presare).

Sistemul ultraacustic folosit la filtrarea cu ultrasunete este format dintr-un ansamblu piezoceramic, elementul intermediar, concentratorul de energie ultrasonică și partea activă (fig.4.21), cea care vine în contact cu elementul filtrant sau este chiar elementul filtrant.

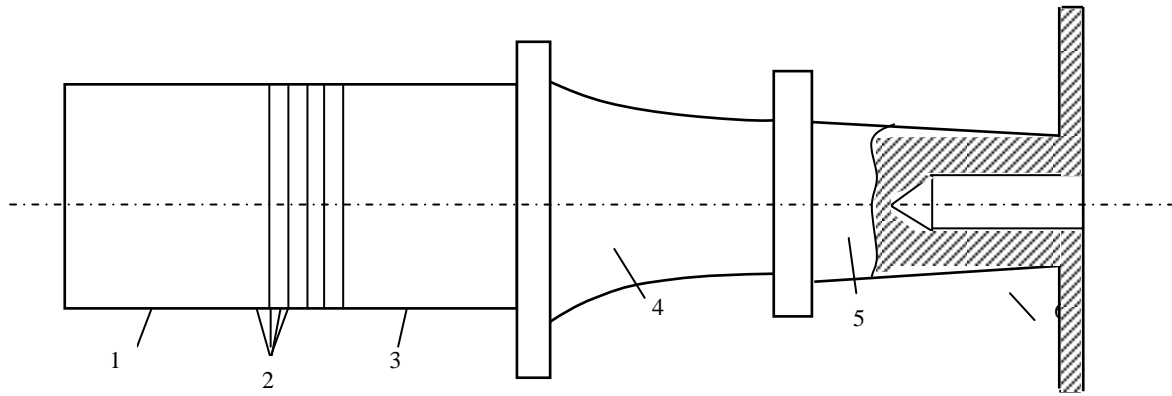


Fig. 4.21. Sistem ultraacustic folosit la filtrarea gazelor naturale:
1-reflector, 2-pastile piezoceramice, 3-difuzor sau radiant; 4 - element intermediar ; 5 – concentrator; 6- element activ

Ansamblul piezoceramic, acordat pe frecvența de 20 KHz, generează oscilațiile ultrasonice (preponderent longitudinale).

Concentratorul de energie ultrasonică este cuplat cu ansamblul piezoceramic prin intermediul unui element intermediar și cu elementul activ.

Element intermediar este un element al sistemului ultraacustic care se interpune între transductor și concentrator și crește mecanic cu un anumit factor amplitudinea vibrației transmisă concentratorului în limita suportată de transductor.

Concentratorul de energie ultrasonică este dimensionat, ținând cont de proprietățile de material, astfel încât lungimea lui să fie corespunzătoare unei semilungimi de undă și să lucreze în regim de rezonanță. Rolul concentratorului de energie ultrasonică este de a amplifica oscilațiile și de a conduce energia ultrasonică în zona de lucru.

Pentru a lucra cu un randament bun, concentratorul trebuie acordat cu o aproximație de câteva perioade cu frecvența cu care este calculat transductorul ultrasonor, deci întregul sistem oscilant care trebuie să lucreze în regim de rezonanță pentru ca amplitudinea vitezei particulei la partea activă să fie cât mai mare și deci și intensitatea acustică să fie mare.

La fabricare, trebuie efectuate operații de ajustare a concentratorului astfel încât întregul ansamblu ultrasonor să oscileze pe frecvența de rezonanță a ansamblului piezoceramic.

Dimensiunile geometrice ale sistemului ultraacustic folosit la construcția unui filtru cu ultrasunete sunt reprezentate în figura 4.22, iar ale unui sistem ultraacustic folosit la construcția unui filtru conic, în figura 4.23.

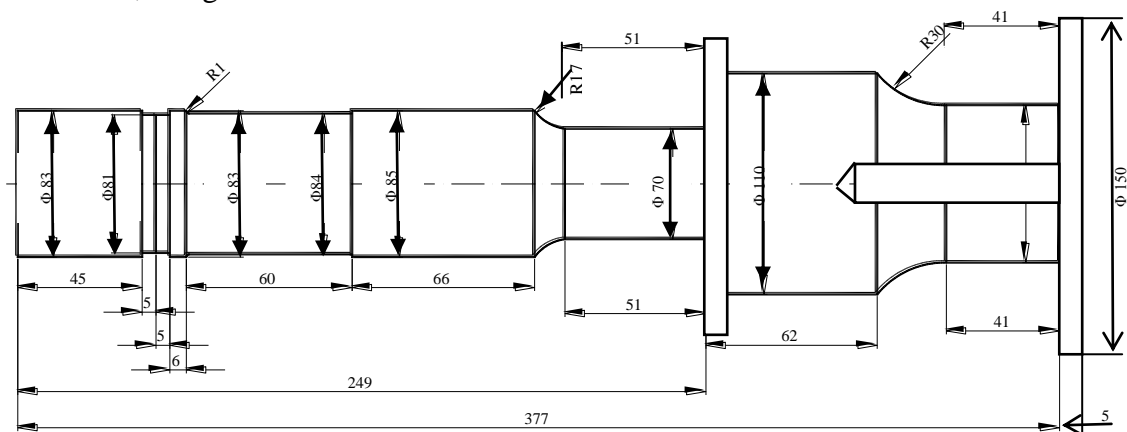


Fig. 4.22. Dimensiunile geometrice ale sistemului ultraacustic folosit la construcția unui filtru vertical pentru gaze naturale.

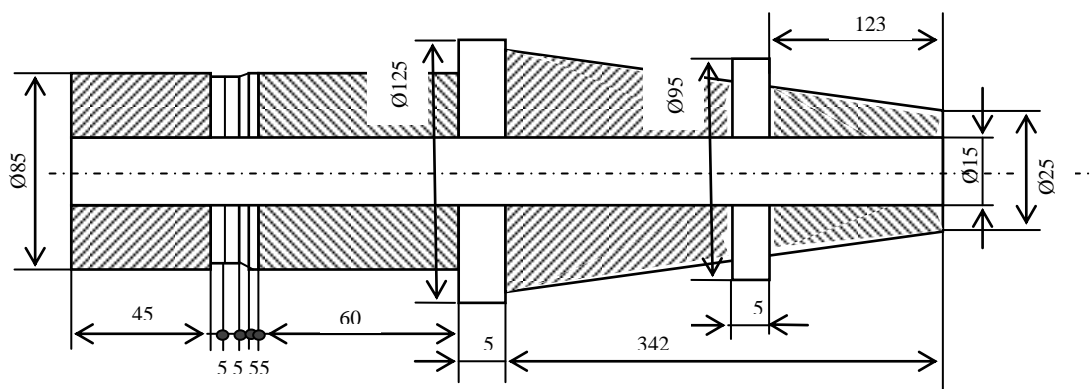


Fig. 4.23. Dimensiunile geometrice ale unui sistem ultraacustic folosit la construcția unui filtru conic pentru gaze naturale.

Calculul și dimensionarea sistemului se face în așa fel încât să lucreze în regim de rezonanță ținând cont și de toți parametrii tehnologici ai filtrării de aceea, modelarea sistemului ultraacustic este o problemă deosebit de dificilă și necesară în același timp.

În urma analizei diferitelor metode de modelare s-a ajuns la concluzia că modelarea prin metoda elementelor finite folosind pachetul ANSYS este cea mai recomandată.

Din cauza complexității prea mari a unui astfel de ansamblu, analiza prin metoda elementelor finite se va efectua separat pentru fiecare parte componentă.

Rezultatele analizei ansamblului piezoceramic se vor constitui în date de intrare pentru efectuarea analizei concentratorului de energie ultrasonică.

4.5.2. Modelarea cu elemente finite a piezoelementelor

Elementele active ale sistemului ultraacustic sunt pastilele piezoceramice din PZT4 cu dimensiuni geometrice prezentate în figura 4.24.

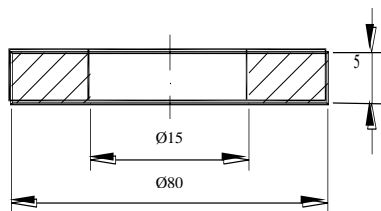


Fig. 4.24. Dimensiunile geometrice ale elementului piezoceramic.

Proprietățile de material ale piezoelementelor sunt înțelese de ANSYS ca trei matrici: dielectrică, piezoelectrică și de elasticitate.

Valorile conținute în aceste matrici sunt luate din cataloagele puse la dispoziție de firmele producătoare de materiale piezoceramice.

În cazul concret al materialului PZT4 liniile de program care conțin matricile cu valorile corespunzătoare parametrilor dielectrici, piezoelectrici și de elasticitate sunt:

```

MP,DENS,1,7800           ! Densitatea materialului
!*
MP,PERX,1,22.6E-9       ! Matricea dielectrică
MP,PERY,1,22.6E-9
MP,PERZ,1,33.6E-9
!*
TB,PIEZ,1               ! Matricea piezoelectrică
TBDATA,3,-14.8
TBDATA,6,-14.8
TBDATA,9,21.6
TBDATA,11,19.8
TBDATA,13,19.8
!*
TB,ANEL,1               ! Matricea de elasticitate
TBDATA,1,6.0E10,-0.17E10,-0.13E10
TBDATA,7,6.0E10,-0.13E10
TBDATA,12,5.32E10
TBDATA,16,2.6E10
TBDATA,19,2.6E10
TBDATA,21,2.2E10

```

Se activează din meniul principal PREPROCESORUL în care se generează geometria volumelor. Din meniul principal se optează pentru tipul de analiză structurală și magnetic nodală care condiționează și apelarea librăriilor cu elementele de discretizare.

Discretizarea (fig.4.25).se face cu elementul SOLID98 (3-D cu 10 noduri tetraedral solid).

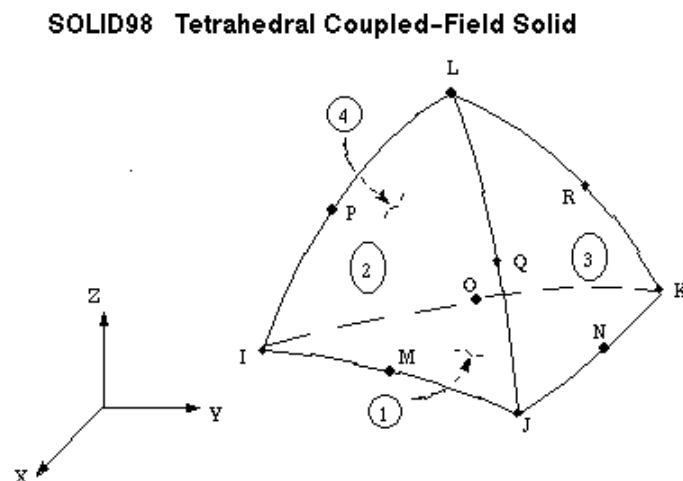


Fig. 4.25. Elementul SOLID98.

În figura 4.26 sunt reprezentate volumele a două pastile piezoceramice cuplate cu senzori de polarizare opuse. Ariile comune se constituie în plan nodal (oscilație zero). Se efectuează operația de lipire a celor două volume.

În figura 4.27 este prezentată discretizarea pastilelor cu elementul de discretizare ales anterior.

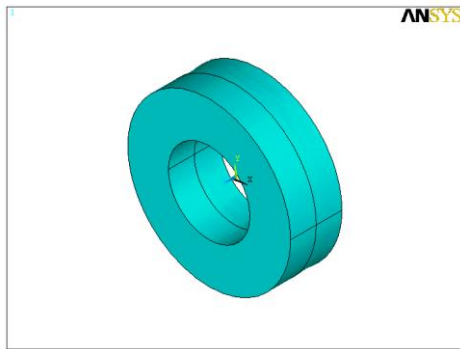


Fig. 4.26. Geometria volumelor a două pastile piezoceramice cuplate.

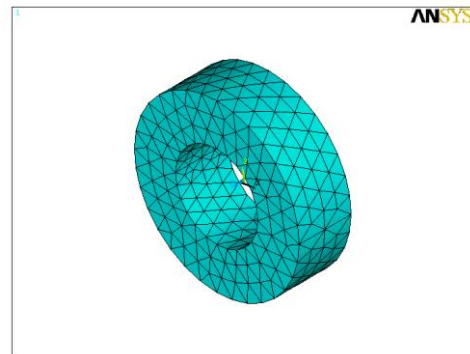


Fig. 4.27. Discretizarea cu elemente finite a volumelor pastilelor piezoceramice.

Respectând realitatea fizică, nodurilor plasate în ariile comune ale volumelor le sunt preluate toate gradele de libertate, simbolurile corespunzătoare fiind reprezentate în figura 4.28.

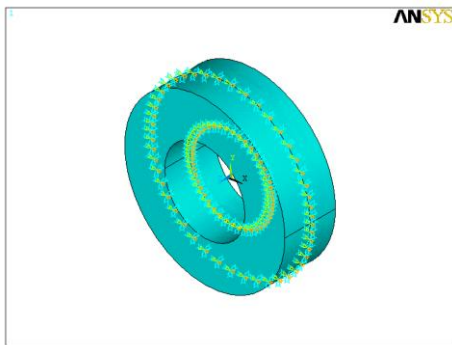


Fig. 4.28. Încăstrările nodurilor din planul nodal.

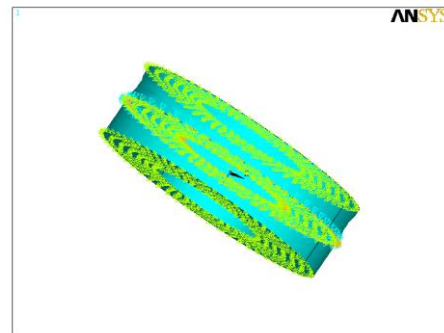


Fig. 4.29. Aplicarea încărcărilor tip tensiune electrică.

Sursa de putere (generatorul de semnal ultrasonic) aduce pe electrozii plasați normal pe direcția de polarizare ale pastilelor piezoceramice sarcini electrice în frecvența necesară intrării într-un regim de rezonanță a ansamblului piezoceramic.

În figura 4.29 sunt reprezentate simbolurile corespunzătoare sarcinilor electrice aplicate în nodurile aflate în ariile pe care sunt depuși electrozii cu valori cuprinse în intervalul permis (0 ... 2000 V).

După activarea procesorului “SOLUTION” se optează pentru tipul de analiză statică. Rezultatele calculelor efectuate de acesta se vizualizează apelând POSTPROCESORUL GENERAL. De interes sunt stările deformată și nedeformată ale structurilor studiate. Acestea pot fi reprezentate prin setările interfeței grafice în diverse poziții și în animație. Fiecare reprezentare a stărilor obținute este însoțită de o legendă conținând plaje de valori ale deformatiei.

În figura 4.30 este reprezentată deformată și nedeformată ansamblului celor două pastile piezoceramice în poziție frontală iar în figura 4.31 același lucru în izometrie pentru situația în care pe electrozii exteriori apar sarcini pozitive și în planul nodal masa.

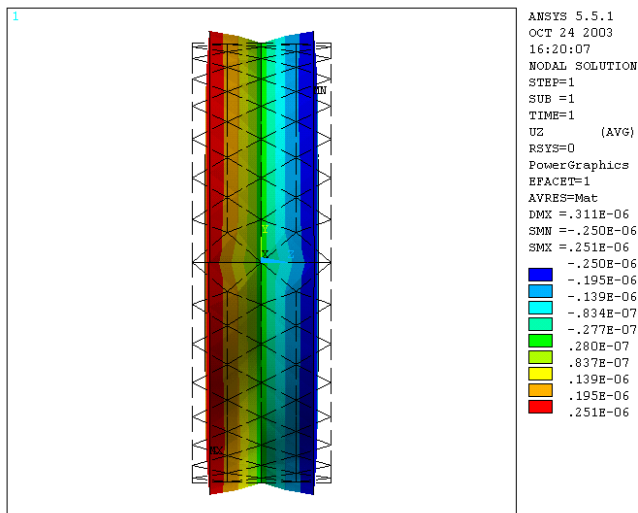


Fig. 4.30. *Reprezentarea frontală a deformatiei/nedeformatiei pentru sarcini pozitive.*

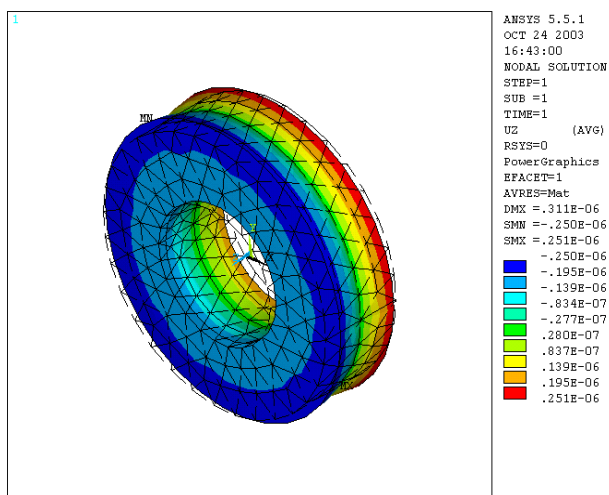


Fig. 4.31. *Reprezentarea izometrică a deformatiei/nedeformatiei pentru sarcini pozitive.*

În figura 4.32 este reprezentată deformată și nedeformată ansamblului celor două pastile piezoceramice în poziție frontală iar în figura 4.33 același lucru în izometrie pentru situația în care pe electrozii exteriori apar sarcini negative și în planul nodal masa.

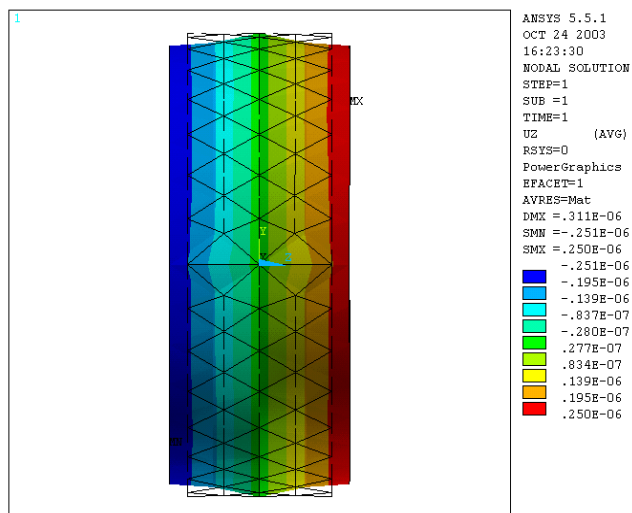


Fig. 4.32. *Reprezentarea frontală a deformatiei/nedeformatiei pentru sarcini negative.*

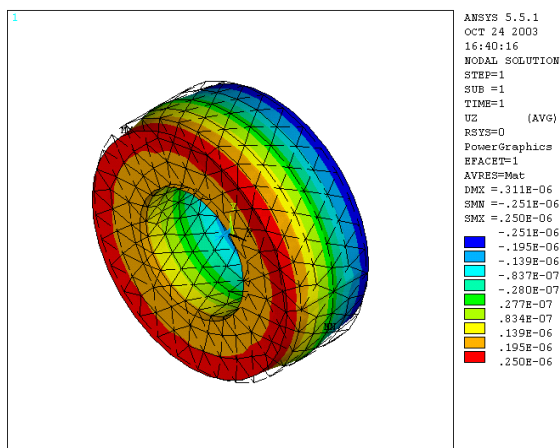


Fig. 4.33. *Reprezentarea izometrică a deformatiei/nedeformatiei pentru sarcini negative.*

Tabelul 4.4. *Dependența amplitudinii oscilației funcție de tensiunea de atac aplicată pastilelor piezoceramice*

Tensiune atac pastile piezoceramice	Amplitudinea oscilației
0	0
100	0.94
200	1.877
300	2.82
400	3.75
500	4.72
600	5.63
700	6.57
800	7.50
900	8.44
1000	9.38
1200	11.26
1400	13.14
1600	15.01
1800	16.89
2000	18.692

Prin efectuarea analizei armonice, pentru frecvența de rezonanță dorită a ansamblului piezoceramic (20 KHz), se obțin deplasările nodale adică amplitudinea oscilației care atacă concentratorul ultrasonic.

Rezultatele acestei analize pentru o baleiere a valorilor tensiunii furnizate de către generatorul de putere de 0...2000 V este dată în tabelul 4.4.

Reprezentarea grafică a acestor perechi de valori (fig.4.34) arată răspunsul liniar al mărimii amplitudinii cu tensiunea de atac a pastilelor piezoceramice.

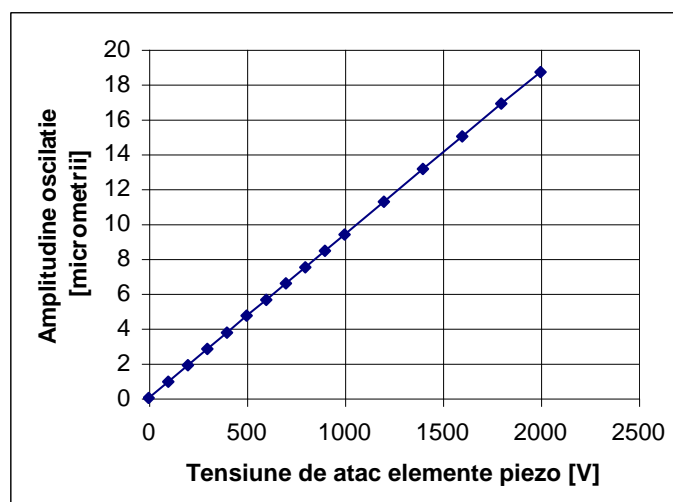


Fig. 4.34. Răspunsul linear al mărimii amplitudinii oscilației funcție de tensiunea de atac a pastilei.

4.5.3. Modelarea cu elemente finite a ansamblului piezoceramic

Elementul activ al sistemului ultraacustic este transductorul piezoceramic care convertește oscilațiile electrice aplicate de generator în oscilații elastice ale întregului sistem.

Transductorul compus este format dintr-un pachet de elemente piezoceramice în număr par cuprinse între două blocuri din materiale cu densitate și modul de elasticitate diferite (reflector și radiant).

În ansamblul piezoceramic (fig.4.35), pastilele piezoceramice 2 sunt asamblate cu prestrângere între un element reflector 3 și unul difuzor sau radiant 1.

Modelarea prin metoda elementelor finite a ansamblului piezoceramic oferă o predicție a comportamentului acestuia atât în ce privește mărimea deformațiilor (amplitudinea) cât și a stării de tensiuni.

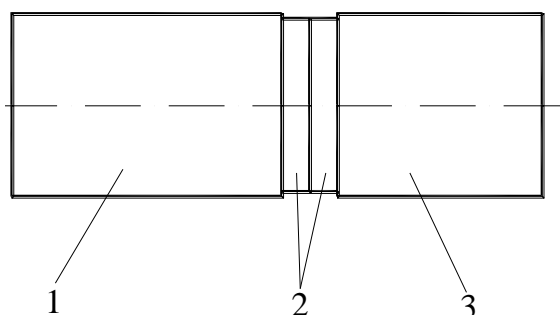


Fig. 4.35. Ansamblu piezoceramic:
1 – radiant; 2 – pastile piezoceramice; 3 – reflector.

În figurile 4.36, și 4.37 sunt reprezentate etapele de construcție a modelului ansamblului piezoceramic.

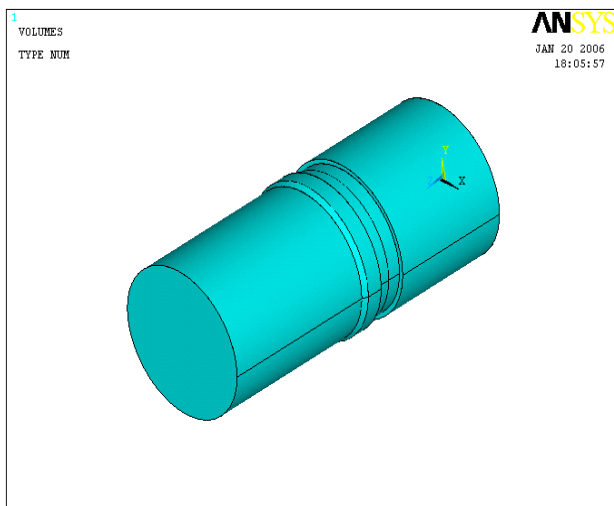


Fig. 4.36. Geometria volumelor ansamblului piezoceramic.

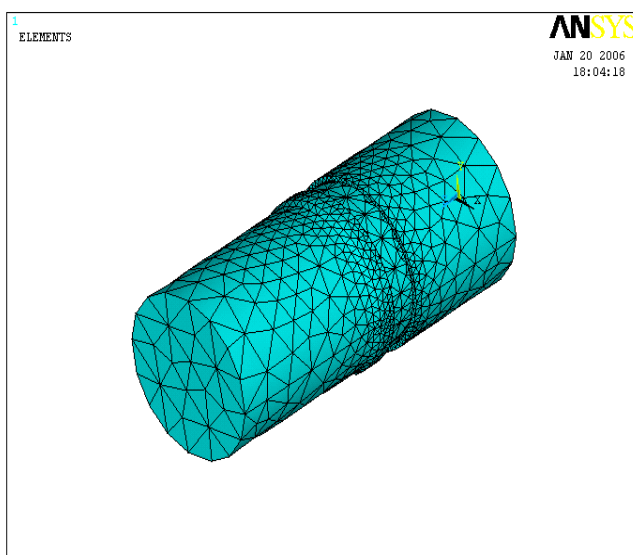


Fig. 4.37. Discretizarea cu elemente finite a volumelor ansamblului piezoceramic.

Este ales tipul de analiză armonică care dă posibilitatea de a prezice comportarea dinamică întreținută a structurilor, de a verifica dacă modelul ajunge la rezonanță, oboseală și alte efecte armonice ale forțelor de vibrație.

Analiza armonică este o tehnică folosită pentru a determina răspunsul liniar staționar al structurii atunci când sarcina variază sinusoidal (armonic). Ideea este de a calcula răspunsul structurii pentru câteva frecvențe și reprezentarea grafică a răspunsului în frecvență a câtorva mărimi (de obicei deplasări).

Prin această analiză se calculează numai forțele de vibrație staționare ale structurii. Vibrațiile tranzitorii care apar la începutul excitației nu sunt luate în seamă de către analiza armonică.

Analiza răspunsului armonic este o analiză liniară. Orice neliniaritate cum ar fi plasticitatea și interstițiul de contact dintre elemente, vor fi ignorate chiar dacă ele au fost definite. Analiza armonică poate fi realizată și pentru o structură pretensionată.

Analiza a fost efectuată pentru frecvența de 20 KHz care corespunde cu frecvența de rezonanță atât a ansamblului piezoceramic cât și a întregului sistem ultrasonor.

În figura 4.38 este reprezentată starea deformată/nedeformată în vedere izometrică și verticală a ansamblului piezoceramic pentru frecvența de rezonanță de 20 KHz.

În figura 4.39 este reprezentată starea deformată/nedeformată în vedere verticală a ansamblului piezoceramic pentru frecvența de rezonanță de 20 KHz.

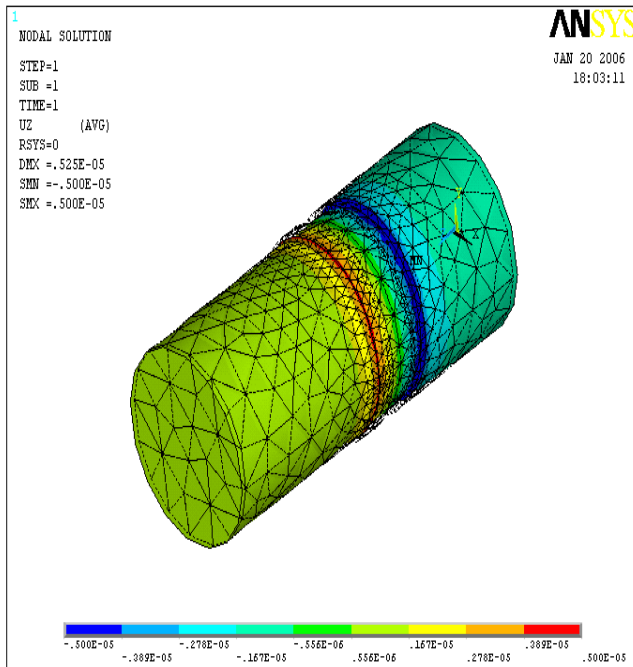


Fig. 4.38. *Reprezentarea izometrică a deformatiei/nedeformatiei a ansamblului piezoceramic.*

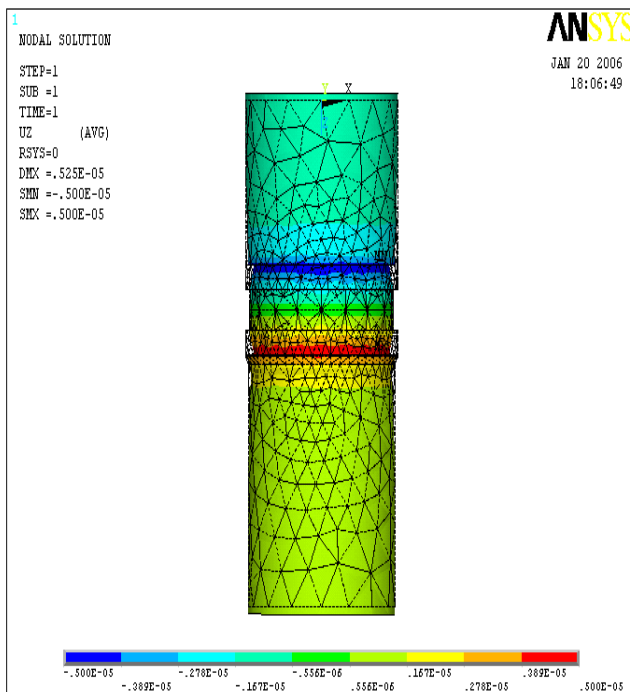


Fig. 4.39. *Reprezentarea verticală a deformatiei/nedeformatiei a ansamblului piezoceramic.*

Rezultatele analizei în ceea ce privește starea de deformare a ansamblului piezoceramic sunt date în tabelul 4.5.

Acesta conține perechile de valori coordonată-amplitudine ale nodurilor elementelor aflate pe generatoarele blocurilor reflector și radiant cât și a elementelor piezoceramice, originea sistemului de coordonate fiind în planul de ieșire al reflectorului (fig. 5.36).

În tabel este marcată perechea de valori corespunzătoare planului nodal aflat între elementele piezoceramice.

Tabelul 4.5. Valorile mărimii amplitudinii în lungul ansamblului piezoceramic.

Coordonata Z	1	AMPLITUDINE	2	COORDONATA	3	AMPLITUDINE
0		-17.68		50		0
8.08		-17.52		53		6.88
10.17		-17.08		56		16
16.01		-16.24		56		15.68
21.86		-15.04		61.64		14.6
26.11		-14.08		67.09		16.04
30.36		-13.08		73.54		21.24
33.19		-12.52		79.98		26.08
36.02		-12.12		86.8		30.68
37.91		-12.04		93.62		34.32
39.8		-12.32		98.68		36.44
41.06		-12.92		103.75		37.96
42.32		-13.84		107.12		38.64
43.16		-14.68		110.5		39.08
44		-15.68		112.75		39.12
44		-16		115.02		39.12
47		-6.44		118.8		39.16
				121		39.16

Reprezentarea grafică a variației amplitudinii în lungul ansamblului piezoceramic este dată în figura 4.40.

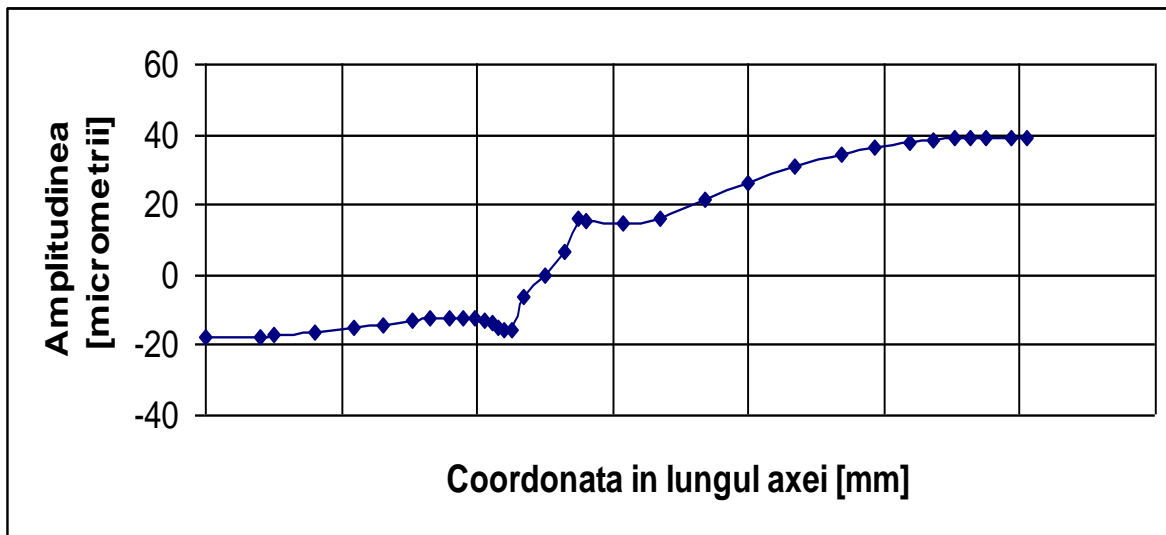


Fig. 4.40. Variația amplitudinii în lungul ansamblului piezoceramic.

4.5.4. Modelarea cu elemente finite a sistemului ultraacustic

Prin sistem ultraacustic se înțelege un ansamblu format dintr-un transductor electromecanic (de obicei piezoelectric), elementul intermediar și concentratorul de energie ultrasonică, luate ca un întreg.

Sistemul ultraacustic este subansamblul cel mai important al unei instalații de filtrare cu ultrasunete deoarece el realizează parametrii acustici (intensitatea acustică, densitatea de energie acustică, amplitudinea de oscilație, tipul de undă, frecvența oscilațiilor) cât și parametrii mecanici.

În figura 4.41 se prezintă schema generală de principiu a unui sistem ultraacustic astfel definit.

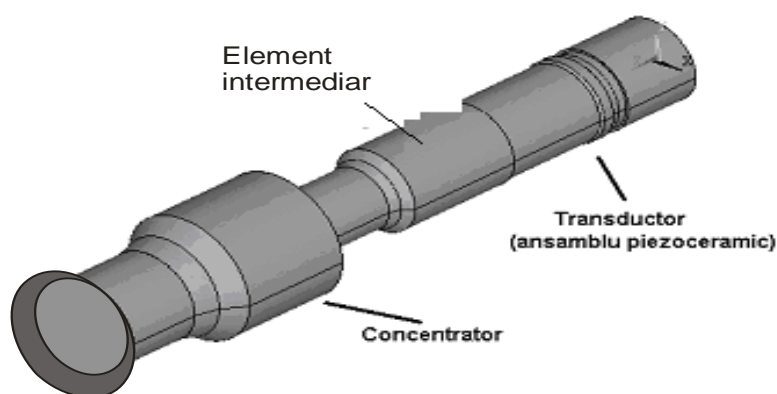


Fig. 4.41. Sistem ultraacustic

În figurile 4.42, 4.43, și 4.44 sunt reprezentate etapele de construcție a modelului ansamblului piezoceramic cuplat cu elementul intermediar și concentratorul de energie ultrasonică.

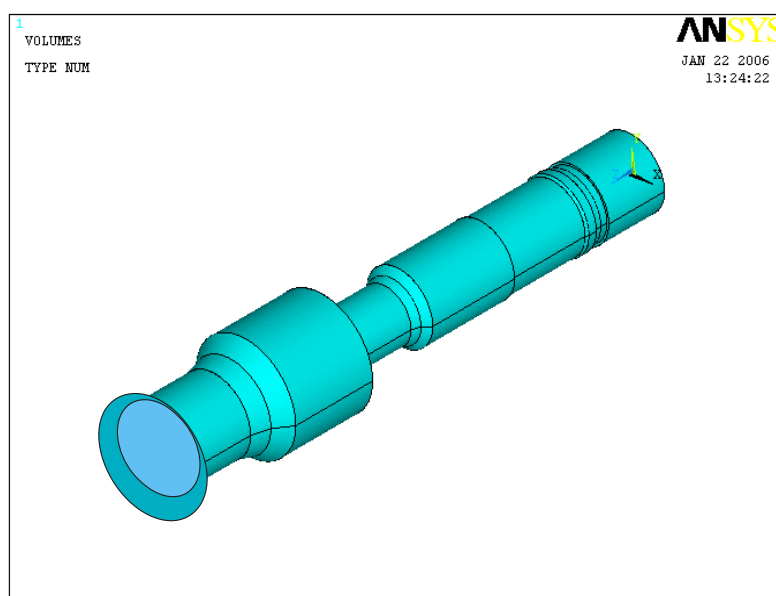


Fig. 4.42. Geometria volumelor ansamblului piezoceramic-element intermediar-concentrator.

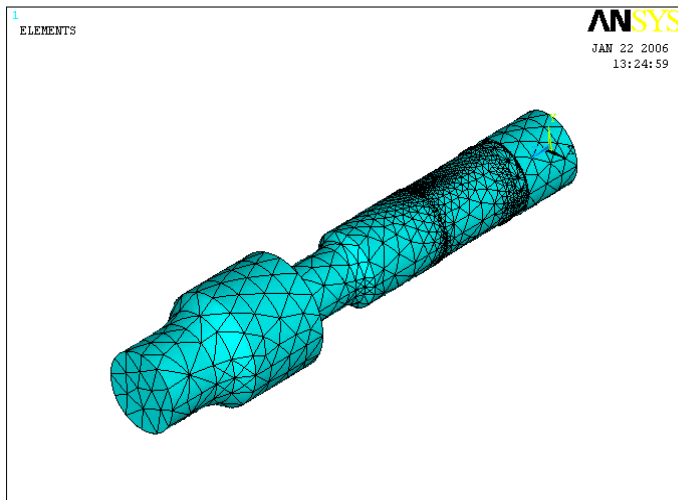


Fig. 4.43. Discretizarea cu elemente finite a volumelor ansamblului piezoceramic-element intermediar-concentrator.

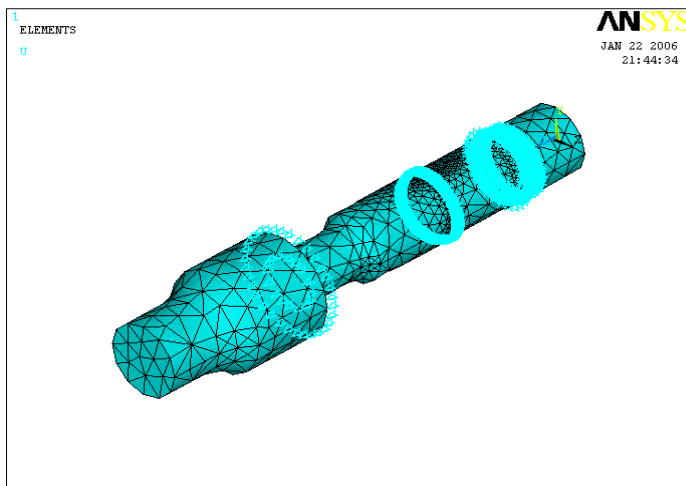


Fig. 4.44. Aplicarea încărcărilor tip tensiune electrică și deplasare.

În figurile 4.45, 4.46 și 4.47 sunt reprezentate stările deformată / nedeformată în vedere izometrică, orizontală și verticală a ansamblului piezoceramic pentru frecvența de rezonanță de 20 KHz.

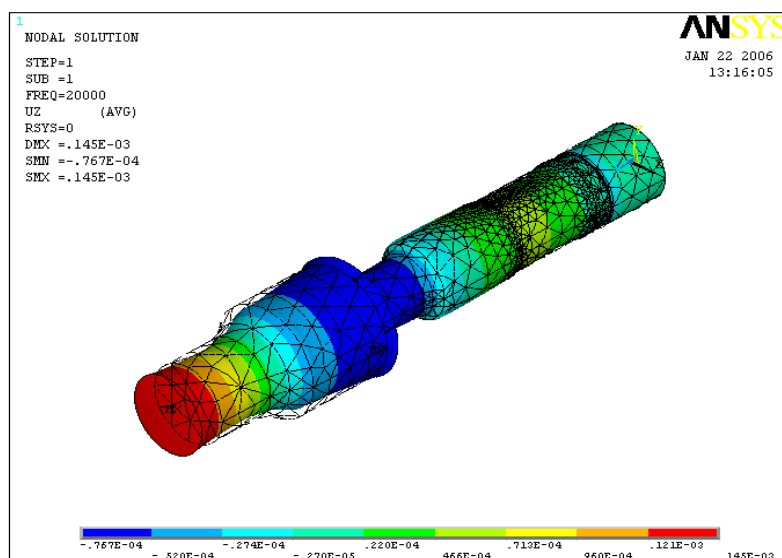


Fig. 4.45. Reprezentarea izometrică a deformatei/nedeformatei a ansamblului piezoceramic-element intermediar-concentrator.

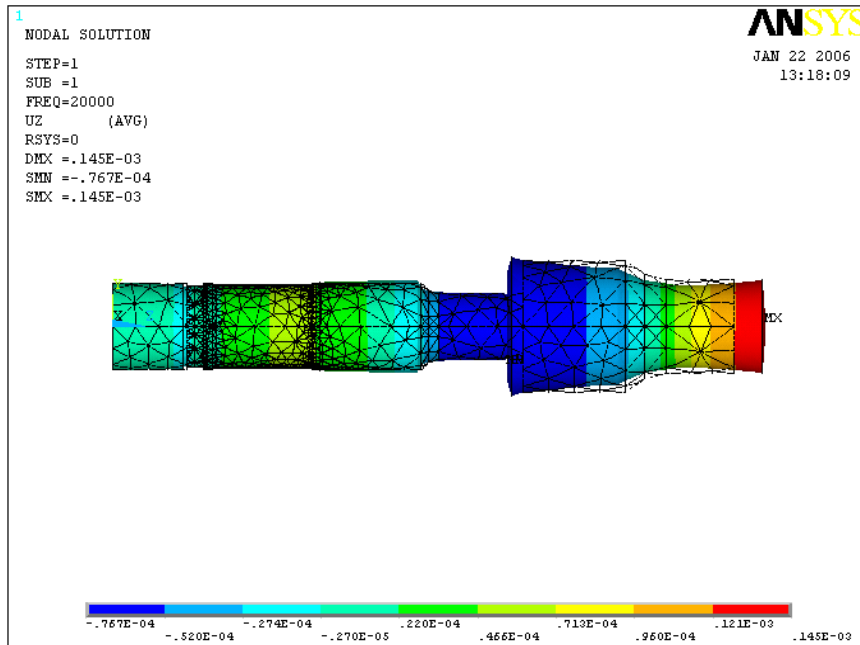


Fig. 4.46. *Reprezentarea laterală a deformatiei/nedeformatei a ansamblului piezoceramic- element intermediar-concentrator.*

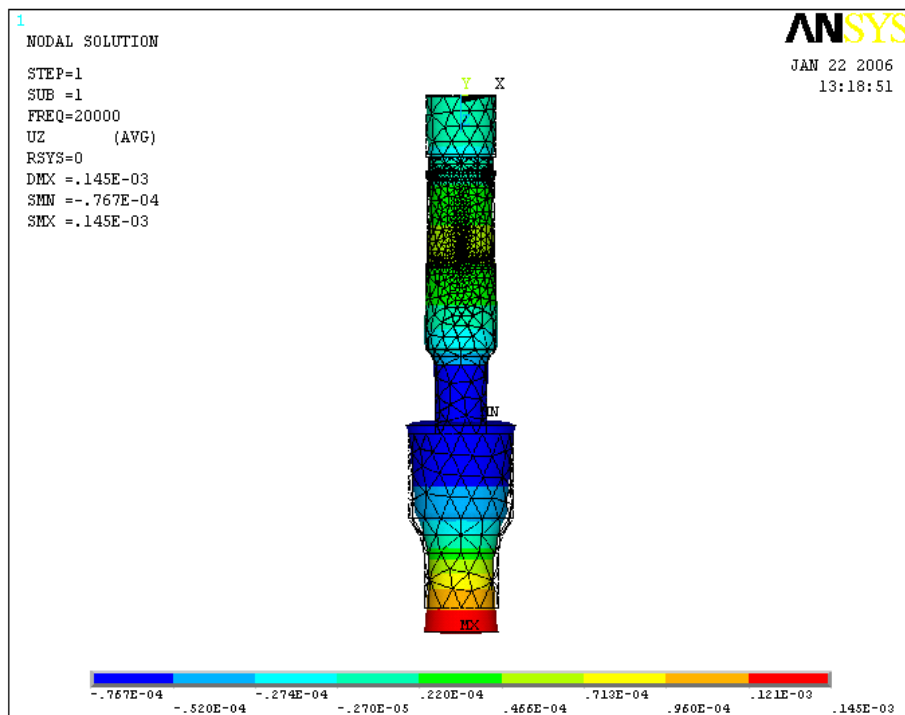


Fig. 4.47. *Reprezentarea verticală a deformatiei/nedeformatei a ansamblului piezoceramic- element intermediar-concentrator.*

În figura 4.48 sunt prezente valorile maxime ale deplasărilor în diferite secțiuni ale sistemului ultraacustic.

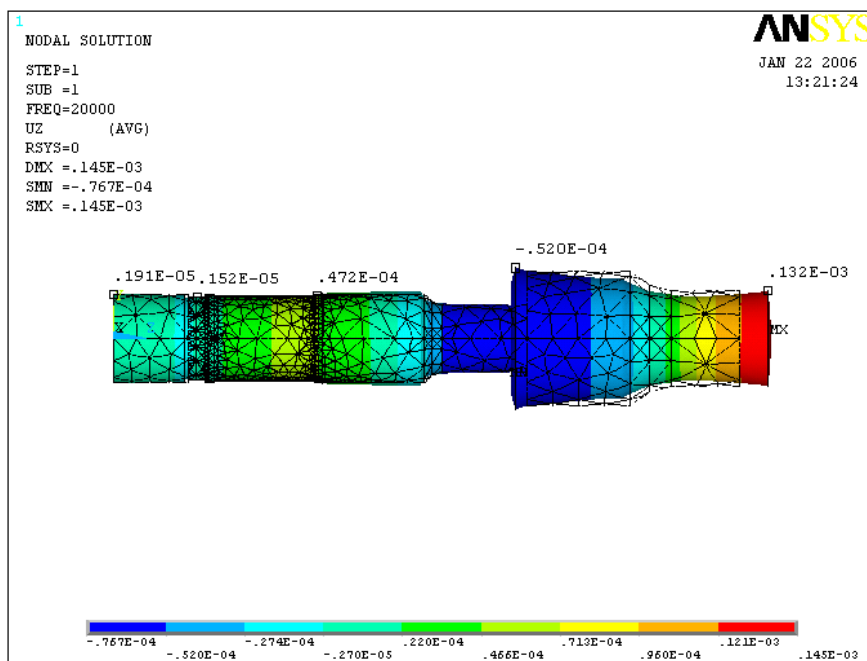


Fig. 4.48. Valorile maxime ale deplasărilor în diferite secțiuni ale sistemului ultraacustic.

Sistemele ultraacustice calculate și realizate în cadrul tezei au fost testate experimental și rezultatele obținute au confirmat predicțiile cu privire la variația amplitudinii vitezei particulei, la starea de tensiuni și deformații, precum și la tipul de oscilații ce se excită în sistem. S-a stabilit că pe lângă oscilațiile longitudinale apar și oscilațiile radiale, iar în elementul filtrant apar unde staționare (dimensiunile incintei sunt calculate așa fel încât să se excite unde staționare pentru a accelera procesul de coalescență).

4.6. CONCLUZII

- Transductorul ultrasonic este aceea parte a sistemului ultraacustic ce realizează transferul de energie ultrasonică de la generator la focalul de prelucrare (în zona de filtrare), astfel încât într-o mare măsură randamentul și performanțele unor instalații de filtrat cu ultrasunete depind de modul de construcție, de natura materialelor din care este confecționat, de modul de adaptare a lui la generatorul de înaltă frecvență și de modul de adaptare a transductorului ultrasonic la schema cinematică concretă a instalației de filtrat cu ultrasunete;

- Elementele de calcul ale unui transductor magnetostrictiv construit și experimentat în lucrare sunt: frecvența de rezonanță mecanică; frecvența de rezonanță electromecanică; coeficientul transformării electromecanice; factorul de calitate mecanic; tensiunea electrică; puterea acustică emisă la rezonanța mecanică; caracteristica de frecvență a puterii acustice în vecinătatea rezonanței; impedanța electrică a transductorului; randamentul electromecanic al traductorului ; puterea electrică necesară pentru producerea puterii acustice și curenții electrici la rezonanță;

- Elementele de calcul pentru un transductor piezoceramic compus, proiectate și realizate în teză sunt: condiția de rezonanță mecanică; condiția de rezonanță electromecanică; puterea

acustică emisă la rezonanță; puterea acustică la frecvențe joase; caracteristica de frecvență a puterii acustice în apropierea rezonanței; impedanța electrică a transductorului; randamentul electroacustic al transductorului; sensibilitatea transductorului în regim de rezonanță electromecanică; sensibilitatea receptorului de frecvență joasă; caracteristica de frecvență a sensibilității specifice de recepție și curenți electrici la rezonanță;

- Experimental se constată că, deși subansamblul ceramic-reflector transmite numai oscilații longitudinale elementului radiant, în acesta apar atât oscilații longitudinale cât și transversale datorită cuplajului existent într-un mediu solid. Aceste oscilații, conform legii generalizate Hooke se propagă independent iar impedanța caracteristică a elementului radiant este o sumă a impedanței caracteristice corespunzătoare fiecărui tip de radiație excitată;

- Cunoașterea modului cum vibrează fiecare secțiune a sistemului ultraacustic este necesară proiectării și posibilă făcând o analiză cu elemente finite în urma căreia se trasează diagrama de variație a amplitudinii vitezei particulei în lungul secțiunii și a tipului de vibrație excitat în sistem. Aceste diagrame sunt absolut necesare nu numai pentru proiectare și determinarea elementelor de rezistență ci și pentru realizarea unui sistem ultraacustic care să aibă un randament acustomecanic impus aprioric;

- Sistemul ultraacustic se poate calcula în așa fel încât în zona de filtrare să se excite oscilații staționare, pentru a accelera procesul de coalescență care permite și filtrarea microparticulelor foarte fine.

CAPITOLUL V

CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND CALCULUL CONSTRUCȚIA ȘI EXECUȚIA CONCENTRATOARELOR DE ENERGIE ULTRASONICĂ FOLOSITE LA FILTRAREA CU ULTRASUNETE A GAZELOR NATURALE

5.1. GENERALITĂȚI

Intensitatea acustică obținută cu un emițător ultrasonic are o valoare limitată, determinată de un număr mare de factori, printre care un loc important îl deține tipul elementului care este pus în vibrație și care radiază energia acustică, natura materialului din care este confecționat elementul, precum și forma elementului care vibrează (transductorul) și transmite energia de vibrație. Astfel, în cazul emițătoarelor piezoelectrice care folosesc plăcuțe de cuarț, atunci când se iau măsuri pentru a preveni producerea cavitației pot fi obținute intensități acustice de până la 60 W/cm². Această limitare a intensității este determinată de rezistența mecanică a cuarțului și de imposibilitatea eliminării descărcării electrice de la marginea plăcii. Dacă se folosesc plăci de titanat de bariu, intensitățile acustice maxime care pot fi obținute cu asemenea emițătoare sunt mai mici, ajungând până la 5 W/cm², iar prin utilizarea unei răcirii suplimentare se poate atinge valoarea de 15 W/cm². Aici limitarea este determinată de încălzirea puternică a plăcii ceramice care vibrează, datorită pierderilor mecanice și pierderilor în dielectric, temperatura la care ajunge placa putând depăși punctul Curie.

Nici emițătoarele magnetostrictive nu produc ultrasunete de intensități prea mari. Astfel, din cauza pierderilor prin fricțiune și a pierderilor prin curenți Foucault, intensitatea acustică a undelor ultrasonore emise este limitată la transductoarele de nichel la 7...16 W/cm², iar la cele pe bază de ferite la 3...6 W/cm².

În cazul aplicațiilor active, cum este cazul filtrării gazelor naturale, este necesar să se realizeze într-un volum relativ redus concentrații mari de energie, intensitatea acustică trebuind să depășească cu mult valorile maxime arătate mai sus. Datorită faptului că undele ultrasonice au o comportare analoagă cu undele luminoase, s-a recurs în acest scop la crearea de dispozitive care să permită concentrarea energiei acustice. Au fost în acest fel create lentilele acustice și reflectorii acustici pentru sistemele ultraacustice ce lucrează în medii lichide sau gazoase și o serie de dispozitive cu forme dintre cele mai diferite pentru sistemele ultraacustice ce lucrează în medii lichide și solide.

5.2. CONTRIBUȚII PRIVIND METODICA DE CALCUL ȘI CONSTRUCȚIE A CONCENTRATOARELE DE ENERGIE ULTRASONICĂ FOLOSITE ÎN CONSTRUCȚIA FILTRELOR DE GAZE NATURALE

În cazul aplicațiilor active (cum este și cazul filtrării și purificării cu ultrasunete a gazelor naturale), în care ultrasunetul îndeplinește rolul unei scule ce efectuează lucrul mecanic și în care emițătoarele sunt în majoritatea cazurilor magnetostrictive sau piezoceramice se folosesc bare de secțiune variabilă numite concentratoare sau transformatoare acustice, care, cuplate cu transductorul îndeplinesc următoarele funcții:

- conduc energia ultrasonică de la transductor la locul unde are loc intervenția, tratamentul, prelucrarea, filtrarea, separarea, modificarea mediului;

- concentrează și focalizează energia ultrasonică în zona de filtrare sau separare;
- amplifică valoarea vitezei particulei măbind amplitudinea părții active a filtrului și implicit intensitatea acustică;
- prin forma lor permit o gamă foarte variată de construcții de filtre și utilizarea la diferite procedee de filtrare, purificare și separare a gazelor naturale (prin aglomerare ultrasonică sau scuturare ultrasonică);
- conferă un randament maxim procedului de filtrare;
- prin forma lor permit obținerea diferitelor tipuri de unde acustice (longitudinale, transversale, de suprafață, de torsiune, radiale sau combinații) în funcție de natura procesului tehnologic la care se aplică sau peste care se suprapune energia ultrasonică;
- permit susținerea sau fixarea întregului sistem ultraacustic în ansamblul aparatului de filtrat cu ultrasunete, știut fiind că ele au plane în care vibrația particulei este nulă (planele nodale);
- prin forma lor geometrică și constructivă permit obținerea unei eficacități maxime a conducerii energiei ultrasonice în zona de filtrare sau suprapunerii acesteia peste alte energii clasice.

Pentru a lucra cu un randament bun, concentratorul trebuie acordat cu o aproximație de câteva perioade cu frecvența cu care este calculat transductorul untrasonic, deci întregul sistem oscilant trebuie să lucreze în regim de rezonanță pentru ca amplitudinea vitezei particulei la partea activă să fie cât mai mare și deci și intensitatea acustică să fie mare.

Procedând analog ca în cazul determinării ecuației de propagare a undelor elastice într-un mediu extins la infinit, se consideră un element de volum dV , din bara cu secțiunea variabilă (fig.5.1) dat de relația:

$$dV = S_x dx, \quad (5.1)$$

și se scrie ecuația de continuitate de forma:

$$-\frac{\partial}{\partial x}(S_x \rho' v) dx = -\rho' \frac{\partial}{\partial x}(S_x v) dx, \quad (5.2)$$

Admițând creșterea masei în elementul de volum considerat, de forma:

$$-\frac{\partial}{\partial t}(S_x \rho') dx = S_x \frac{\partial \rho'}{\partial t} dx, \quad (5.3)$$

prin egalarea celor două expresii rezultă:

$$S_x \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho' \frac{\partial}{\partial x}(S_x v) = 0, \quad (5.4)$$

Ținând seama că: $\rho' = \rho_0(1 + s)$, unde s reprezintă condensarea în mediu și neglijând termenul sv , rezultă:

$$S\rho_0 \frac{\partial s}{\partial t} + v \frac{\partial S_x}{\partial x} + S_x \rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad (5.5)$$

Deoarece:

$$s = \frac{\rho}{\rho_0 c^2} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{și} \quad \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (5.6)$$

Făcând înlocuirile în ecuația (5.5) rezultă:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} (\ln S_x) - c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0, \quad (5.7)$$

în care:

Φ este potențialul de viteze;

S_x - aria secțiunii barei la distanța x , de originea acesteia;

c - viteza de propagare a undelor acustice prin materialul din care este confecționată bara.

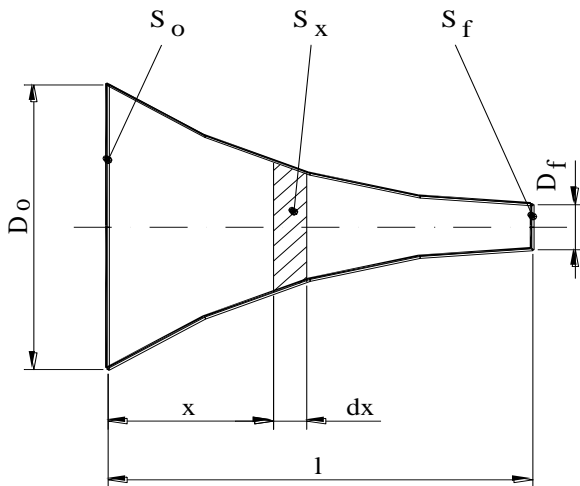


Fig. 5.1. Bară de secțiune variabilă:

D_0 – diametrul inițial; D_f – diametrul final; L – lungimea barei; S_0 – secțiunea inițială; S_f – secțiunea finală.

Este evident că ecuația undelor va lua forme diferite în raport cu modul de variație a secțiunii barei în lungul acesteia.

Această variație poate fi liniară (fig.5.2,a), în trepte (fig. 5.2,b), exponențială (fig. 5.2,c), catenoidală (fig.5.2,d), parabolă de diferite ordine (fig.5.2,e) și combinații ale formelor amintite mai sus (fig.5.2,f...l).

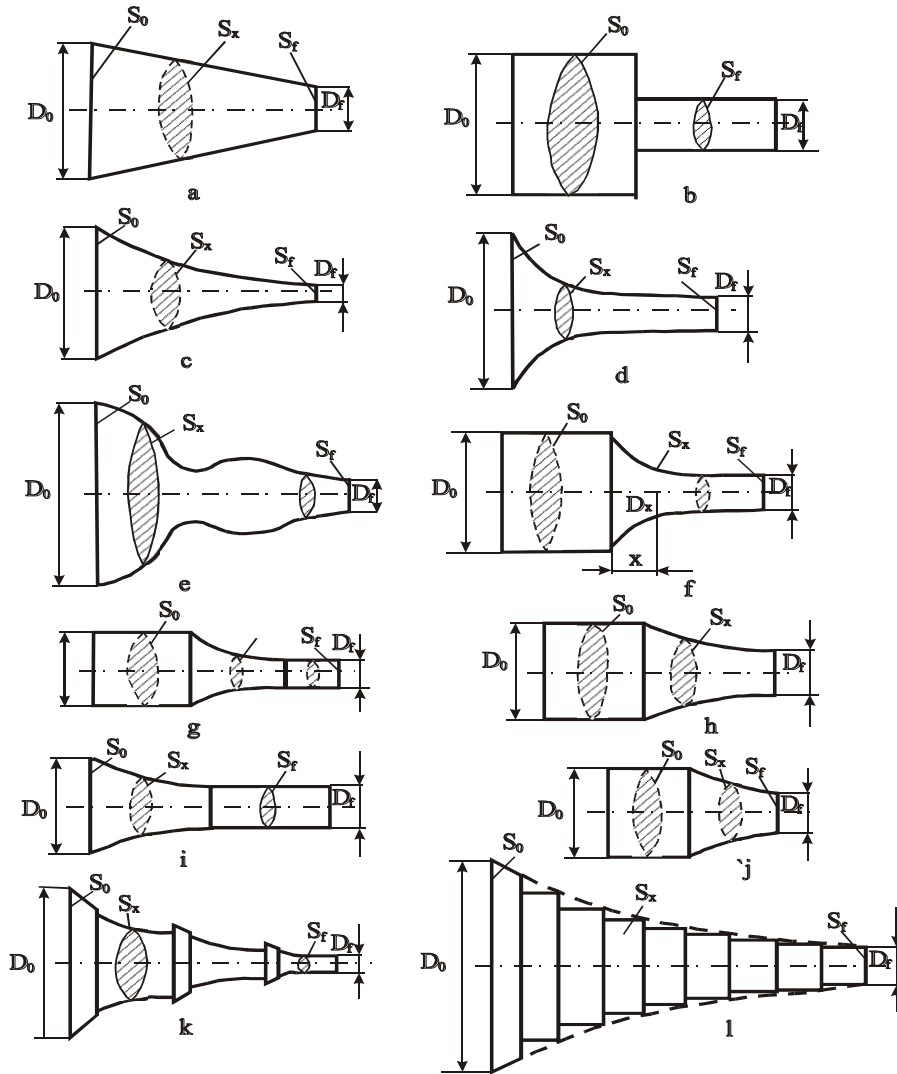


Fig. 5.2. Moduri de variație a secțiunii concentratorului ultrasonic:

a-conic; b-cilindric în trepte; c-exponențial; d-catenoidal; e-serie Fourier; f-cilindric cu exponențial; g; h; i; j-combinații de cilindric-conic-exponențial; k; l-în trepte.

Așa cum s-a văzut, soluționarea riguroasă a problemei propagării oscilațiilor în astfel de bare cu secțiune variabilă prezintă dificultăți matematice foarte mari. De aceea, pentru efectuarea calculelor se fac următoarele ipoteze:

- în lungul barei se propagă numai oscilațiile longitudinale;
- oscilațiile barei sunt armonice.

În cazul unei bare cu secțiunea longitudinală de variație exponențială, cazul cel mai des întâlnit în practică, aria secțiunii barei la distanța x , va fi S_x , de forma:

$$S_x = S_0 e^{-\alpha x}, \quad (5.8)$$

în care: α este un coeficient ce caracterizează modul de variație a secțiunii.

Ecuția (5.7) devine:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} - \alpha \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (5.9)$$

Se consideră soluția generală a ecuației (5.9) de forma:

$$\Phi = C e^{j(\omega t + \gamma x)}, \quad (5.10)$$

Înlocuind pe Φ și derivatele sale și notând $k = \omega / C$, se obține soluția generală a ecuației (5.9) sub forma:

$$\Phi = e^{-\alpha x/2} \left(A e^{-jk^2 - \alpha^2 x/4} + B e^{jk^2 - \alpha^2 x/4} \right) e^{j\omega t}, \quad (5.11)$$

în care A și B sunt două constante care pot fi determinate punând condițiile la limită.

Din relația (5.11) se constată că în bară există două unde, o undă care se propagă de la bază spre vârf numită undă progresivă și o undă care se propagă de la vârf spre spate numită undă regresivă.

Cunoscând potențialul de viteze Φ se poate determina expresia presiunii acustice p_x , într-un punct aflat la distanța x , de origine, cu o expresie de forma:

$$p_x = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -j\rho\omega e^{\frac{\alpha x}{2}} \left(A e^{-\frac{j\omega x}{c'}} + B e^{\frac{j\omega x}{c'}} \right) e^{j\omega t}, \quad (5.12)$$

În mod analog se determină expresia vitezei particulei v_x , într-un punct la distanța x , cu o relație de forma:

$$v_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = e^{\frac{\alpha x}{2}} \left[A \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{j\omega}{c'} \right) e^{-\frac{j\omega x}{c'}} + B \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{j\omega}{c'} \right) e^{\frac{j\omega x}{c'}} \right] e^{j\omega t}, \quad (5.13)$$

unde:

$$c' = \frac{c}{\sqrt{1 - \alpha^2 c^2 / 4\omega^2}}, \quad (5.14)$$

iar ρ este densitatea materialului din care e confecționată bara.

În funcție de natura procedurii de filtrare, la concentratoarele interesează în primul rând să se cunoască mărimile vitezei particulei în dreptul secțiunii inițiale S_0 , secțiunea de cuplare cu traductorul și mai ales în dreptul secțiunii finale S_f , unde este contactul direct cu mediul de prelucrat (partea activă) sau unde se crează undele staționare.

De aceea se pune condiția:

$$x = 0 \Rightarrow V_0 = \left[A \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{j\omega}{c'} \right) + B \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{j\omega}{c'} \right) \right] e^{j\omega t}, \quad (5.15)$$

și:

$$x = L \Rightarrow v_f = e^{\frac{\alpha L}{2}} \left[A \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{j\omega}{c'} \right) e^{-\frac{j\omega L}{c'}} + B \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{j\omega}{c'} \right) e^{\frac{j\omega L}{c'}} \right] e^{j\omega t}, \quad (5.16)$$

În foarte multe situații în practică, interesează cazul în care sonotrodul de lucru are o lungime L , egală cu un număr întreg de jumătăți de lungime de undă, adică:

$$L = n \frac{\lambda'}{2} = \frac{nc'}{2f}, \quad (5.17)$$

Ținând seama că: $e^{-jn\pi} = (-1)^n$ și $e^{jn\pi} = (-1)^n$, relația (5.16) devine:

$$v_f = (-1)^n e^{\frac{n_e L}{2}} \left[A \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{j\omega}{c'} \right) + B \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{j\omega}{c'} \right) \right] e^{j\omega t}, \quad (5.18)$$

Un element foarte important care interesează în majoritatea procedurilor de sudare este factorul de amplificarea N , definit ca raportul dintre viteza particulei la intrare și ieșire:

$$N = \frac{S_f}{S_0} = \frac{v_f}{v_0} = (-1)^n e^{\frac{\alpha L}{2}} = \sqrt{\frac{S_0}{S_f}}, \quad (5.19)$$

Cunoscând factorul de amplificare N se poate determina coeficientul de variație a secțiunii α , cu relația:

$$\alpha = \frac{2 \ln N}{L}, \quad (5.20)$$

Elementul cel mai important al unui concentrator îl constituie totuși lungimea lui L , asupra căreia trebuie aplicate anumite corecții în funcție de modul de variație al secțiunilor și de modul de cuplare al elementelor între ele. De aceea, folosind relațiile (5.18), (5.19), (5.20) se poate determina lungimea concentratorului L , cu relația:

$$L = \frac{nc}{2f_c} \Delta', \quad (5.21)$$

în care: $\Delta' = [1 + (\ln N / n\pi)^2]^{1/2}$ se calculează în funcție de N și ale cărui valori mai des utilizate se găsesc în tabelul 5.1, în care: n este număr întreg; f_c – frecvența de calcul, în Hz; c – viteza de propagare a undelor longitudinale în materialul din care este confecționată bara, în cm/s.

Tabelul 5.1. Valorile corecției, Δ' , în funcție de N

Valoarea factorului	Valoarea corecției	Valoarea corecției
1	1,0000	1,0000
2	1,0240	1,0060
3	1,0590	1,0150
4	1,0930	1,0240
5	1,1230	1,0322
6	1,1513	1,0398
7	1,1760	1,0468
8	1,1880	1,0501
9	1,2210	1,0593
10	1,2399	1,0650
11	1,2582	1,0704
12	1,2753	1,0754
13	1,2912	1,0801
14	1,3036	1,0847
15	1,3206	1,0890

Din necesități funcționale și de construcție a filtrului, secțiunea barei exponențiale poate lua forme diferite: circulară, dreptunghiulară, inelară sau combinații ale acestora, de aceea și factorul de multiplicare N va avea expresii diferite (tab. 5.2).

La calcularea factorilor de multiplicare ai concentratoarelor formate din mai multe părți asamblate (unde există plane de separație) s-a ținut cont de proprietățile undelor ultrasonice de a se reflecta și refracta atunci când întâlnesc un plan de separație. Ținând cont de legea continuității presiunii și vitezei pe ambele fețe ale suprafeței de separație, precum și de faptul că în concentrator este indicat să existe un singur tip de unde s-au determinat valorile lui N , din tabelul 5.2 în cazul unor unde plane longitudinale care ating suprafața de cuplaj concentrator – traductor sub incidența normală.

Un alt parametru foarte important pentru calculul unui sistem oscilant și deci și pentru partea terminală a lui, concentratorul ultrasonic, este cunoașterea planelor nodale, necesară pentru fixarea întregului sistem oscilant în instalația de filtrare cu care se lucrează. Pentru a determina poziția planelor nodale, în relația (5.16) se pune condiția:

$$v_x = 0 \Rightarrow (A + B) \left[\alpha / 2 \cos(\omega x / c') - \omega / c' \sin(\omega x / c') \right] = 0, \quad (5.22)$$

de unde rezultă:

$$X_{nodal} = c' / \omega \arctg \left[\alpha c' / (2\omega) + n'\pi \right], \quad (5.23)$$

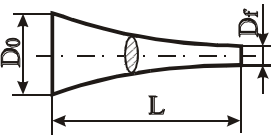
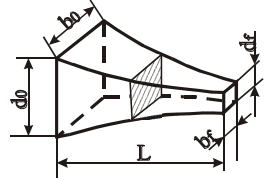
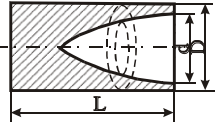
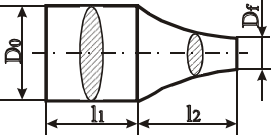
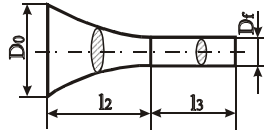
Ținând însă seama de condiția relativă la lungimea instrumentului de lucru L , de a fi un întreg de semilungimi de undă expresia (5.23) devine:

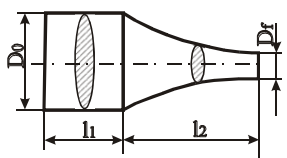
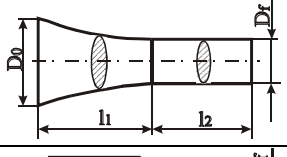
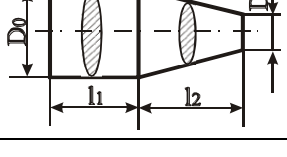
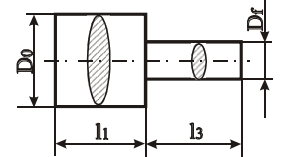
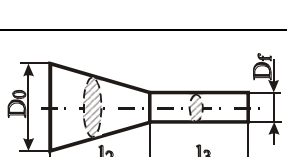
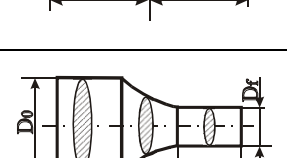
$$X_{nodal} = \frac{L}{n\pi} \arctg \left(\frac{1}{n\pi} \ln N + n'\pi \right), \quad (5.24)$$

în care: n și n' sunt numere întregi; $n' = 0$ pentru primul punct nodal, $n' = 1$ pentru al doilea punct nodal etc.

În cazul unor concentratoare ultrasonice a căror secțiune finală este alta decât exponențială (tab.5.4), ecuația (5.8) va fi înlocuită cu ecuațiile corespunzătoare, etapele de lucru fiind aceleași ca la secțiunea exponențială.

Tabelul 5.2. Valorile factorului de multiplicare „N”.

Nr. Crt.	Forma secțiunii și tipul concentratorului	Factorul de multiplicare în regim de funcționare	Observații și notații
1		$N = \frac{D_0}{D_f}$	Cilindrică exponențială
2		$N = \sqrt{\frac{a_0 b_0}{a_f b_f}}$	Dreptunghiulară exponențială
3		$N = \frac{D}{\sqrt{D^2 - d^2}}$	Inelară exponențială
4		$N_r = \left N \frac{\cos kl_1}{\cos kl_2} \right $	Cilindric + Exponențial $k = \frac{\omega}{c}; k' = \frac{\omega}{c'};$ $l_3 = 0$
5		$N_r = \left \frac{N}{\cos kl_3 \cos kl_2 - \frac{k}{k'} \sin kl_3 \sin kl_2} \right $	Exponențial + Cilindric $l_1 = 0$

6		$N_r = \left \frac{N \cos kl_1}{\ln N \frac{\sin kl_2}{k'l_2} + \cos k'l_2} \right $	Cilindric + Exponențial $l_3=0$
7		$N_r = \left \frac{N \cos k'l_2}{\cos kl_3 (\ln N \sin k'l_2 + k'l_2 \cos k'l_2 - kl_2 \sin kl_3 \sin k'l_2)} \right $	Exponențial + Cilindric $l_1=0$
8		$N_r = \left N \frac{\cos kl_1}{\cos kl_2} \cdot \frac{kl_2}{kl_2 + (N-1) \operatorname{tg} kl_2} \right $	Cilindric + Conic $l_3=0$
9		$N_r = \left \frac{\cos kl_1}{\cos kl_3} \right = \sqrt{1 + (N^4 - 1) \sin^2 kl_1}$	Cilindric + Cilindric $kl_1 = kl_3 = \frac{\pi}{2}$ $N_r^{\max} = N^2$
10		$N_r = \left \frac{Nk'l_2}{(N-1) \cos kl_3 \sin kl_2 + kl_2 \cos k(l_2 + l_3)} \right $	Conic + Cilindric $l_1=0$
11		$N_r = \left \frac{Nk'l_2}{k'l_2 \cos kl_2 + (\ln N - kl_2 \tan kl_1) \sin k'l_2} \right $	Cilindric + Exponențial + Cilindric $l_1=l_3$

5.3. CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE PRIVIND CALCULUL ȘI CONSTRUCȚIA CONCENTRATOARELOR DE ENERGIE ULTRASONICĂ FOLOSITE LA FILTRAREA ȘI PURIFICAREA GAZELOR NATURALE

Având în vedere cele expuse mai sus se poate spune că pentru proiectarea rapidă a unui concentrator ultrasonic sunt necesari următorii parametri:

- factorul de multiplicare N , sau N_r , care se calculează cu relațiile din tabelul (4.2), în funcție de tipul concentratorului ultrasonic;
- lungimea concentratorului ultrasonic L - element foarte important care se calculează cu relația (5.21);
- coeficientul α , ce caracterizează variația secțiunii concentratorului ultrasonic care se calculează cu relația (5.20) pentru secțiuni de forma (5.8), cele mai des întrebuințate, iar pentru secțiuni de forme prezentate în tabelul (5.3), se calculează folosind tabelul 5.4;
- profilul concentratoarelor ultrasonice care se obține ținând cont de relația (5.8) sau de tabelul 5.4.

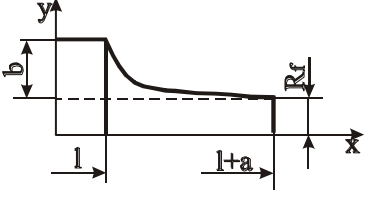
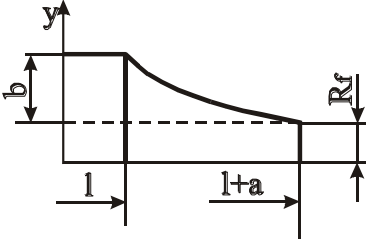
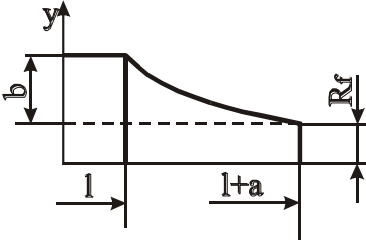
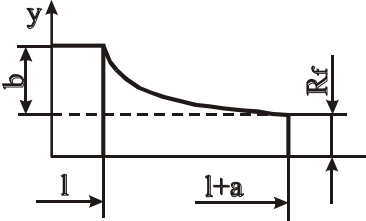
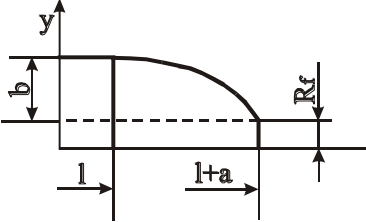
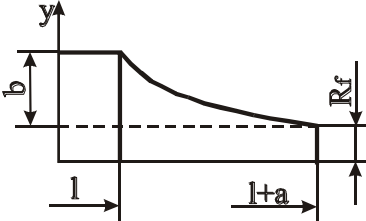
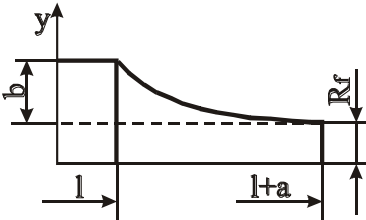
În funcție de precizia ce se vrea obținută și de metoda de obținere a profilului se determină diametrul profilului în secțiune transversală din mm în mm, sau din 10 mm în 10 mm. Coordonatele punctelor nodale, ce permit determinarea poziției de prindere și fixare a concentratorului ultrasonic și a elementelor de filtrare se determină cu relațiile din tabelul 5.4.

Cele mai des întrebuițate tipuri de concentratoare ultrasonice și cu elementele de calcul necesare sunt date în tabelul 5.4.

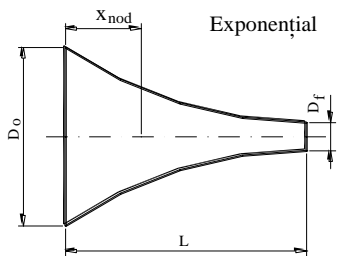
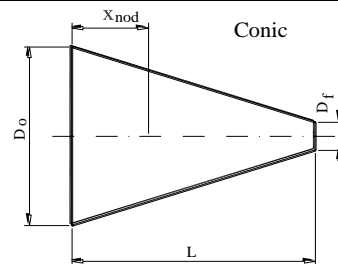
Tabelul 5.3. Tipuri de variații ale secțiunii concentratorului.

Nr. Crt.	Curba	Forma concentratorului	Ecuția curbei $y=f(x); l < x < l+a$
1	Dreaptă		$y = R_f + b \left(1 - \frac{x-l}{a} \right) \quad (5.36)$
2	Parabolă		$y = R_f + b \left[1 - \left(\frac{x-l}{a} \right)^2 \right] \quad (5.37)$
3			$y = R_f + b \left(1 - \sqrt{\frac{x-l}{a}} \right) \quad (5.38)$
4	Parabolă cubică		$y = R_f + \frac{b}{2} \left[1 + \left(1 - \frac{2(x-l)^3}{a} \right) \right] \quad (5.39)$
5			$y = R_f + b \left(1 - \frac{x-l}{a} \right)^3 \quad (5.40)$
6			$y = R_f + \frac{b}{2} \left(1 + \sqrt[3]{1 - \frac{2(x-l)a}{a}} \right) \quad (5.41)$

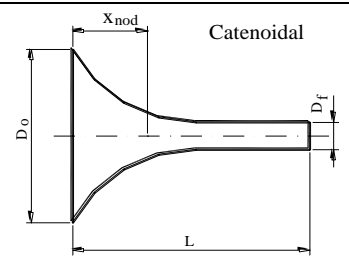
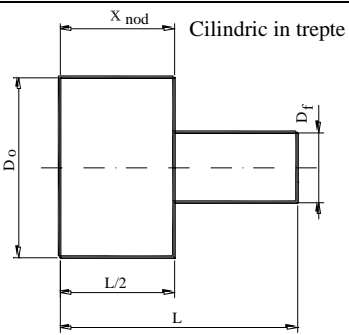
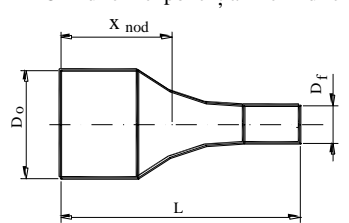
Tabelul 5.3. (continuare)

7			$y = R_f + b \left(1 + \sqrt[3]{\frac{x-l}{a}} \right) \quad (5.42)$
8	Parabolă de ordinul „n”		$y = R_f + b \left(1 - \frac{x-l}{a} \right)^n \quad (5.43)$ <p style="text-align: center;">$n=4...10,15,30$</p>
9			$y = R_f + b \left(1 - \sqrt[n]{\frac{x-l}{a}} \right) \quad (5.44)$ <p style="text-align: center;">$n=4...10,15,30$</p>
10	Elipsă		$y = R_f + b \left[1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x-l}{a} \right)^2} \right] \quad (5.45)$
11	Cosinus		$y = R_f + \frac{b}{2} \left[1 + \cos \frac{\pi(x-l)}{a} \right] \quad (5.46)$
12	Sinus		$y = R_f + b \left[1 - \sin \frac{\pi(x-l)}{a} \right] \quad (5.47)$
13	Arcsinus		$y = R_f + \frac{2b}{\pi} \arcsin \left(1 - \frac{x-l}{a} \right) \quad (5.48)$

Tabelul 5.4. Cele mai des întrebuințate tipuri de concentratoare cu elementele de calcul necesare

Nr. crt.	Tipul concentratorului	Legea de variație a secțiunii	Coeficientul teoretic de amplificare a amplitudinii	Lungimea concentratorului	Coordonatele punctului nodal (x_{nodal})
0	1	2	3	4	5
1	 <p>Exponențial</p>	$D_x = D_o e^{-\frac{\alpha}{2}x}$ $N = \frac{D_o}{D_f}$ $\alpha = \frac{\omega}{c} \frac{\ln N}{\sqrt{\pi + (\ln N)^2}}$	$N_r = \frac{D_o}{D_r} = N$	$L = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$x_{nod} = \frac{L}{\pi} \arctg \frac{\ln N}{\pi}$
2	 <p>Conic</p>	$D_x = D_o(1 - \alpha'x)$ $\alpha' = \frac{D_o - D_r}{D_o \cdot L}$	$N_r = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi L}{x}\right)^2}$ $N_r < N$	$L = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\alpha/k}{\pi}\right), \text{ unde}$ <p>(α/k) este rădăcina ecuației:</p> $tg \frac{\alpha}{k} = \frac{\alpha/k}{\frac{(\alpha/k)^2 N}{(1-N)^2} + 1}$	$x_{nod} = \frac{1}{\alpha} \arctg \frac{\alpha}{\alpha'}$ $\alpha = \frac{\omega}{c}; \alpha' = \frac{\omega}{c'}$

Tabelul 5.4. (continuare)

0	1	2	3	4	5
3	 <p>Catenoidal</p>	$D_x = D_o \operatorname{ch} \beta(L-x)$ $\beta = \frac{1}{L} \operatorname{arg} \operatorname{ch} N$	$N_r = \frac{N}{\cos(k'L)}$ $N_r > N$	$L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(k'L)^2 (\operatorname{arg} \operatorname{ch} N)^2}$ <p>$(k'L)$ este rădăcina ecuației:</p> $(k'L) + \operatorname{tg}(k'L) = \sqrt{1 - \frac{1}{N^2} \operatorname{arg} \operatorname{ch} N}$	$x_{nod} = \frac{1}{k'} \operatorname{arctg} \frac{k}{r} (\operatorname{thrl})$ $k' = \sqrt{\alpha^2 r^2}$
4	 <p>Cilindric in trepte</p>	$D_x = D_o$ <p>pentru $0 \leq x \leq \frac{1}{2}$</p> $D_x = D_f$ <p>pentru $\frac{1}{2} \leq x \leq 1$</p>	$N_r = \left(\frac{D_o}{D_f} \right)^2 = N^2$	$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$	$x_{nod} = \frac{1}{2} = \frac{c}{4f}$
5	 <p>Cilindric + exponențial + cilindric</p>	$D_x = D_o \cdot e^{-\frac{\alpha}{4}x}$ $\alpha = \frac{\omega}{c}$	$N_r = \sqrt{1 + 4 \ln N}$	$L = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{2\sqrt{\ln N}}{\pi} + \frac{1}{2} \right] +$ $+ \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\operatorname{arctg}(2\sqrt{\ln N})}{\pi}$	$x_{nod} = \frac{L}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2 \ln N}{\pi}$

Întrucât în majoritatea cazurilor, calculele, sunt deosebit de complicate, rezolvarea ecuațiilor diferențiale ce exprimă propagarea undelor în concentratorul ultrasonic este dificilă, determinarea constantelor de integrare se face prin punerea unor condiții inițiale care nu corespund întotdeauna cu începutul procesului de filtrare, sunt necesare corecții aduse în special parametrilor mecanici și constructivi ai concentratorului și părții finale.

Experimental se constată de asemenea că, pe lângă vibrațiile longitudinale mai apar în concentrator și vibrații torsionale și radiale sau alte tipuri de vibrații nedorite care consumă o bună parte din energia ultrasonică. Analizând factorii care influențează apariția vibrațiilor torsionale și radiale, s-a constatat că o mare importanță o prezintă factorul de amplificare N sau N_r , exceptând situațiile în care dimensiunile lineare ale celei mai mari secțiuni a concentratorului depășesc jumătate din lungimea de undă. Experimental s-a constatat că odată cu creșterea factorului de amplificare N_r , amplitudinile vibrațiilor torsionale θ și radiale a_r cresc după curbe greu de definit matematic. Acest lucru este foarte important de reținut deoarece în funcție de natura procedurii de filtrare și de precizia cerută se aleg factori de amplificare de valori diferite (de exemplu: pentru filtrarea cu ultrasunete este indicat să se folosească $N_r = 2, 5 \dots 6$, pentru diferite tratamente cu ultrasunete este indicat să se folosească $N_r = 1,5 \dots 4,5$, iar pentru procedee de filtrare a gazelor naturale, unde vibrațiile longitudinale și torsionale îndeplinesc un rol preponderent este indicat să se folosească factori de amplificare mari). Valorile amplitudinilor au fost calculate după fotografiile obținute prin metoda fotografierii ultrarapide făcute la vârful concentratorului ultrasonic. Din figură rezultă că nu este indicat să se adopte pentru concentratorul conic un $N_r > 5$ deoarece la vârful lui vor apare vibrații complexe de amplitudini destul de mari care vor scade randamentul foarte mult, al procedurii. De asemenea, se observă că cele mai bune concentratoare din acest punct de vedere ar fi cele catenoidale.

La concentratoarele în trepte, tot experimental s-a constatat că la valori ale lui $N > 4$, ele lucrează instabil, valorile lui N_r ajungând la $14 \dots 15$ și de multe ori în aceste situații are loc ruperea concentratorului în zonele de racordare.

În funcție de natura procedurii de filtrare și de calitatea și precizia ce se vrea realizată la partea activă a concentratorului, este necesar să se cunoască variația mărimii amplitudinii de-a lungul lungimii concentratorului luat în studiu.

Se constată că amplitudinea cea mai mare se obține la concentratoarele ultrasonice în trepte și la cele tip parabolă cubică.

Tot experimental se constată că în funcționare, sistemul nu intră în rezonanță la frecvența calculată, ci întotdeauna la o frecvență mai mică. Printre factorii ce influențează capacitatea de funcționare a sistemului, un rol important îl dețin următorii: calitatea lipirii sau asamblării concentratorului ultrasonic sau a părților componente de transductor; presiunea de apăsare a sistemului transductor – concentrator – element activ pe mediu etc. Toți acești factori conduc la modificarea frecvenței de rezonanță (sistemul lucrează cu rezonanță falsă), implicit la scăderea randamentului de utilizare a energiei ultrasonore, la modificarea focarului de concentrare a energiei ultrasonice și a planelor nodale.

Dacă la transductor se fixează o sarcină m_i , determinată prin cântărire și se măsoară dezacordul relativ al frecvenței de rezonanță ν_i , al sistemului în ansamblul lui, o masă oarecare m , a unui concentrator ultrasonic proiectat va introduce un dezacord relativ de frecvență ν , dat de relația:

$$\nu = \frac{\Delta f}{f_c} = \frac{1}{1 + \nu_i} \frac{1}{\sqrt{m_i}} \sqrt{\nu_i^2 (m_i - m) + 2\nu_i (m_i - m) + m_i} \quad , \quad (5.25)$$

în care: Δf este abaterea de la frecvența de rezonanță, în Hz, măsurată experimental, pentru fiecare instrument de lucru de masă m .

Cunoașterea dezacordului relativ de frecvență este destul de importantă, deoarece ținând cont că fiecare generator de ultrasunete are o bandă de frecvență la care debitează o putere

suficientă, adică are un dezacord relativ de frecvență admisibil v_a , se poate determina valoarea maximă a masei admisibile m_a , cu relația:

$$m_a = m_i v_a (2 + v_a) \frac{1}{v_i^2 + 2v_i} (1 + v_i)^2 \frac{1}{(1 + v_a)^2}, \quad (5.26)$$

Prin urmare trebuie ținut cont în calculul lungimii L a sonotrodului de lucru de influența factorilor enumerați mai sus, introducându-se o corecție Δ'' , dată de relația:

$$\Delta'' = L'_e - L \quad [mm], \quad (5.27)$$

în care: L_e este lungimea efectivă ce se calculează cu relația:

$$L_e = \frac{nc}{2f_r} \Delta' \quad [mm], \quad (5.28)$$

Întotdeauna $f_r < f_e$ și atunci $L_e < L$, astfel că factorul de corecție Δ'' devine:

$$\Delta'' = \frac{nc}{2} \Delta' \left(\frac{1}{f_r} - \frac{1}{f_e} \right), \quad (5.29)$$

Factorul de corecție Δ'' este de ordinul milimetrilor, de aceea, în unele procese de filtrare și purificare are o mare importanță cunoașterea lui pentru a ști precis parametrii acustici ai procesului și pentru a avea posibilitatea de a lucra la un randament maxim.

5.4. METODE DE PROIECTARE RAPIDĂ A CONCENTRATOARELOR DE ENERGIE ULTRASONICA

Deoarece în majoritatea cazurilor calculele sunt foarte complicate și durează destul de mult, și în anumite situații, parametrii enumerați mai sus trebuie respectați cu rigurozitate, au fost întocmite grafice și nomograme care permit o determinare rapidă a principalilor parametri ai instrumentelor de lucru și o proiectare rapidă și riguroasă.

Pentru concentratoarele ultrasonice de tipul 4...11 din tabelul 5.3 au fost întocmite grafice care permit calcularea parametrilor principali necesari în proiectare (fig.5.7. și fig 5.8, a, b, c, și d).

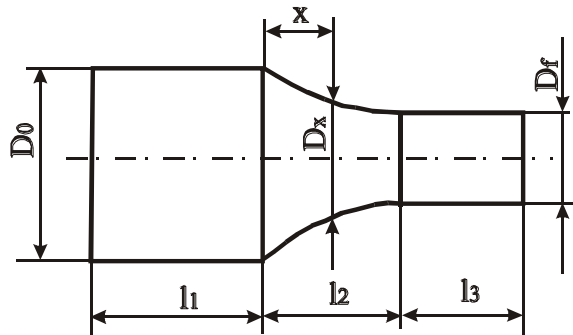
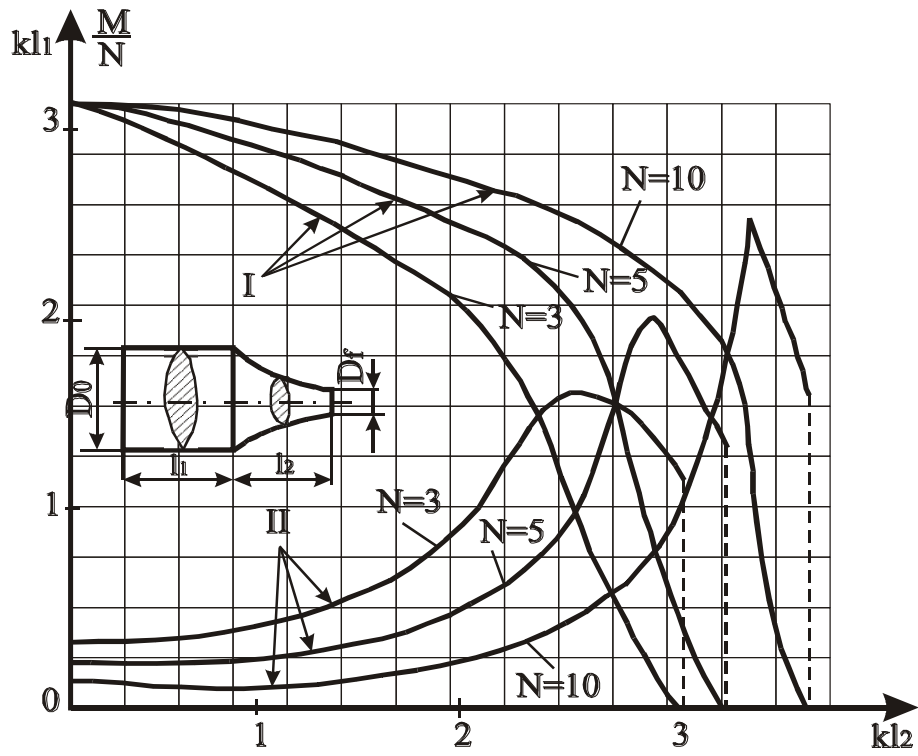
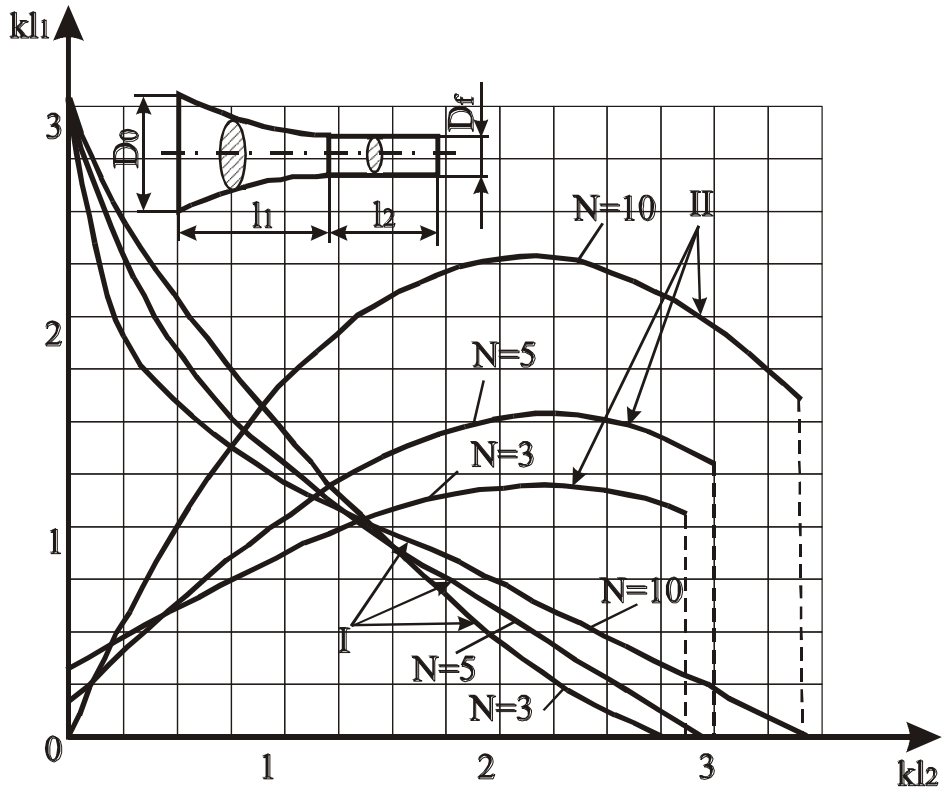


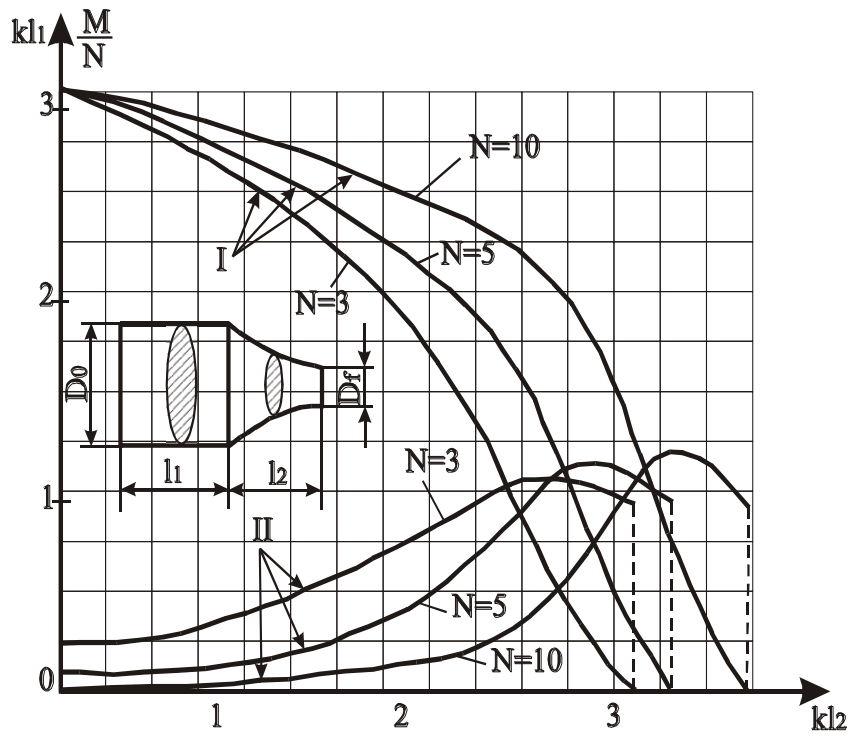
Fig. 5.7. Concentrator combinat



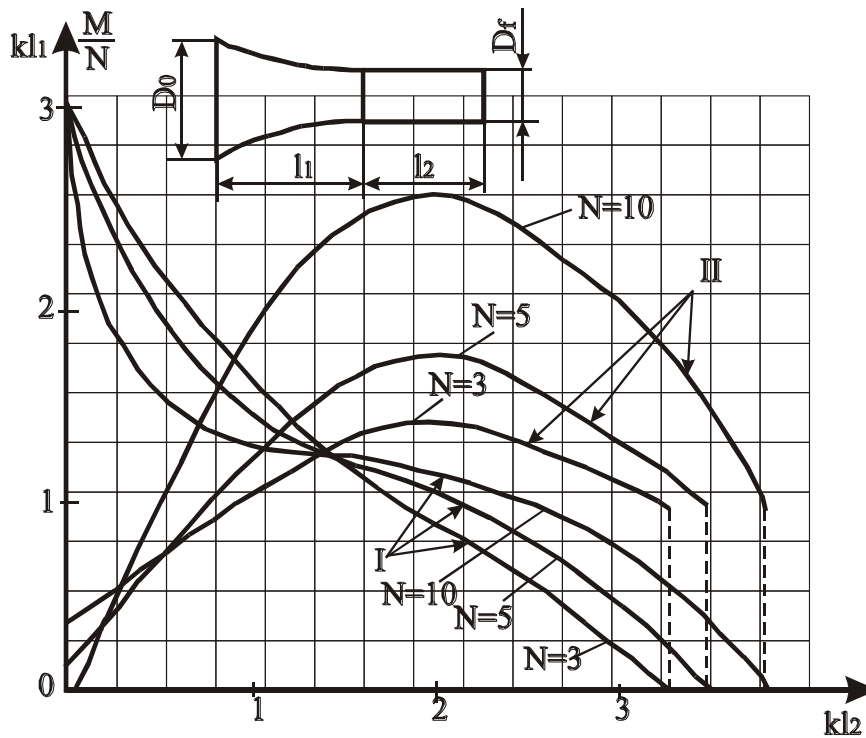
a



b



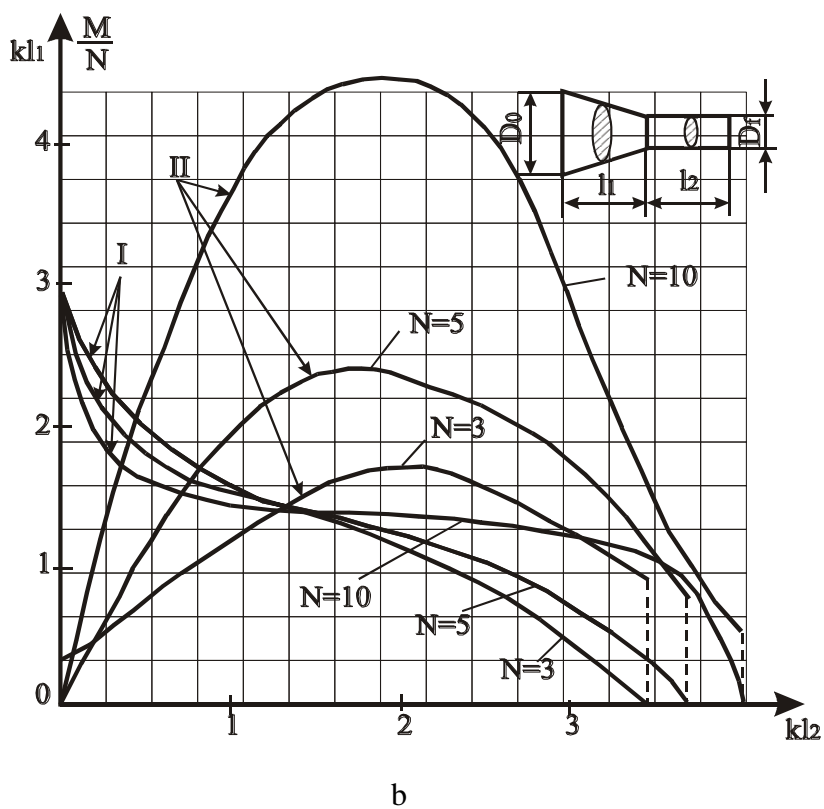
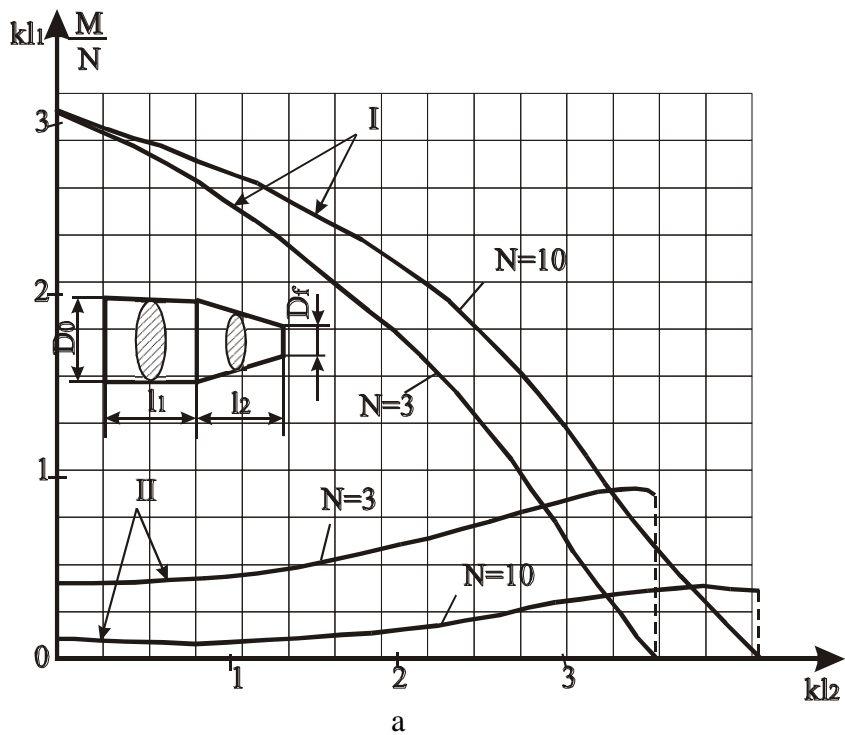
c

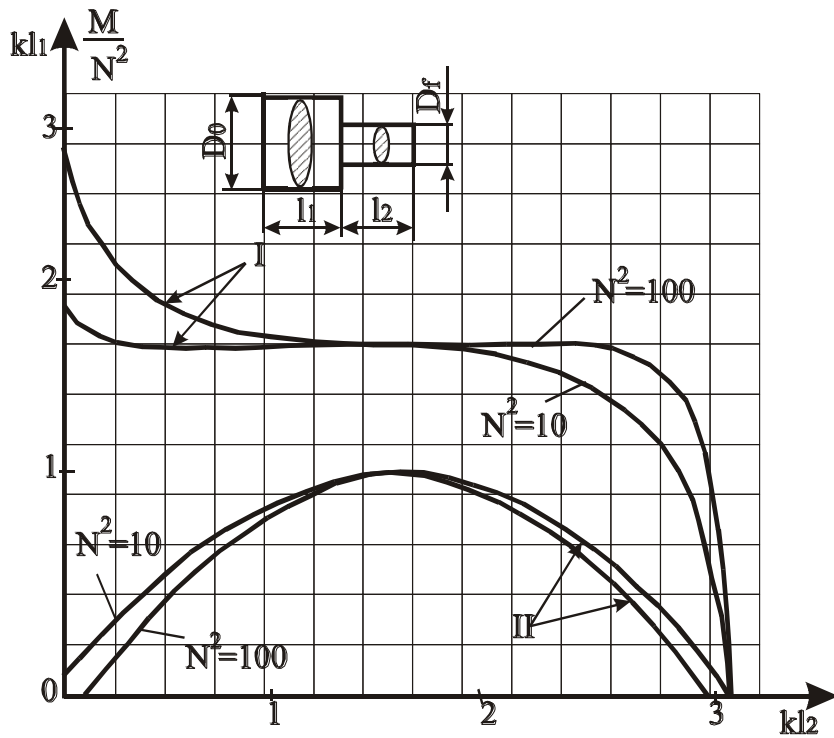


d

Fig. 5.8. *Diagrame pentru determinarea factorului de multiplicare „M” funcție de „N” la diferite tipuri de concentratoare de energie ultrasonică:
I-variația lui „M” funcție de „N”; II-variația lui „kl₁”, respectiv „kl₂”
a- cilindric-exponential; b – exponential-cilindric; c – cilindric-catenoidal; d – catenoidal-cilindric.*

Așa după cum s-a văzut, concentratorul ultrasonic în trepte are cel mai mare factor de amplificare N_r , dar are dezavantajul că are o modificare bruscă a rezistenței de intrare odată cu modificarea frecvenței. Pentru a înlătura acest neajuns cel mai des se utilizează concentratoarele ultrasonice asamblate de tipul prezentat în fig.5.9.





c

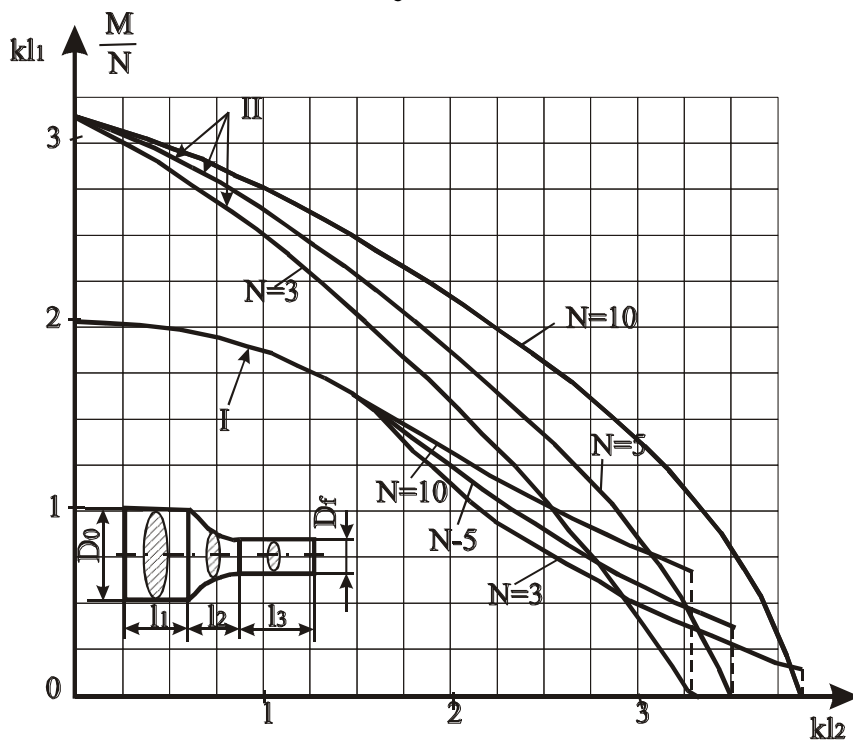


Fig 5.9. *Diagrame pentru determinarea factorului de multiplicare „M” funcție de „N” la diferite tipuri de concentratoare:*

I-variația lui „M” funcție de „N”; II-variația lui „kl₁” funcție de „kl₃”;

a- cilindric-conic; b –conic-cilindric; c –cilindric-cilindric; d –cilindric-exponential-cilindric

Existența porțiunii exponențiale intermediare micșorează concentrația tensiunilor, asigură condiții favorabile propagării undelor ultrasonore, îmbunătățește proprietățile de rezistență și nu

modifică esențial regimul de rezonanță al sistemului de oscilație. Parametrii necesari proiectării care sunt în funcție de natura procesului de filtrare și felul sistemului de oscilație sunt: diametrul final D_f , diametrul inițial D_0 , și factorul de amplificare N . Din figura 5.10, la o valoare aleasă pentru N_r , se pot determina valorile parametrilor n_1 și n_2 după curbele $N_r = f(n_1, n_2)$ corespunzătoare. În dreapta este $N_r = f(n_1)$ și în stânga este $N_r = f(n_2)$.

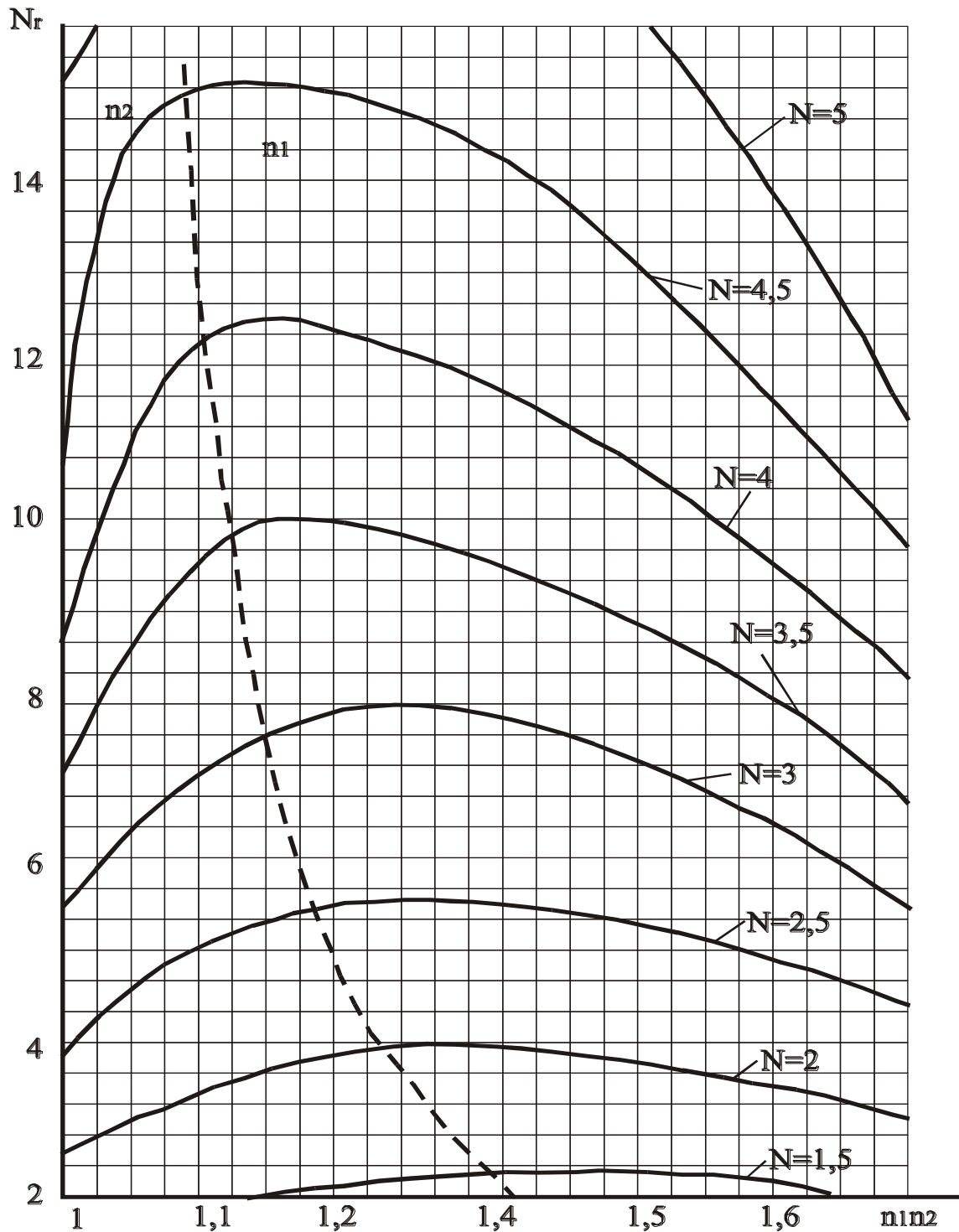


Fig. 5.10. Variația factorului „ N_r ”, funcție de n_1 , n_2 și n_2 .

Cu valorile găsite în grafic se determină lungimile l_1 , l_x și l_3 cu relațiile:

$$l_1 = \frac{c}{2\pi f} n_1; \quad l_x = \frac{c}{2\pi f} \ln N; \quad l_3 = \frac{c}{2\pi f} n_3, \quad (5.30)$$

Au fost construite nomograme pentru determinarea rapidă a lungimilor l_1 , l_x și l_3 (fig.5.11).

Lungimile l_1 , l_x sau l_3 a porțiunii corespunzătoare se găsesc ca fiind ordonata punctului de intersecție dintre verticala corespunzătoare lui n_1 , n_3 sau $\ln N$, cu dreapta înclinată corespunzătoare frecvenței.

Diametrul D_x , al secțiunii porțiunii intermediare se determină cu ajutorul ecuației:

$$D_x = D_0 e^{-\beta x}, \quad (5.31)$$

în care:

$$\beta = \frac{\ln N}{l_x}, \quad (5.32)$$

este coeficientul de variație a secțiunii exponențiale. Atunci când $n_x = 0$, din nomograma reprezentată în figura 5.12 se poate determina D_x , din relația:

$$\lg D_x = \lg D_1 - M\beta x, \quad (5.33)$$

în care M este modulul logaritmilor zecimali.

Pentru cea de a doua categorie de concentratoare ultrasonice foarte des utilizate în cadrul diferitelor procese de filtrare, cele exponențiale, s-au construit o serie de nomograme, ce permit obținerea rapidă a profilului concentratorului ultrasonic respectiv.

Parametrii de la care se pleacă sunt următorii: diametrul final D_f , impus de natura procedurii de filtrare, diametrul inițial impus de porțiunea finală a transductorului, frecvența de rezonanță pentru care este construit transductorul f_0 , factorul de amplificare N și viteza ultrasunetului în materialul din care este confecționat concentratorul ultrasonic.

Ceilalți parametri necesari profilului concentratorului ultrasonic se determină în următoarea succesiune logică cu ajutorul calculatorului electronic. Din figura 5.13 se determină lungimea L , a concentratorului ultrasonic în funcție N și f_0 . Valoarea găsită se verifică cu ajutorul nomogramei din figura 5.14. În funcție de L și factorul de amplificare N , din nomograma reprezentată în figura 5.15 se determină valorile lui $\alpha/2$, iar din figura 5.16 se determină valorile lui $(\alpha/2)x$.

Odată determinați acești parametri cu ajutorul nomogramei din figura 5.17 se determină valorile diametrului secțiunii exponențiale D_x , la distanța x , de secțiunea inițială.

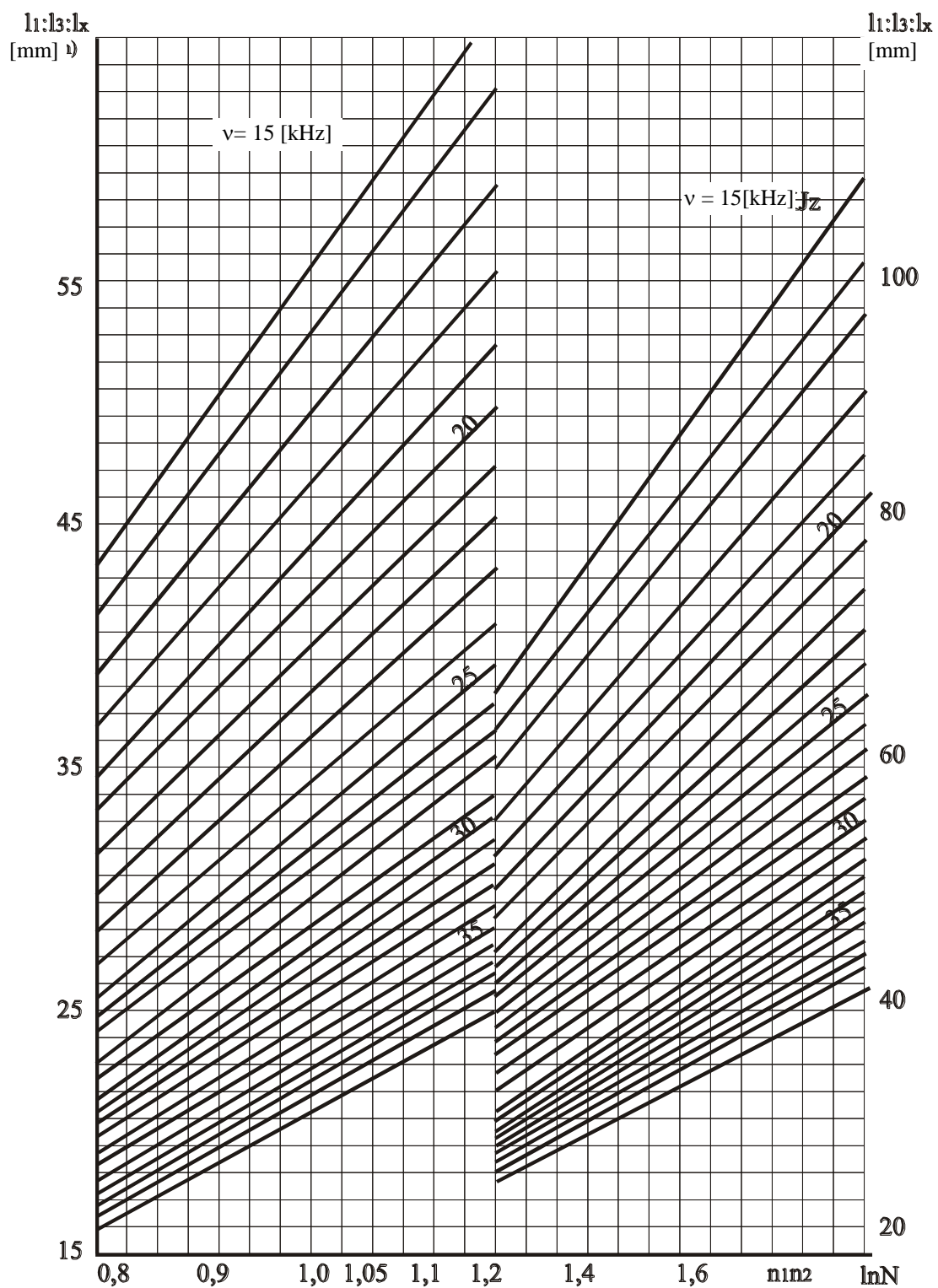


Fig. 5.11. Nomogramă pentru determinarea lungimilor „ l_1 ”, „ l_3 ” și „ l_x ” pentru concentratoare din oțel inoxidabil.

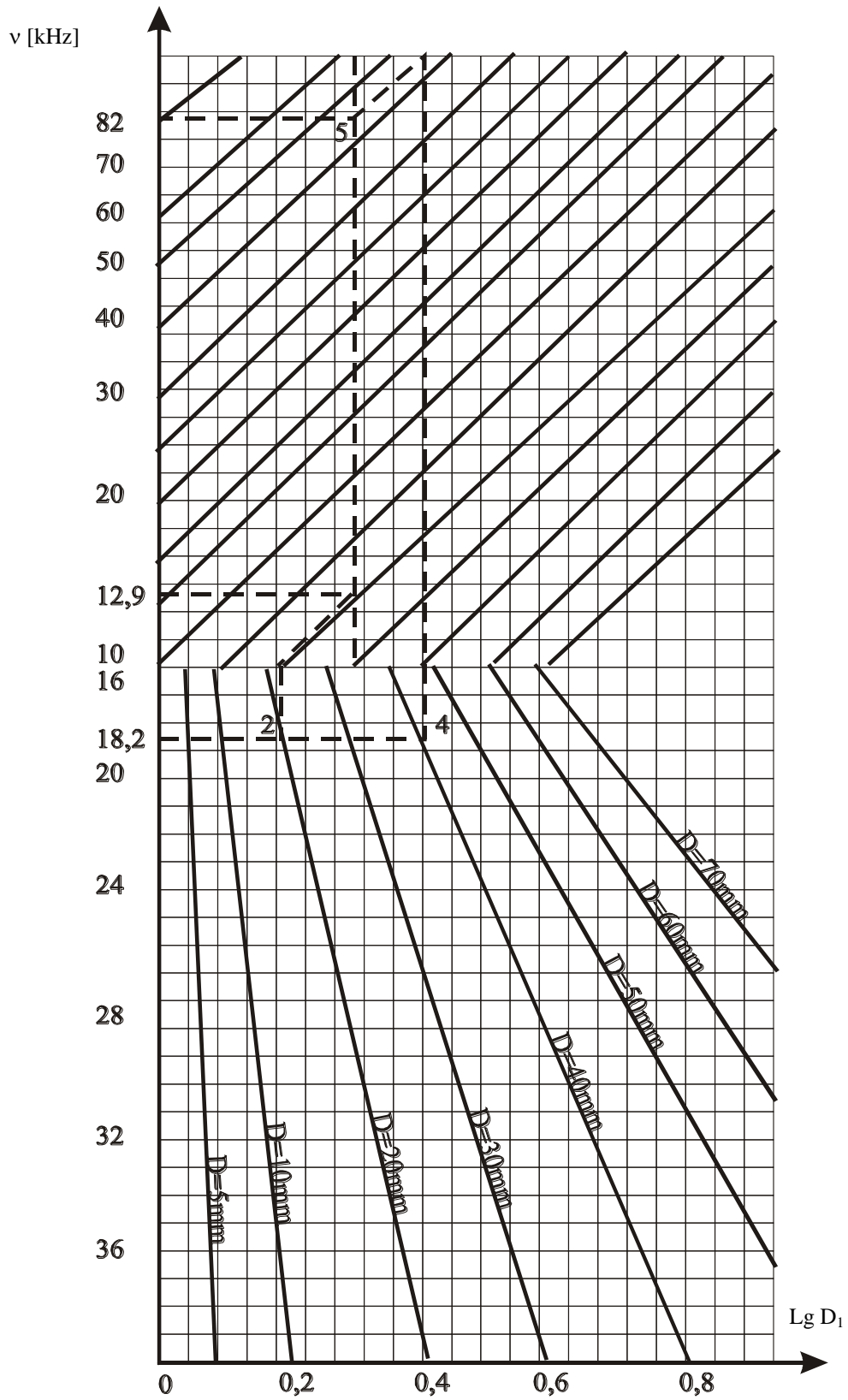


Fig. 5.12. Nomogramă pentru determinarea diametrului „ D_x ” utilizând relația (5.33).

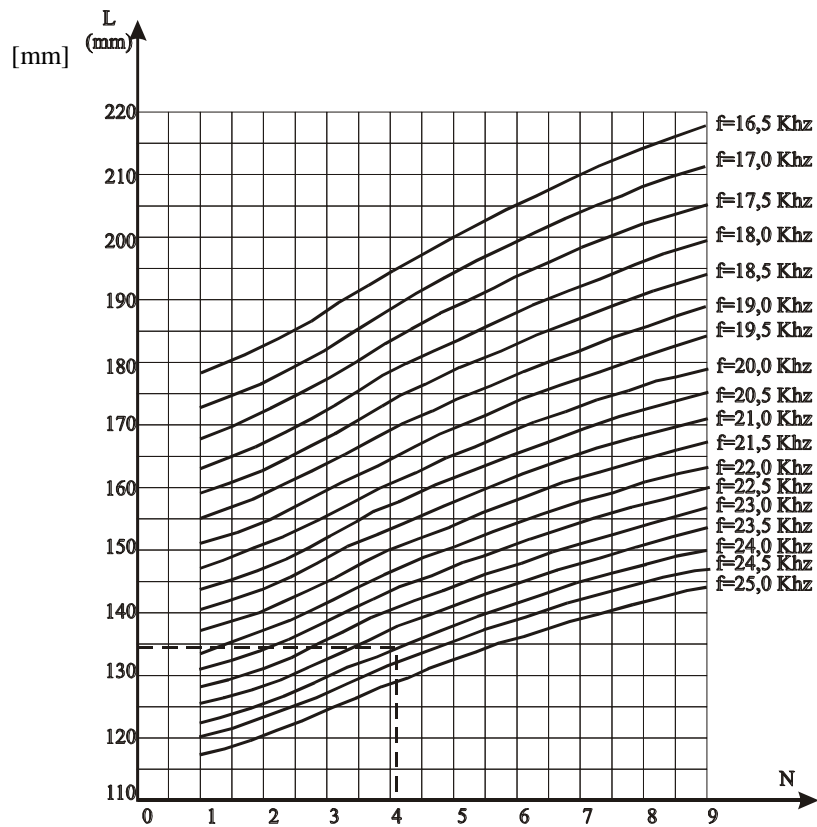


Fig. 5.13. Nomogramă pentru determinarea lungimii „L”, a concentratorului cu variație exponențială a secțiunii, în funcție de „N” și „f”.

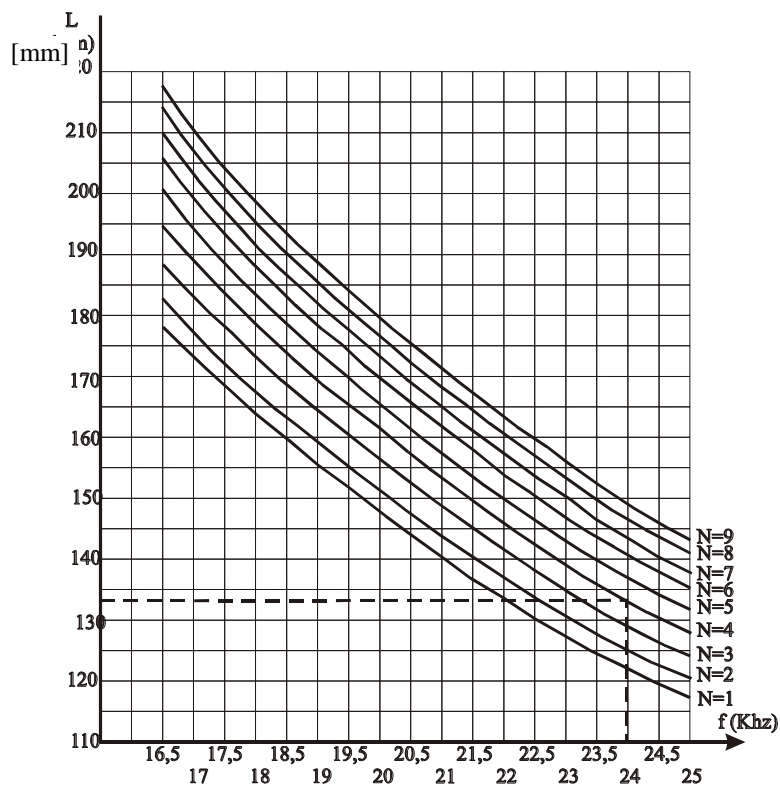


Fig. 5.14. Verificarea lungimii „L”, a concentratorului determinată cu nomograma din figura 5.13.

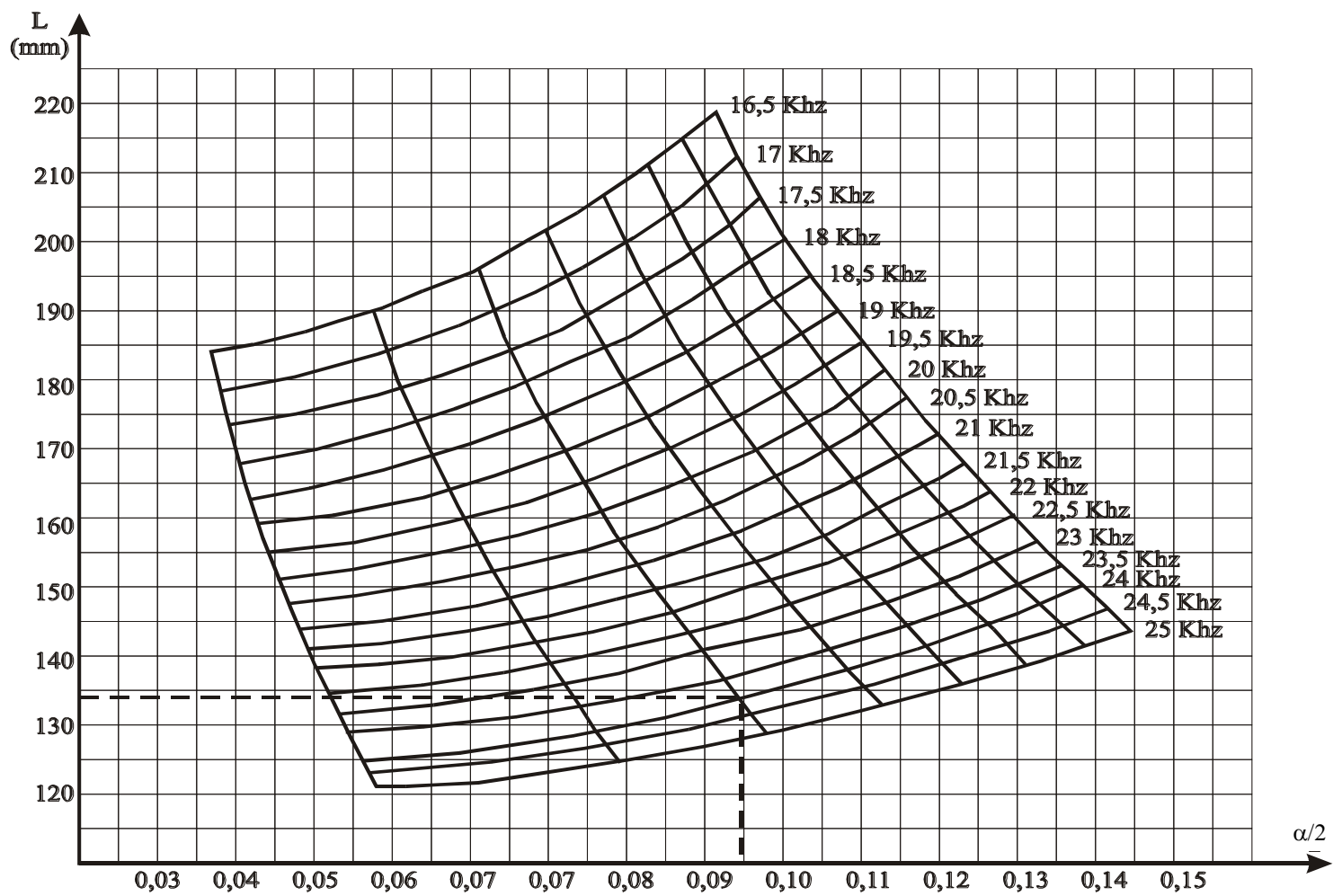


Fig. 5.15. Determinarea valorilor lui $\alpha/2$, funcție de „L” și „N”.

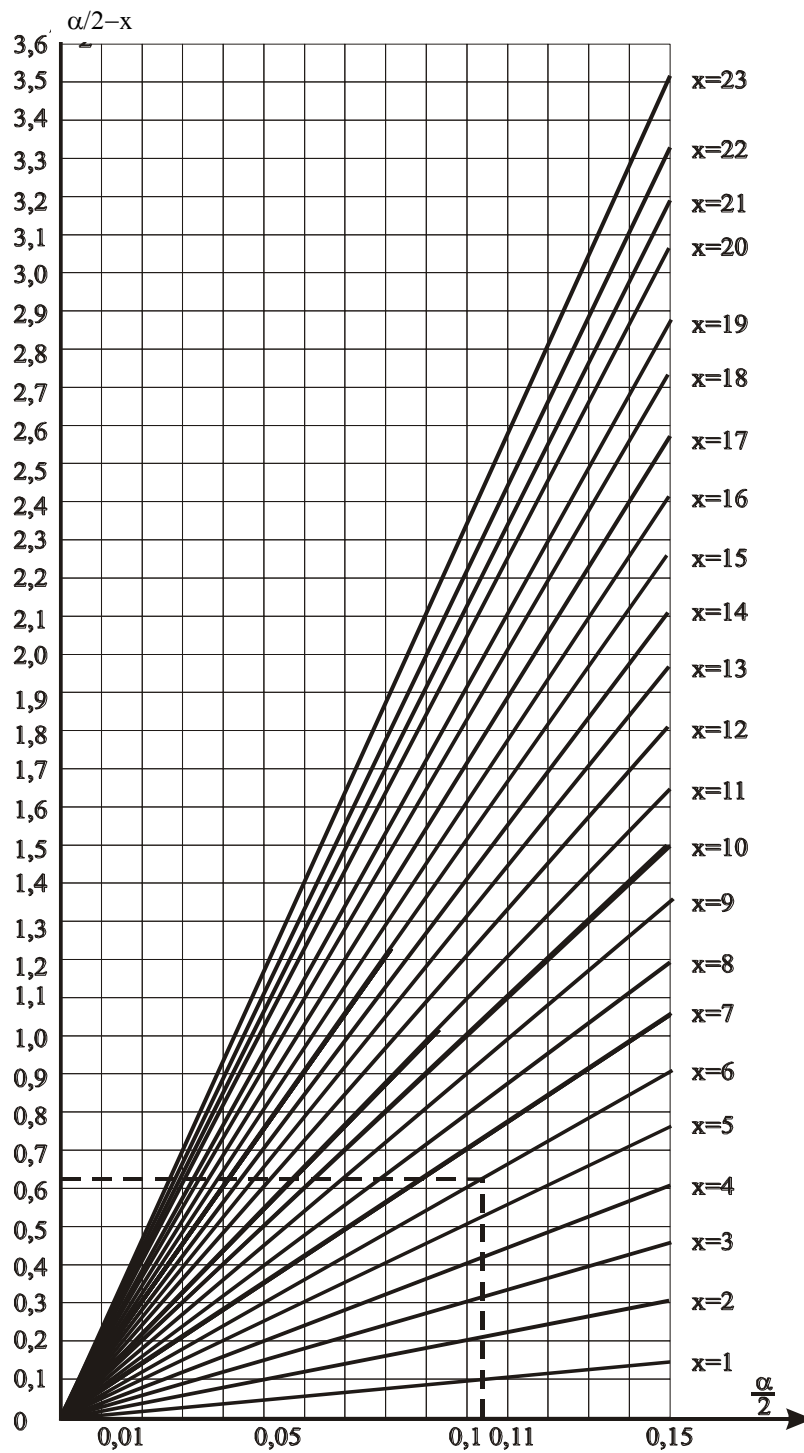


Fig. 5.16. Determinarea lui $\alpha/2$, la diferite distanțe „x”, de originea concentratorului.

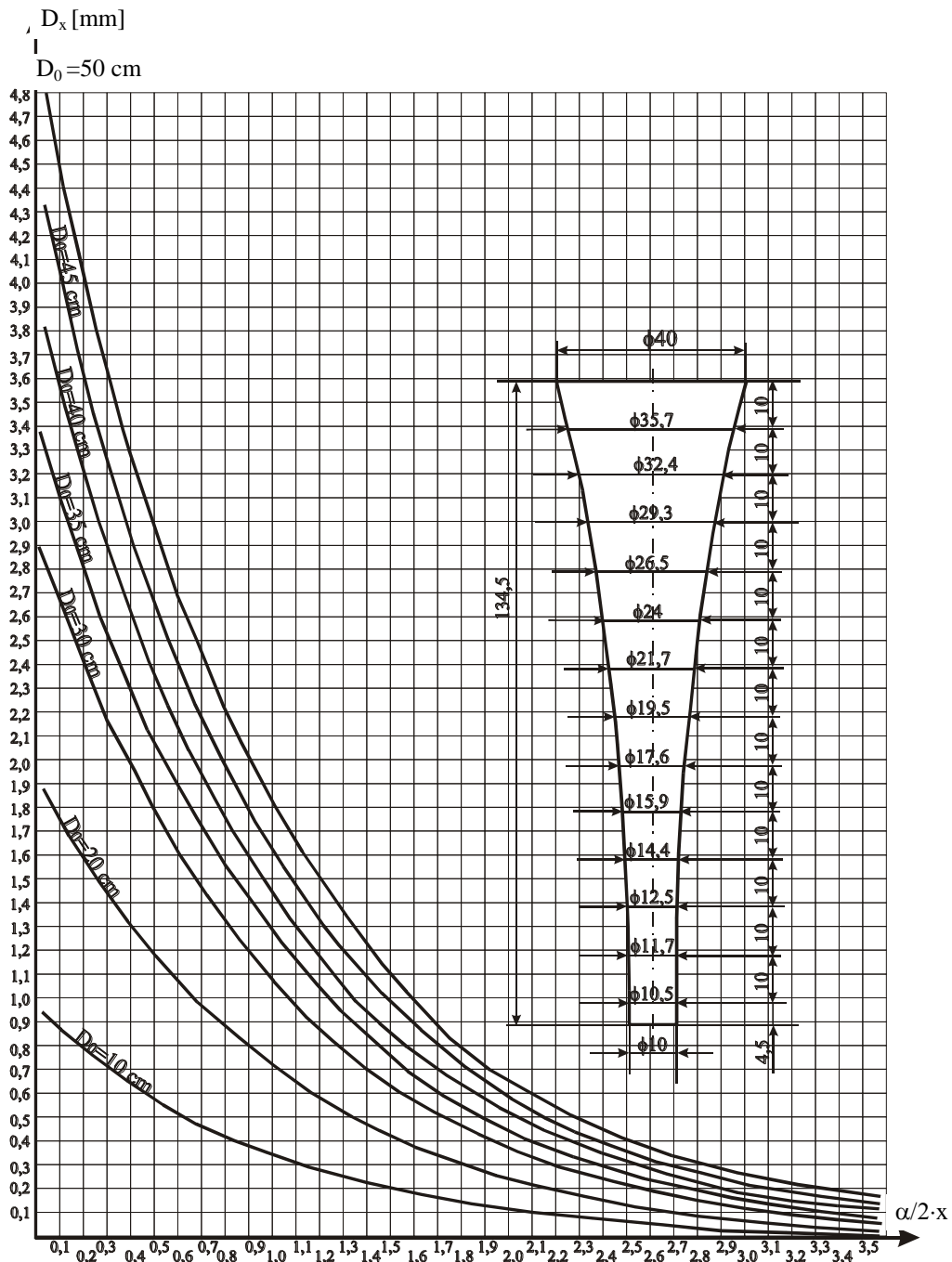


Fig. 5.17. Determinarea valorilor lui „ D_x ” în diferite secțiuni funcție de $\alpha/2$.

Problema generării suprafețelor profilate pe mașini-unelte a constituit întotdeauna o problemă de căutare și care a condus la realizarea mașinilor – unelte cu comandă program.

Datorită faptului că forma este foarte diferită și dimensiunile variază într-o gamă foarte largă preocupările în această lucrare s-au axat pe realizarea unui dispozitiv ușor adaptabil pe orice mașină – unealtă clasică existentă în orice atelier mecanic cu care să se poată genera orice fel de suprafață profilată. Generarea acestor suprafețe se poate realiza prin combinarea celor două mișcări de avans longitudinal și transversal ale sculei cu mișcările piesei. Dispozitivul construit

este format dintr-un element de comandă și un traductor adaptabil pe orice mașină – unealtă, dispozitiv care lucrează pe baza unui program materializat pe un suport port- program. Dispozitivul permite comanda avansului transversal al unei mașini – unelte.

Pentru prelucrarea unui concentrator ultrasonic combinat datorită faptului că trebuie îndepărtat foarte mult material este indicat să se facă degroșarea în mai multe treceri cu adâncime de așchiere constantă, urmând ca finisarea să se facă tot în mai multe treceri, dar cu adâncime mică de așchiere. Pentru obținerea întregii lungimi a generatoarei este necesară îndeplinirea condiției de pantă maximă care leagă viteza de deplasare transversală a cuțitului pentru un impuls v_t , viteza de avans longitudinal a cuțitului v_L și panta maximă a curbei generatoarei.

Pentru un concentrator cu variația exponențială a secțiunii, de forma:

$$D_x = D_0 e^{-\alpha x} \quad , \quad (5.34)$$

panta maximă este dată de relația:

$$\operatorname{tg} \alpha \Big|_{x=0} = \left| \frac{d}{dx} (D_x) \right|_{x=0} = \alpha D_0 \quad , \quad (5.35)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = v_t / v_L$$

Punând condiția ca cele două pante să fie egale se obține:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \gamma \Rightarrow v_L = \frac{v_t}{\alpha D_0} \quad , \quad (5.36)$$

Prelucrarea de finisare trebuie făcută în așa fel încât suprafața concentratorului să aibă o rugozitate $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$, iar stratul superficial să nu sufere o ecruisare accentuată.

5.5. CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND ANALIZA CU ELEMENTE FINITE A UNOR CONCENTRATOARE ULTRASONICE FOLOSITE LA FILTRAREA CU ULTRASUNETE A GAZELOR NATURALE

5.5.1. Modelarea cu elemente finite a ansamblului element intermediar-concentrator

Ansamblul element intermediar-concentrator, utilizat la filtrarea cu ultrasunete este reprezentat în figura 5.18.

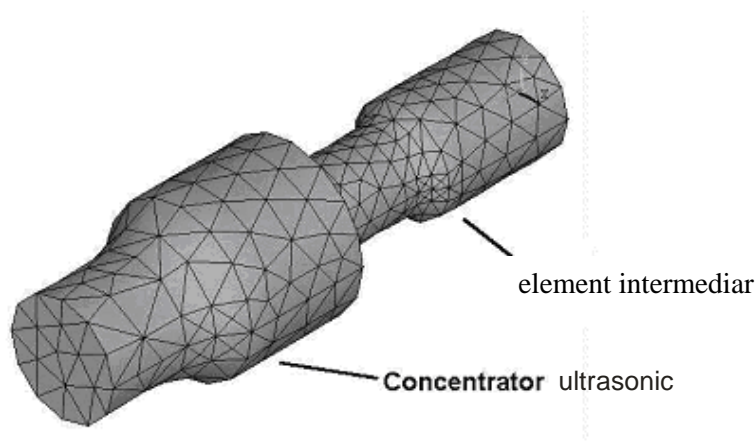


Fig. 5.18. Ansamblul element intermediar –concentrator ultrasonic.

Atât concentratorul cât și elementul intermediar sunt construite din oțel aliat cu titan cu următoarele proprietăți de material:

PROPERTY TABLE EX 0.10200E+12 (MODUL DE ELESTICITATE)
PROPERTY TABLE NUXY 0.30000
PROPERTY TABLE ALPX 0.93600E-05
PROPERTY TABLE DENS 4850.0 (densitate)
PROPERTY TABLE KXX 7.4400
PROPERTY TABLE C 544.00

Din meniul principal se optează pentru tipul de analiză structurală care condiționează și apelarea librărilor cu elementele de discretizare.

Elementul de discretizare ales din librăria ANSYS este SOLID92, care este un element 3-D cu 10 noduri tetraedral solid prezentat în figura 5.19.

SOLID92 3-D 10-Node Tetrahedral Structural Solid

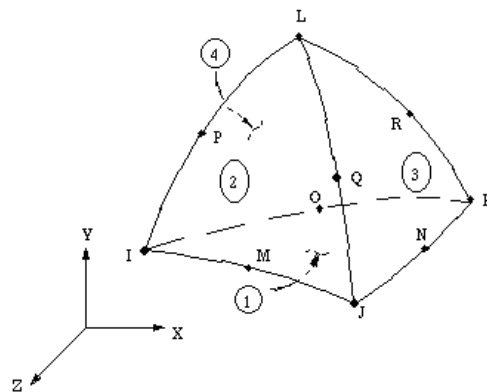


Fig. 5.19. Elementul SOLID 92.

Se activează din meniul principal PREPROCESORUL în care se generează geometria volumului.

Discretizarea cu elementul SOLID92 a acestui volum generează 2968 de elemente cu 4746 de noduri ca în figura 5.20.

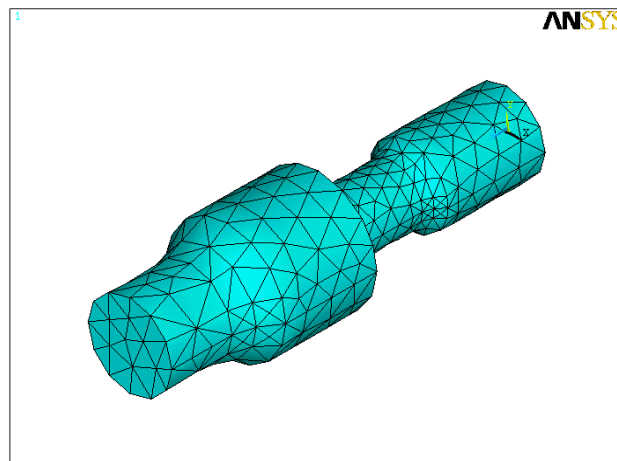


Fig. 5.20. Discretizarea cu elemente finite a volumului ansamblului element intermediar -concentrator.

După activarea procesorului “SOLUTION” se optează pentru tipul de analiză modală. Se obțin frecvențele corespunzătoare unor moduri de vibrație în apropierea frecvenței de rezonanță.

La sfârșitul analizei, prin apelarea POSTPROCESORULUI GENERAL se obțin stările deformată și nedeformată corespunzătoare unor moduri de vibrație pentru frecvențe în apropierea frecvenței de rezonanță.

Reprezentările, prin setările interfeței grafice ale stărilor deformată/nedeformată în vedere izometrică și verticală pentru frecvențele alese, sunt date în figurile 5.21 și 5.22.

În figura 5.21 și 5.22 este prezentat modul de vibrație la frecvența 18520 Hz.

La această frecvență, concentratorul execută în mod preferențial o translație în lungul axei OZ. Valorile deplasărilor sunt prezentate pe o scară de culori corespunzătoare translației pe axa OZ.

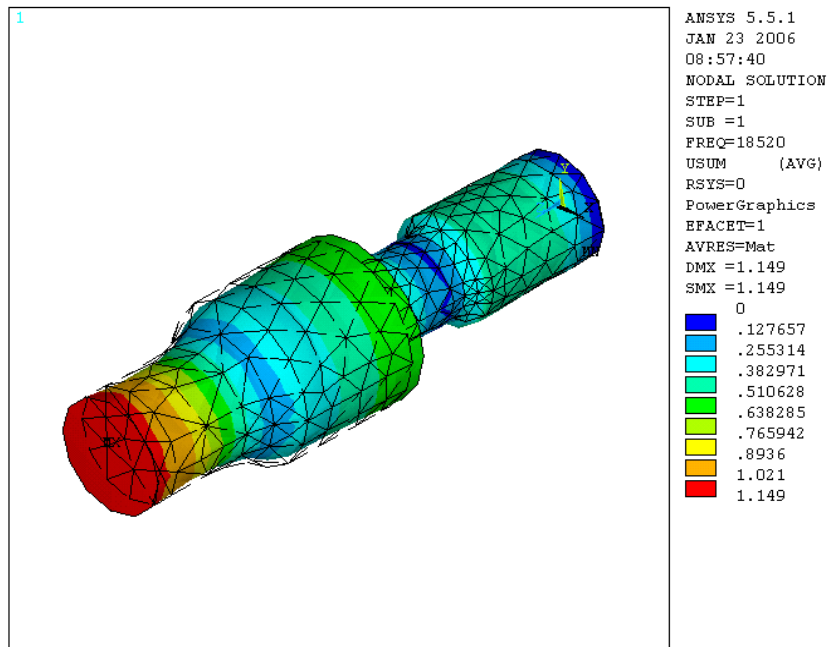


Fig. 5.21. Reprezentarea în izometrie a deformatei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 18520 Hz.

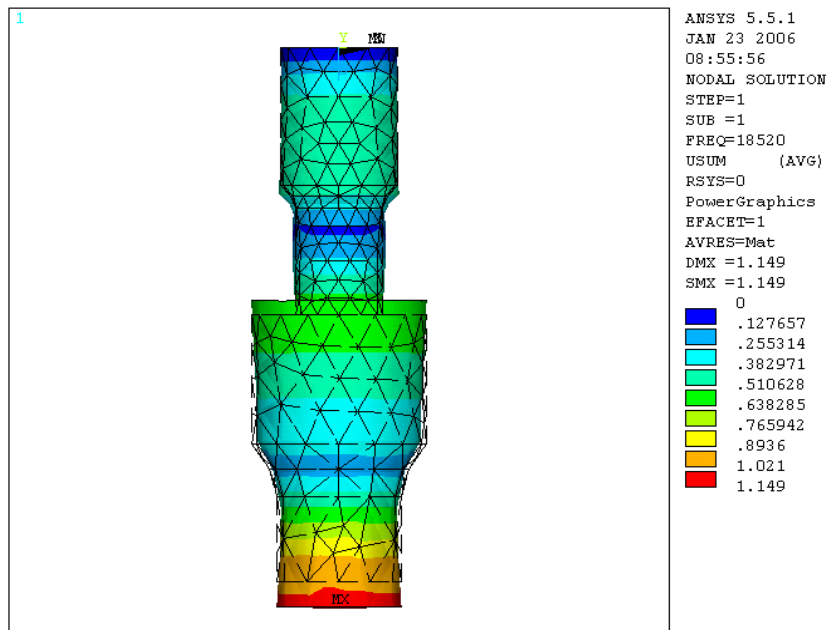


Fig. 5.22. Reprezentarea verticală a deformatei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 18520 Hz.

În figura 5.23 și 5.24 este prezentat modul de vibrație la frecvența 20283 Hz. La această frecvență, elementul intermediar se deformează radial.

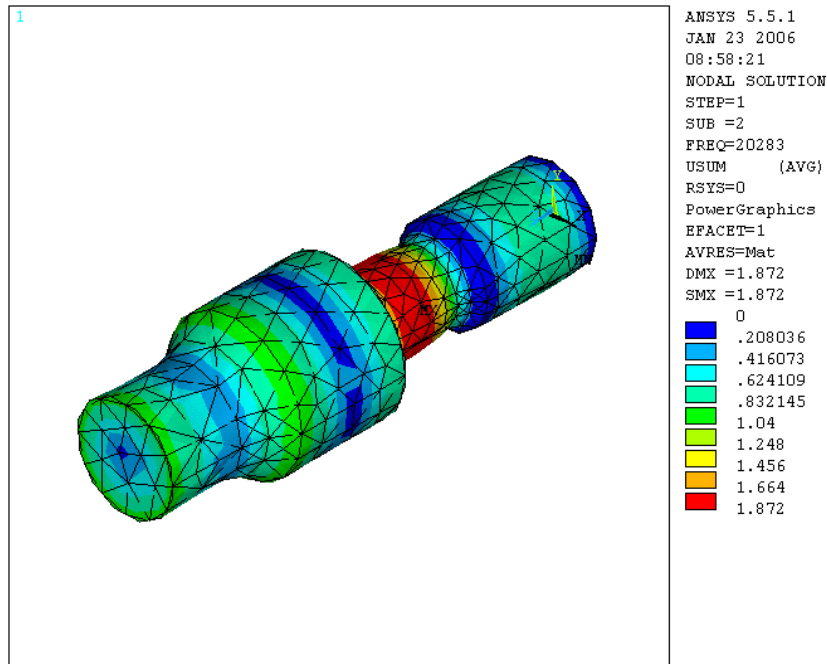


Fig. 5.23. Reprezentarea în izometrie a deformatiei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 20283 Hz.

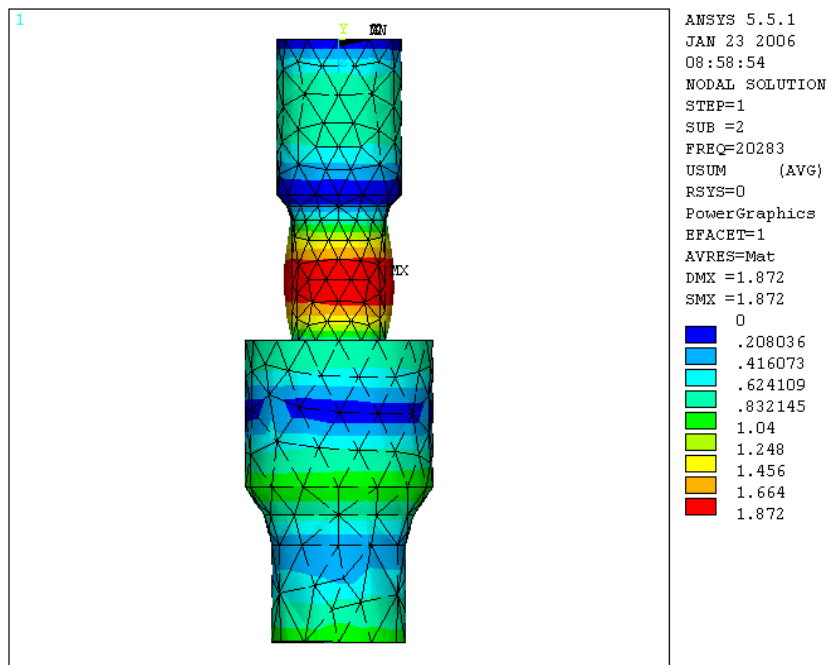


Fig. 5.24. Reprezentarea verticală a deformatiei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 20283 Hz.

În figurile 5.25, 5.26, 5.27 și 5.28 sunt prezentate modurile de vibrație la frecvențele 20464 și 20474 Hz. La aceste frecvențe, concentratorul execută în mod preferențial rotații în planul XY. Valorile deplasărilor sunt prezentate pe o scară de culori corespunzătoare translației pe axa OZ.

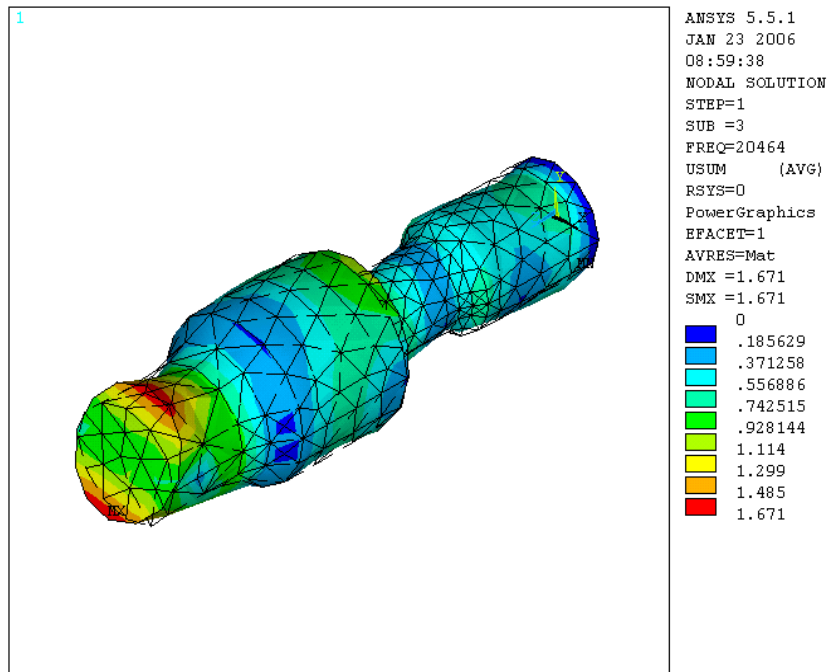


Fig. 5.25. *Reprezentarea în izometrie a deformatiei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 20464 Hz.*

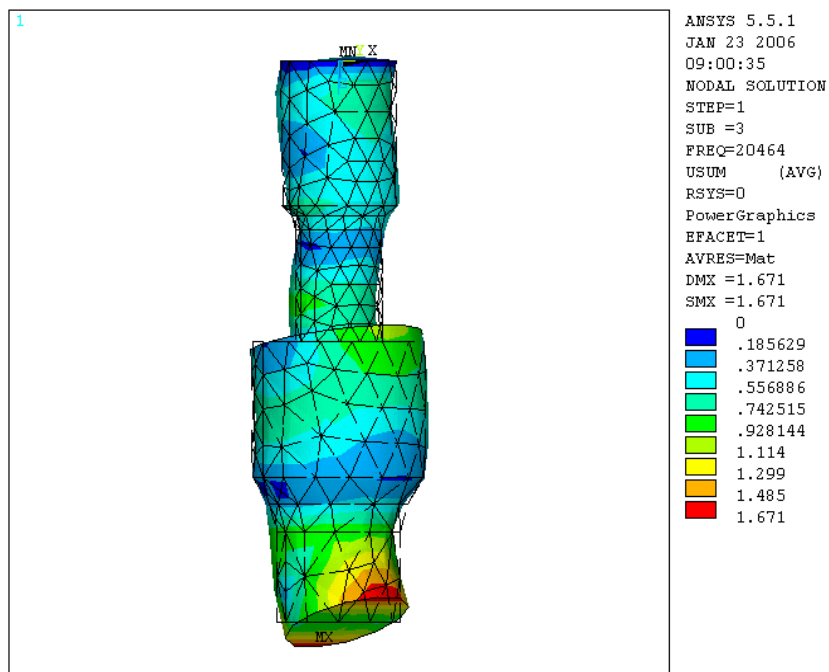


Fig. 5.26. *Reprezentarea verticală a deformatiei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 20464 Hz.*

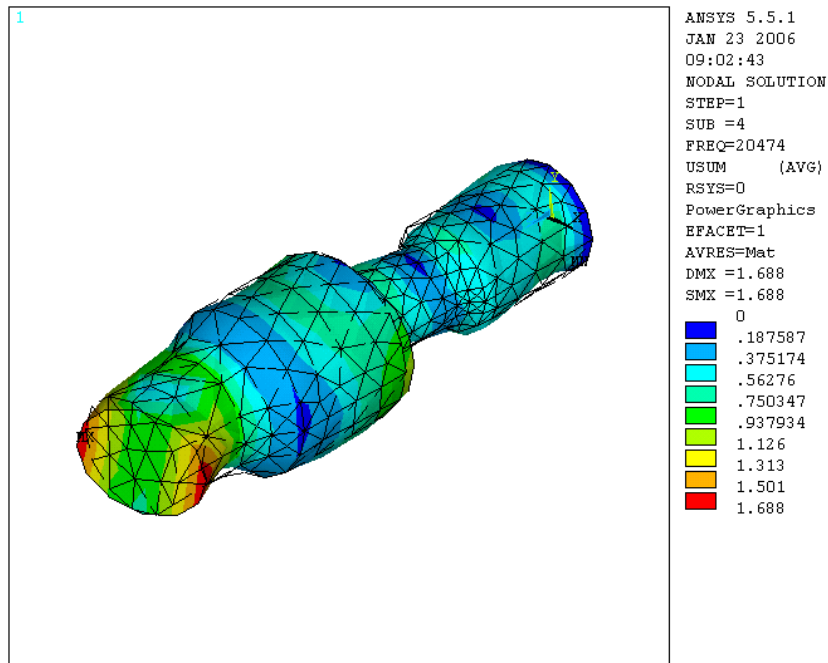


Fig. 5.27. *Reprezentarea în izometrie a deformatiei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 20474 Hz.*

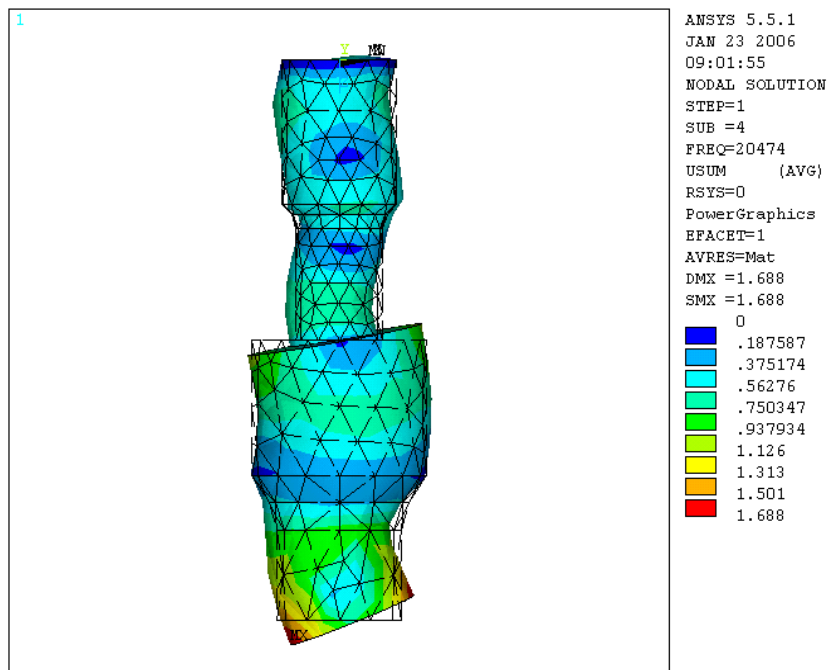


Fig. 5.28. *Reprezentarea verticală a deformatiei/nedeformatei a ansamblului element intermediar-concentrator la 20474 Hz.*

Efectuând analiza armonică a ansamblului element intermediar-concentrator pentru frecvența de rezonanță a sistemului ultraacustic de 20 KHz, cu încărcări de tip deplasare luate din analiza ansamblului piezoceramic rezultă amplitudinea oscilației în noduri selectate de pe generatoarele element intermediar și ale concentratorului (fig.5.29).

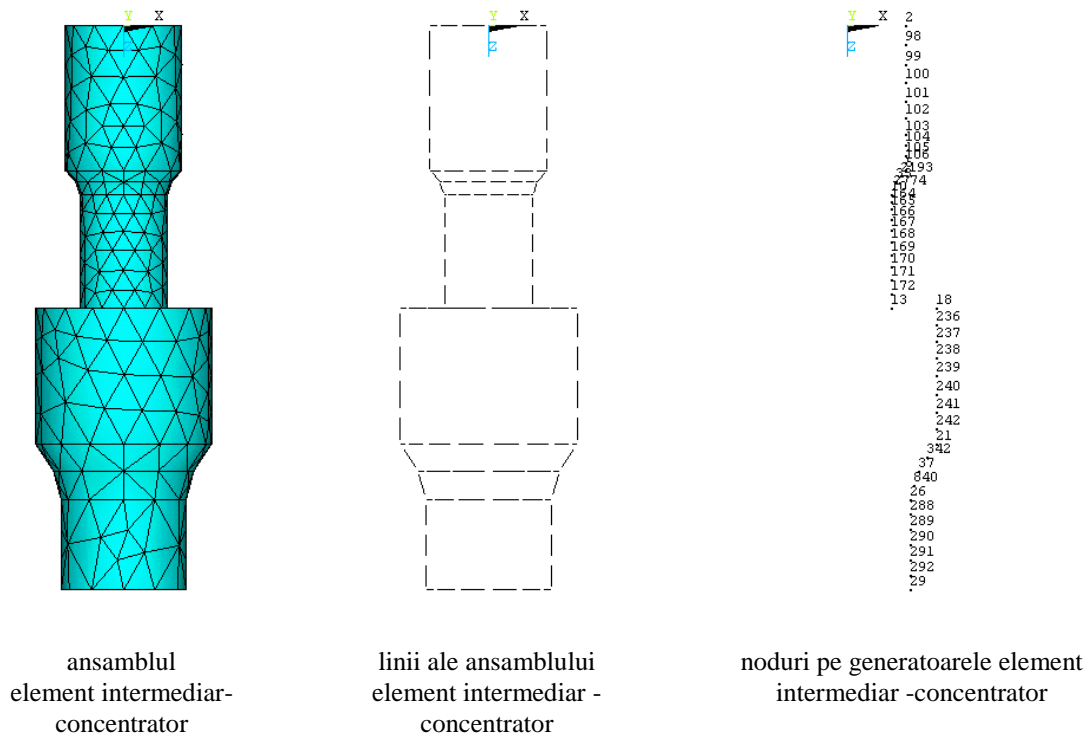


Fig. 5.29. Selectarea nodurilor pe generatoarele element intermediar-concentrator.

În tabelul 5.5. sunt date valorile amplitudinii oscilației în nodurile aflate pe generatoarele ansamblului element intermediar-concentrator.

Tabelul 5.5. Valorile amplitudinii oscilației citite pe generatoarele element intermediar-concentrator.

Nr. citire	Nr. nod	Amplitudinea oscilației [μm]	Nr. citire	Nr. nod	Amplitudinea oscilației [μm]
Booster			Concentrator		
1	2	40.00	25	13	-52.00
2	98	40.75	26	18	-52.00
3	99	39.58	27	236	-69.40
4	100	35.66	28	237	-77.41
5	101	31.79	29	238	-75.52
6	102	25.24	30	239	-72.17
7	103	19.88	31	240	-64.11
8	104	15.42	32	241	-54.13
9	105	11.29	33	242	-45.55
10	106	9.19	34	21	-40.12
11	5	7.80	35	342	-28.47
12	2193	4.60	36	37	-3.95
13	33	-1.31	37	840	24.29
14	2774	-8.19	38	26	55.60
15	10	-15.18	39	288	82.20

Tabelul 5.5. (continuare)

16	164	-23.29	40	289	104.09
17	165	-29.46	41	290	121.18
18	166	-37.76	42	291	133.53
19	167	-45.33	43	292	141.11
20	168	-53.12	44	29	143.72
21	169	-59.79	44	29	143.72
22	170	-64.85			
23	171	-68.07			
24	172	-64.00			

Reprezentarea grafică a valorilor conținute în tabelul 5.5. este prezentată în figura 5.30.

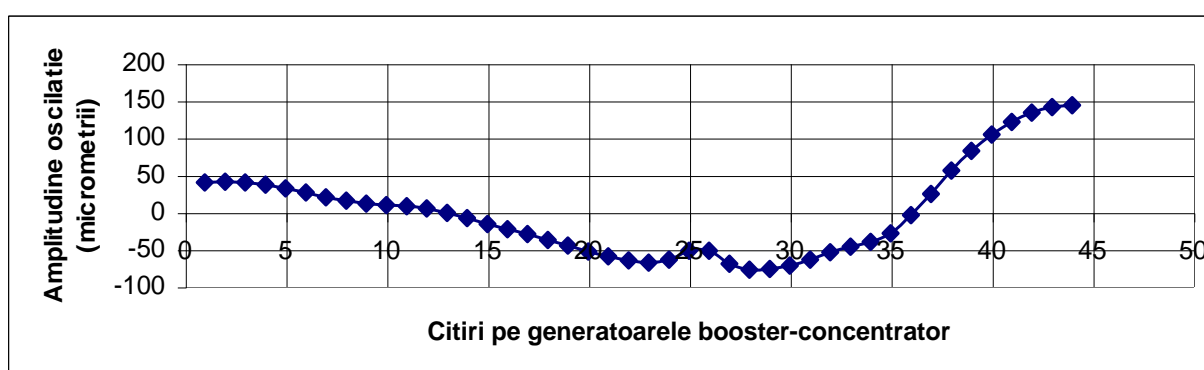


Fig. 5.30. Variația amplitudinii în lungul generatoarelor element intermediar-concentrator.

Rezultatele experimentale obținute au confirmat teoria în sensul unei apropieri foarte bune a valorilor experimentale cu cele de calcul.

Valorile obținute prin măsurători s-au constituit în date de intrare pentru modelarea prin metoda elementelor finite a acestor sisteme de filtrare și purificare. Valoarea maximă a amplitudinii este elementul esențial în optimizarea oricărui proces de filtrare cu ultrasunete, deoarece ea nu dă numai productivitatea și eficiența prelucrării ci și precizia de prelucrare. A fost analizat folosind modelarea prin metoda elementelor finite folosind pachetul ANSYS, modul de comportare al ansamblului element intermediar-concentrator în timpul funcționării și la diferite moduri de vibrație. Mărima amplitudinii la vârful concentratorului, tipurile de undă care se excită în concentrator funcție de raportul dimensiunilor acestuia sunt elemente care definesc eficiența filtrării și calitatea filtrării și purificării.

Cunoașterea mărimii amplitudinii concentratorului de energie ultrasonică este deosebit de importantă deoarece:

- în funcție de mărimea amplitudinii la vârful concentratorului se determină scuturarea ultrasonică;
- mărimea amplitudinii determină parametrii sistemului ultraacustic;
- modelarea prin metoda elementelor finite permite testarea diferitelor forme de concentratoare fără a fi necesară realizarea lor practică;
- permite alegerea formei corespunzătoare pentru procedeul dorit;
- permite apariția fenomenului de aglomerare ultrasonică sau de scuturare ultrasonică.

5.6. VALORI EXPERIMENTALE

Rezultatele încercărilor experimentale

S-a ales ca **funcție obiectiv** frecvența ultrasunetelor și ca **funcție răspuns** masa particulelor filtrate. Filtrul utilizat are diametrul de trecere de 5mm iar timpul fiecărei încercări a fost de $t=1h$. S-au efectuat 10 încercări

Tabelul 5.6. Frecvența ultrasunetelor X1-X10

$$y=f(x_i)$$

X1	16khz
X2	18khz
X3	20khz
X4	22khz
X5	24khz
X6	26khz
X7	28khz
X8	30khz
X9	32khz
X10	34khz

Rezultatele experimentale obținute sunt prezentate în tabelul 5.6. Frecvența ultrasunetelor X1-X10 a fost cuprinsă între 16-34kHz iar masa filtrată are valorile din tabel exprimată în *mg*.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Y1	2.0	2.2	2.5	2.8	3.0	3.1	2.9	2.5	2.4	2.1
Y2	1.9	2.2	2.4	2.7	3.0	3.1	2.8	2.6	2.4	2.1
Y3	1.9	2.3	2.4	2.8	3.1	3.2	2.9	2.6	2.3	2.0
Y4	2.0	2.2	2.5	2.6	3.1	3.1	2.9	2.5	2.2	2.0
Y5	2.1	2.3	2.5	2.6	3.0	3.2	2.8	2.6	2.2	2.1
Y6	2.0	2.3	2.4	2.8	3.2	3.2	2.8	2.6	2.1	2.1
Y7	2.0	2.3	2.5	2.7	3.1	3.2	2.7	2.6	2.3	2.1
Y8	1.9	2.1	2.5	2.8	3.2	3.1	2.9	2.5	2.3	2.1
Y9	1.8	2.0	2.5	2.7	3.0	3.1	3.0	2.5	2.2	2.1
Y10	1.9	2.2	2.5	2.7	3.1	3.1	3.0	2.5	2.4	2.0

Se observă că maximul fenomenului de coagulare al particulelor se situează în jurul frecvenței de 26 khz. Masa cea mai mare filtrată a fost în gama acestei frecvențe.

S-a ales ca **funcție obiectiv** puterea ultrasunetelor utilizate și ca **funcție răspuns** puterea calorică superioară a gazului obținut după filtrare. S-au efectuat de asemenea 10 încercări.

Tabelul 5.7. Ultrasunetelor X1-X10

$$y=f(x_i)$$

X1	100W
X2	120W
X3	140W
X4	160W
X5	180W
X6	200W
X7	220W
X8	240W
X9	280W
X10	300W

Rezultatele experimentale obținute sunt prezentate în tabelul 5.7. Puterea ultrasunetelor X1-X10 a fost cuprinsă între 100-300W iar puterea calorică superioară are valorile din tabel exprimată în *Kcal/mc*.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
Y1	9980	9990	9995	10000	10010	10250	10260	10300	10400	10450
Y2	9985	9995	9996	10000	10010	10250	10250	10350	10400	10450
Y3	9984	9992	9998	10005	10020	10250	10260	10300	10400	10400
Y4	9984	9998	9997	10002	10005	10200	10220	10320	10450	10400
Y5	9985	9997	9995	10003	10005	10200	10200	10320	10450	10420
Y6	9970	9998	9995	10004	10010	10200	10220	10300	10420	10450
Y7	9975	9993	9995	10002	10010	10150	10250	10300	10420	10450
Y8	9980	9992	9998	10005	10010	10150	10260	10310	10450	10450
Y9	9984	9990	9999	10005	10005	10150	10260	10350	10450	10450
Y10	9985	9992	9998	10005	10005	10150	10260	10300	10450	10450

Se observă că maximul puterii calorifice superioare obținute după filtrare se situează în jurul puterii de 300W. Puterea calorifică cea mai mare a fost obținută pentru puterea ultrasunetelor de 300W.

5.7. CONCLUZII

- Intensitatea acustică obținută cu un emițător ultrasonic are o valoare limitată de caracteristicile materialului din care este confecționat de aceea, este necesar să se realizeze într-un volum relativ redus concentrații mari de energie, respectiv densități de energie acustică mult mai mari, care să permită procesul de filtrare cu ultrasunete a diferitelor particule și microparticule;

- Concentratorul de energie ultrasonică, în vârful căruia este elementul filtrant, sau în anumite situații chiar elementul activ trebuie astfel calculat încât să îndeplinească următoarele funcții: conduce energia ultrasonică de la traductor la locul unde se desfășoară procesul de filtrare; concentrează și focalizează energia ultrasonică în zona de filtrat; amplifică valoarea vitezei particulei, mărinđ amplitudinea sculei de lucru și implicit intensitatea acustică; prin forma lui permite o gamă foarte variată de filtrare și excitarea în sistemul ultraacustic a diferitelor tipuri de unde ultraacustice (longitudinale, de forfecare, torsionale, longitudinale-torsionale, de încovoiere etc.); permite susținerea sau fixarea întregului sistem ultraacustic în ansamblul instalațiile de filtrat și purificat, știut fiind că ele au plane în care vibrația particulei este nulă (planele nodale);

- Concentratorul de energie ultrasonică se calculează în așa fel încât întreg sistemul ultraacustic să lucreze în regim de rezonanță pentru ca amplitudinea vitezei particulei să fie maximă în zona activă și deci și intensitatea acustică să fie cât mai mare în zona de filtrat și purificat sau în regim de unde staționare, pentru apariția coalescenței;

- Principalele elemente de calcul ale unui concentrator de energie ultrasonică sunt: factorul de multiplicare; lungimea de lucru; coeficientul ce caracterizează variația secțiunii; forma secțiunii de variație; diametrul în oricare secțiune și profilul în lungul secțiunii; coordonatele punctelor nodale; masa și dezacordul relativ de frecvență;

- În oricare proces de filtrare și deci și în cazul filtrării și purificării cu ultrasunete a gazelor naturale, foarte importantă este cunoașterea mărimii amplitudinii la vârful elementului filtrant și pe întreaga lungime a concentratorului de energie ultrasonică, mărime determinată aprioric realizării concentratorului folosind metoda de analiză cu elemente finite;

- Așa cum s-a văzut în urma analizei cu elemente finite în vârful concentratorului apar mai multe tipuri de oscilații, chiar dacă de exemplu întregul sistem este calculat pentru oscilații longitudinale, vibrații a căror amplitudine diferă de cea principală și afectează mai mult sau mai puțin procesul de filtrare și/sau purificare;

- Analiza cu elemente finite permite proiectarea rapidă a concentratorilor ultrasonici în așa fel încât în mediu să apară fenomenul de “aglomerare ultrasonică” (cazul model staționar) sau de “scuturare ultrasonică” (cazul lucrului în regim de rezonanță).

CAPITOLUL VI

CONCLUZII FINALE CONTRIBUȚII ORIGINALE. TENDINȚE ȘI PERSPECTIVE ALE CERCETĂRII ÎN DOMENIU

6.1. CONCLUZII FINALE

Creșterea siguranței în exploatare, reducerea riscului tehnic atașat sistemului de transport, reglare, măsurare, analizare și distribuție a gazelor naturale până la consumatorul final necesită realizarea operațiilor de filtrare, de reglare în mai multe trepte, în mai multe etape și ori de câte ori procesul tehnologic de utilizarea a gazelor naturale o cere.

Sistemul național de transport a gazelor naturale este alcătuit în prezent din 13110 km de conducte, magistrale de transport și racorduri de alimentare, acest sistem fiind prevăzut cu 21 stații de compandă a vanelor și/sau noduri tehnologice, 961 stații de reglare-măsurare și/sau măsurare a gazelor preluate prin import, 6 stații de măsurare amplasate pe conductele de tranzit, 6 stații de comprimare a gazelor, 857 stații de protecție catodică a conductelor, 575 instalații de odorizare a gazelor și milioane de consumatori. Pe tot parcursul acestui sistem de transport trebuie să circule gaze naturale cu o anumită puritate și cu un anumit grad de filtrare, funcție de locul unde se găsește în raport cu consumatorul final.

Utilizarea eficientă a gazelor naturale în toate domeniile unei economii presupune purificare și filtrarea acestora corespunzător cu cunoștințele consumatorului final, de aceea, cercetările cuprinse în această teză de doctorat au condus la următoarele concluzii principale:

➤ Gazele naturale sunt amestecuri de gaze cu compoziția chimică variabilă, în funcție de depozitul subteran din care sunt extrase, în care componenta principală (de peste 90%) este metanul (CH₄), iar celelalte componente sunt hidrocarburi gazoase (etanul, propanul, butanul și altele);

➤ Pe lângă hidrocarburile gazoase, gazele naturale mai conțin și alte gaze precum: azotul, hidrogenul, oxigenul, argonul, heliul, dioxidul de carbon, hidrogenul sulfurat, compuși organici volatili, oxizi ai azotului, oxizi ai sulfului și alte gaze în proporții mai mici;

➤ În faza de extracție, gazele naturale antrenează elemente din noroiul de foraj și particule neconsolidate din roca magazin, de diferite forme și mărimi, de diferite naturi și compoziții chimice;

➤ Pentru o utilizare eficientă, pentru reducerea riscului tehnic atașat transportului și distribuției gazele naturale la consumatorul final, pentru exploatarea avantajoasă și fără pericolul apariției accidentelor este necesară filtrarea și purificarea g.n., la calitatea cerută de consumatorul final.

➤ Siguranța funcționării întregului SNTGN depinde în primul rând de calitatea gazelor naturale, de construcția, exploatarea și întreținerea sistemului de transport și de puritatea gazului natural pe tot traseul lui de la capul de extracție până la consumatorul final;

➤ Curățarea gazelor de impurități mecanice (nisip, noroi, sfărâmături de rocă) și lichide, după ieșirea din sondă se efectuează în recipiente metalice sub acțiunea următorilor factori: forța gravitațională, schimbarea bruscă a direcției curentului de gaze, contactul dintre curentul de gaze și o suprafață lichidă sau una solidă umedă, trecerea gazelor prin filtre, membrane etc.;

➤ Efectul de coroziune al gazelor naturale asupra conductelor de transport depinde de: natura particulelor, densitatea particulelor, forma și rugozitatea suprafețelor acestora, viteza de

antrenare, masa particulelor și presiunea gazelor naturale, temperatura mediului și existența particulelor lichide;

➤ Experimental s-a constatat că viteza limită de cădere a particulelor solide este funcție de diametrul particulelor și presiunea gazului purtător;

➤ Impuritățile solide sunt de diferite forme și dimensiuni, depinzând în primul rând de locul unde se face analiza gazelor natural de transportat, astfel: la capul de extracție există: nisip, noroi, sfărâmături de rocă și diferite lichide; pe traseul conductelor de transport: praf, particule solide și lichide, pulberi și oxizi; înainte de consumatorul final: particule și microparticule solide și lichide;

➤ Separatoarele de impurități solide trebuie să fie montate cel puțin în următoarele locuri: în câmpurile de producție (la capul de extracție); înaintea stațiilor de uscare a gazelor; după stațiile de uscare a gazelor la care se utilizează desiccant solid; înaintea stațiilor de reglare și măsurare; la utilizatorii de gaze naturale cu procese tehnologice pretențioase (chimizare, tratamente termice, industria sticlei și porțelanului, industria farmaceutică etc.);

➤ Principalele metode de reținere a particulelor solide, utilizate frecvent sunt: mecanice, având la bază ionizarea particulelor în câmp electric; strat poros, utilizând caracteristicile curgerii fluidelor reologice; hidraulice, utilizând principiile spălării;

➤ Filtrarea gazelor este operația prin care reținerea particulelor de praf se realizează prin trecerea gazelor prin suprafețe poroase, ale căror intensități (pori) au dimensiuni stabilite în funcție de adâncimea de separare (gradul de reținere) dorită, particulele fiind reținute pe suprafața poroasă a elementului filtrant;

➤ Filtrele pot avea o eficiență ridicată, reținând până la 99% din particulele solide fine, mai ales dacă se utilizează soluția în două trepte sau combinații de separatoare și filtre;

➤ Un parametru important este căderea de presiune pe filtru curat, care poate varia, în funcție de construcția filtrului, în gama 0,1...1,5 bar, în situația în care căderea de presiune crește peste valoarea adusă sau este nulă, atunci este considerată situație de avarie și cartușul filtrant trebuie schimbat;

➤ La oricare filtru în strat poros, porii tesăturii sunt înfundați de primele particule de praf reținute, vâscozitatea dinamică a gazelor crește și căderea de presiune crește, are loc colmatarea filtrului și este necesară înlocuirea lui cu unul curat sau curățarea lui;

➤ Curățarea se poate realiza după scoaterea din funcționare a filtrului prin scuturare sau suflare cu aer în sens invers față de curentul de gaz, operație ce presupune timp și întreruperea sistemului de transport al gazelor naturale;

➤ Filtrele ceramic au randamente de filtrare ridicate, dar căderea de presiune depinde atât de dimensiunile porilor cât și de structura granulometrică a materialului din care este confecționat, ele fiind necomandate pentru debite relativ mici;

➤ Desprăfuitoarele prin spălare au un foarte bun randament de separare, dar trebuie să funcționeze într-un regim strict delimitat de debite și viteze, altfel există riscul ca uleiul, cu praful colectat să fie antrenat dincolo de șicanele de dezuleiere, cu pierdere de ulei și cu scăderea eficacității de desprăfuire;

➤ Filtrele electrostatice lucrează prin ionizarea particulelor solide și apoi colectarea lor pe o suprafață colectoare de formă tubulară sau plată, curățată apoi prin răzuire. Pentru reținerea combinată a prafului și a altor substanțe gazoase nocive se folosesc filtre electrostatice umede, la care are loc mai întâi stropirea gazului natural impurificat;

➤ La alegerea sistemului de desprăfuire influențează: dimensiunea particulelor ce trebuie reținute, temperatura gazului purtător, pierderea de presiune în aparat, dimensiunile aparatului, gradul de reținere a impurităților, eficiența reținerii particulelor și costurile anuale de întreținere;

➤ Defectele apărute la diferitele subansamble componente ale liniilor de filtrare (robineți, monometre, termometre, supape, vane etc) se remediază de către echipa de intervenție autorizată conform instrucțiunilor specifice;

➤ Operațiile de verificare la o instalație de filtrare sunt: verificarea căderilor de presiune pe filtru datorate îmbâcsirilor elementelor active; verificări ale emanațiilor de gaze pe la garniturile flanșelor de racordare a filtrului; verificarea funcționării sistemului de evacuare; verificarea depunerilor de impurități în secțiunile minime de trecere a gazelor pe traiectul instalației de filtrare; verificarea etanșității și funcționalității dispozitivelor de evacuare, de aerisire, a robinetelor și supapelor aferente filtrelor.

➤ Operația de filtrare depinde de foarte mulți factori, cei mai importanți fiind următorii: natura și locul de extracție a gazelor naturale; natura zăcămintului și a rocilor magazin; presiunea de erupție și presiunea de intrare în aparat; debitul de gaze naturale transportat și cerut; natura și dimensiunile particulelor solide; forma și mărimea particulelor solide și lichide; debitul de gaz și densitatea de praf antrenată; temperatura de exploatare; adâncimea de filtrare; nivelul de filtrare; regimul de funcționare;

➤ La vitezele mari cu care curg gazele și particulele de praf antrenate se produce evadarea scaunelor și sertarelor vaselor și acestea nu se mai închid, erodarea scaunelor și ventilelor aparatului de reglare și de siguranță și acestea nu mai reglează corect, respectiv nu mai funcționează corespunzător, înfundarea și erodarea orificiilor calibrate ale instalațiilor de măsurare și control și acestea conduc la erori, care nu pot fi evaluate cantitativ etc;

➤ Limitarea vitezei de curgere a gazelor naturale prin conducte, recomandată de unii autori, pentru evitarea evaporării, nu mai poate fi luată în considerare în condițiile țării noastre deoarece conductele sunt deja în exploatare și capacitatea lor nu mai poate fi modificată la latitudinea noastră, rămânând alte soluții pentru acestea;

➤ Experimental și teoretic s-a constatat că viteza medie a gazului pentru care particulele de praf încep să plutească este de peste două ori mai mare decât viteza de la care particulele de praf încep să fie antrenate;

➤ Cele mai importante dezavantaje ale procedeelor clasice de filtrare și purificare sunt: necesitatea curățirii periodice a elementelor filtrante care se colmatează; imposibilitatea reținerii tuturor particulelor solide și lichide, cele rămase constituind un agent de corodare agresiv al tuturor părților cu care gazele naturale vin în contact prin conductele de transport, în aparatura de măsură, control și distribuție; pierderea depresiune variabilă; costurile de exploatare și întreținere ridicate;

➤ Particularitățile propagării undelor ultrasonice în mediul de gaze naturale care antrenează particulele solide și lichide, depind de fenomenele și efectele ce apar datorită creării câmpului ultrasonic și anume: viteza de propagare; comprimarea și rarefierea mediului în funcție de natura undelor ultrasonice; reflexia și refracția undelor ultrasonice la interfața gaz – solid; crearea de unde staționare și apariția de noduri și antinoduri de presiune; difracția și difuzia undelor ultrasonice; atenuare energiei ultraacustice; absorbția ultraacustică; cavitația ultrasonică etc;

➤ Proiectarea unui filtru ultrasonic în așa fel încât în el să existe unde staționare permite reținerea celor mai fine particule de praf deoarece în antinodurile de presiune apare fenomenul de coalescență care presupune adunarea particulelor fine într-o particulă mai mare ($>10 \mu\text{m}$) care nu mai reprezintă o problemă de reținere, astfel încât un filtru ultrasonic are o adâncime de reținere de aproape 100%;

➤ Pe timpul propagării undelor ultrasonice în mediu gazos se produc compresiuni și rarefierii și temperatura în zona de compresiune devine mai ridicată decât în zona de rarefiere și prin urmare în zona de depresiune are loc extragerea apei din mediu iar în zona de compresiune are loc vaporizarea ei;

➤ Prin „aglomerarea ultrasonică” a particulelor fine, masa inițială a acestora crește prin coalescență de 2500...3500 ori în comparație cu masa particulelor primare, purtând fi captate cu ușurință de elementul filtrant;

➤ Prin „scuturare ultrasonică” se evită fenomenul de îmbâcsire al cartușului filtrant sau de colmatare a acestuia, realizându-se curățirea în timpul funcționării, fără a necesita întreruperea transportului gazelor și demontarea filtrului;

➤ Pentru o adâncime de filtrare maximă, o eficiență sporită a procesului de filtrare și purificare este necesară o succesiune logică de filtre ultrasonice montate corespunzător cu posibilitățile acestora de a reține în totalitate particulele solide, de a elimina particulele de apă și de a usca gazele naturale ce trec prin aceste filtre;

➤ Partea cea mai importantă a oricărui filtru ultrasonic este sistemul ultraacustic care trebuie calculat, proiectat și executat în așa fel încât să producă un câmp de unde staționare (cazul filtrelor ciclon ultrasonice) sau să lucreze în regim de rezonanță (cazul celorlalte tipuri de filtre);

➤ Un filtru ultrasonic intră în funcțiune automat în momentul în care căderea de presiune a ajuns la o anumită limită (reglată anterior) aceasta punând în funcțiune generatorul ultrasonic, respectiv sistemul ultraacustic care produce scuturarea ultrasonică a elementului filtrant până când căderea de presiune este cea inițială;

➤ Un filtru ultrasonic nu necesită demontare și curățare periodică, durata de funcționare a lui fiind dată de durata de viață a elementului filtrant care este supus fenomenului de „scuturare ultrasonică” ori de câte ori este nevoie.

➤ Transductorul ultrasonic este aceea parte a sistemului ultraacustic ce realizează transferul de energie ultrasonică de la generator la focarul de prelucrare (în zona de filtrare), astfel încât într-o mare măsură randamentul și performanțele unor instalații de filtrat cu ultrasunete depind de modul de construcție, de natura materialelor din care este confecționat, de modul de adaptare a lui la generatorul de înaltă frecvență și de modul de adaptare a transductorului ultrasonic la schema cinematică concretă a instalației de filtrat cu ultrasunete;

➤ Elementele de calcul ale unui transductor magnetostriktiv construit și experimentat în lucrare sunt: frecvența de rezonanță mecanică; frecvența de rezonanță electromecanică; coeficientul transformării electromecanice; factorul de calitate mecanic; tensiunea electrică; puterea acustică emisă la rezonanța mecanică; caracteristica de frecvență a puterii acustice în vecinătatea rezonanței; impedanța electrică a transductorului; randamentul electromecanic al traductorului ; puterea electrică necesară pentru producerea puterii acustice și curenții electrici la rezonanță;

➤ Elementele de calcul pentru un transductor piezoceramic compus, proiectate și realizate în teză sunt: condiția de rezonanță mecanică; condiția de rezonanță electromecanică; puterea acustică emisă la rezonanță; puterea acustică la frecvențe joase; caracteristica de frecvență a puterii acustice în apropierea rezonanței; impedanța electrică a transductorului; randamentul electroacustic al transductorului; sensibilitatea transductorului în regim de rezonanță electromecanică; sensibilitatea receptorului de frecvență joasă; caracteristica de frecvență a sensibilității specifice de recepție și curenți electrici la rezonanță;

➤ Experimental se constată că, deși subansamblul ceramic-reflector transmite numai oscilații longitudinale elementului radiant, în acesta apar atât oscilații longitudinale cât și transversale datorită cuplajului existent într-un mediu solid. Aceste oscilații, conform legii generalizate Hooke se propagă independent iar impedanța caracteristică a elementului radiant este o sumă a impedanței caracteristice corespunzătoare fiecărui tip de radiație excitată;

➤ Cunoașterea modului cum vibrează fiecare secțiune a sistemului ultraacustic este necesară proiectării și posibilă făcând o analiză cu elemente finite în urma căreia se trasează diagrama de variație a amplitudinii vitezei particulei în lungul secțiunii și a tipului de vibrație excitat în sistem. Aceste diagrame sunt absolut necesare nu numai pentru proiectare și determinarea elementelor de rezistență ci și pentru realizarea unui sistem ultraacustic care să aibă un randament acustomecanic impus aprioric;

➤ Sistemul ultraacustic se poate calcula în așa fel încât în zona de filtrare să se excite oscilații staționare, pentru a accelera procesul de coalescență care permite și filtrarea microparticulelor foarte fine.

➤ Intensitatea acustică obținută cu un emițător ultrasonic are o valoare limitată de caracteristicile materialului din care este confecționat de aceea, este necesar să se realizeze într-un volum relativ redus concentrații mari de energie, respectiv densități de energie acustică mult mai mari, care să permită procesul de filtrare cu ultrasunete a diferitelor particule și microparticule;

➤ Concentratorul de energie ultrasonică, în vârful căruia este elementul filtrant, sau în anumite situații chiar elementul activ trebuie astfel calculat încât să îndeplinească următoarele funcții: conduce energia ultrasonică de la traductor la locul unde se desfășoară procesul de filtrare; concentrează și focalizează energia ultrasonică în zona de filtrat; amplifică valoarea vitezei particulei, măbind amplitudinea sculei de lucru și implicit intensitatea acustică; prin forma lui permite o gamă foarte variată de filtrare și excitarea în sistemul ultraacustic a diferitelor tipuri de unde ultraacustice (longitudinale, de forfecare, torsionale, longitudinale-torsionale, de încovoiere etc.); permite susținerea sau fixarea întregului sistem ultraacustic în ansamblul instalațiilor de filtrat și purificat, știut fiind că ele au plane în care vibrația particulei este nulă (planele nodale);

➤ Concentratorul de energie ultrasonică se calculează în așa fel încât întreg sistemul ultraacustic să lucreze în regim de rezonanță pentru ca amplitudinea vitezei particulei să fie maximă în zona activă și deci și intensitatea acustică să fie cât mai mare în zona de filtrat și purificat sau în regim de unde staționare, pentru apariția coalescenței;

➤ Principalele elemente de calcul ale unui concentrator de energie ultrasonică sunt: factorul de multiplicare; lungimea de lucru; coeficientul ce caracterizează variația secțiunii; forma secțiunii de variație; diametrul în oricare secțiune și profilul în lungul secțiunii; coordonatele punctelor nodale; masa și dezacordul relativ de frecvență;

➤ În oricare proces de filtrare și deci și în cazul filtrării și purificării cu ultrasunete a gazelor naturale, foarte importantă este cunoașterea mărimii amplitudinii la vârful elementului filtrant și pe întreaga lungime a concentratorului de energie ultrasonică, mărime determinată aprioric realizării concentratorului folosind metoda de analiză cu elemente finite;

➤ Așa cum s-a văzut în urma analizei cu elemente finite în vârful concentratorului apar mai multe tipuri de oscilații, chiar dacă de exemplu întregul sistem este calculat pentru oscilații longitudinale, vibrații a căror amplitudine diferă de cea principală și afectează mai mult sau mai puțin procesul de filtrare și/sau purificare;

➤ Analiza cu elemente finite permite proiectarea rapidă a concentratorilor ultrasonici în așa fel încât în mediu să apară fenomenul de “aglomerare ultrasonică” (cazul model staționar) sau de “scuturare ultrasonică” (cazul lucrului în regim de rezonanță).

6.2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Cercetările teoretice și experimentale cuprinse în această lucrare su fot făcute timp de mai multi ani, în diferite zone ale sistemului național de transport gaze naturale, începând de la capul de extracție și până la consumatorul final, pe trasee, în anumite stații de reglare-măsurare, stații de comprimare și chiar la consumatorii finali.

Rezultatele obținute sunt rodul unei activități de peste 20 de ani în domeniul gazelor naturale, domeniu care este cu un risc tehnic destul de ridicat și care presupune nenumărate încercări și verificări până la autorizarea lor în practică.

Proiectarea și punerea în practică cu bune rezultate a unor filtre ultrasonice, au cere avantaje față de filtrele clasice au fost posibile și datorită contribuțiilor originale ale autorului tezei de doctorat atât în domeniul cercetărilor teoretice cât și în domeniul cercetărilor experimentale.

Din considerente de secrete tehnologice și de confidențialitate în lucrare au fost cuprinse doar extrase dintr-o mică parte de rezultate experimentale și scheme de principiu, acestea conținând elemente brevetabile.

6.2.1. Contribuții originale în domeniul cercetărilor teoretice

Principalele contribuții originale aduse în domeniul cercetărilor teoretice ar putea fi următoarele:

- Sinteza originală a cercetărilor privind purificarea și filtrarea gazelor naturale;
- Analiza fenomenelor și efectelor ce apar la propagarea undelor ultrasonice în mediul de gaze naturale ce antrenează impurități solide și lichide de diferite forme și dimensiuni;
- Analiza câmpului ultraacustic specific procesului de filtrare unde mediul este gazul natural imregnat cu impurități solide și lichide de diferite forme și dimensiuni;
- Determinarea coeficientului de reflexie și de transmisie ultraacustică, de absorbție ultraacustică și de refracție creat de existența “noroiului” de impurități solide antrenate de gazele naturale;
- Elementele de calcul privind adâncimea de reținere, diametrul minim al particulei reținute și căderea de presiune în capul celor mai importante categorii de filtrare: ciclonice, cu element filtrant activ;
- Calculul și proiectarea unor sisteme ultraacustice folosite în construcția a patru categorii de filtrare;
- Modelarea folosind MEF a sistemelor ultraacustice în urma determinării modurilor de vibrație la care se obține câmpul ultraacustic de unde staționare sau lucru în regim de rezonanță;
- Explicarea fenomenului de “aglomerare ultrasonică” folosit la creșterea gradului de reținere a particulelor fine și de “scuturare ultrasonică” folosit la curățarea elementului activ filtrant;
- Calculul și proiectarea unor concentratoare de energie ultrasonice folosite ca parte finală a sistemului ultraacustic și care au acțiune variabilă și forme corespunzătoare cu natura fenomenelor și efectelor ce trebuie să apară în câmpul ultrasonic;
- Modelarea folosind MEF a concentratoarelor de energie ultrasonice și determinarea variației amplitudinii vitezei particulelor în lungul concentratorului, de care depinde în principal fenomenul de “scuturare ultrasonică”;
- Stabilirea condițiilor ce trebuie îndeplinite de un filtru ultrasonic pentru a executa operația de filtrare cu randament ridicat și eficiență sporită.

6.2.2. Contribuții originale în domeniul cercetărilor experimentale

Principalele contribuții originale aduse în domeniul cercetărilor experimentale sunt următoarele:

- Rezultatele obținute în cazul filtrării gazelor naturale folosind filtrarea ultrasonică;
- Proiectarea și realizarea filtrului ciclon ultrasonic model FCU-01, cu posibilitatea de lucru în regim de rezonanță prin “scuturare ultrasonică” sau regim de unde staționare cu aglomerare ultrasonică;
- Proiectarea și realizarea unui filtru vertical de gaze cu ultrasunete, model FGVU-01 cu lucru în regim de rezonanță și scuturare ultrasonică aelementului filtrant activ;
- Proiectarea și realizarea unui filtru conic orizontal ultrasonic, model FCOU-01, cureținerea particulelor lichide și a impurităților solide;
- Proiectarea și realizarea unui filtru final de gaze a ultrasunetelor, model FFGU-01, care realizează reținerea totală a particulelor de praf și particulelor de apă cele mai fine și care lucrează în regim de rezonanță;
- Proiectarea și realizarea a patru sisteme ultraacustice folosite în construcția filtrelor ultrasonice.

6.3. TENDINTE SI PERSPECTIVE ALE CERCETARII IN DOMENIU

Preocupările oricărui cercetător în domeniul gazelor naturale sunt legate de creșterea siguranței în utilizarea și reducerea riscului tehnic atașat transportului de la câmpul de extracție la utilizatorul final.

Ca principala sursă de energie pentru multe domenii ale unei economii, utilizarea eficientă a gazelor naturale presupune concentrarea unor mari forțe de cercetare în vederea ridicării acestui deziderat. Filtrarea și purificarea sunt două operații esențiale prin care trebuie să treacă gazele naturale și perfecționarea acestora se face în permanență.

Principalele tendințe ale cercetării în domeniu sunt:

- descoperirea de noi zăcăminte de gaze naturale;
- realizarea operației de filtrare cât mai aproape de câmpul de extracție pentru a limita erodarea celorlalte elemente componente din SNTGN;
- stabilirea parametrilor câmpului ultrasonic care să permită filtrarea optimă în cât mai putine trepte;
- realizarea unor contribuții simple și sigure în funcționare;
- reducerea costurilor de exploatare și întreținere.

BIBLIOGRAFIE

1. Achnetchet, L.S.Blokh - *Magnetostriction drive for microdisplacements, Machines and tooling.*
2. Adaki, k., Arai, N. - *A study on Low Frequency Vibratory Turning by Vutt of Tool;* Doshisa, The SERDU, vol. 27, no. 3, nov. 1986.
3. Adaki, k., Arai, N. - *A study on Low Frequency Vibratory Drilling of Aluminium Deformed Layer at the surface of Drilled Hole, Doshisa, The SERDU,* vol. 30, no. 3, 1989.
4. Adil, N. *Kinetics and stoichiometry of activated sludge treatment of a toxic organic wastewater,* J.W.P.C.F., februarie 1988.
5. Aitken, D., M.- *Batch biological treatment of inhibitory substrates,* Journal of Environmental Engineering, vol 119, sept. 1993.
6. Akca, L.- *A model for optimum design of activate sludge plans,* Water Resources, Vol. 27, 9, 1993.
7. Akiyama. Y. - *Present state of ultrasonic motors in Japan,* J. Electron. Eng., 1987.
8. Alămoreanu, E - *Metoda elementelor finite și elementelor de frontieră,* UPB, 1995.
9. Alder, R. - *Simple theory of acoustic amplification,* IEEE Trans. Sonics. Ultrason., vol 18, 1971.
10. Allik, H., Huges, T. - *Finite element method for piezoelectric vibration,* Int. J. Num. Meth. Eng., 1979
11. Amza, Gh.; Barb, D.; Constantinescu, F.- *Sisteme ultraacustice*”, Editura Tehnică, București 1988.
12. Amza, Gh., Drimer, D. - *Calculul și construcția concentratorilor de energie ultrasonoră; Tehnologii moderne în construcția de mașini;* București I.P.B, nov. 1974.
13. Amza, Gh., Drimer, D., - *Researches Concerning the Work of the Surfaces of the Metallic Materials, Using the Ultrasonic Energy,* London: Ultrasonic International Congress, 24-26, March, 1975.
14. Amza, Gh., Drimer, D. - *The Design and Construction of Solid Concentrators of Ultrasonic Energy;* London, Ultrasonics, no. 5; 1976, p. 222...226.
15. Amza, Gh.- *Calculul și construcția blocurilor ultrasonice pe bază de ferite, Sesiunea „ Tehnologii moderne în industria constructoare de mașini,* Galați, nov. 1977.
16. Amza, Gh.- *The design and construction of solid concentrators for ultrasonic energy,* Ultasonics, 14, 5, 1976.
17. Amza, Gh.- Ignat, M., Nițoi, D., Borda, C., *Motoare ultrasonore pe bază de materiale magnetostrictive inteligente, Construcția de mașini,* nr. 8-9, 1997, pag. 53.
18. Amza, Gh. - *Utilizarea ultrasunetelor în industrie,* Editura I.P.B, 1978.
19. Amza, Gh., Drimer, D.- *Mașina de durificat, netezit și detensionat cu ajutorul energiei ultrasonore.* Brevet România, nr-69.218, inreg.10.05.76, publ. 08.04.80, pag.4, fig.4, ref. 3.
20. Amza, Gh., Popovici, V. -*Nomograme pentru calculul concentratoarelor de energie ultrasonoră combinat Conferința a IV-a de procese și utilaje de prelucrare la rece,* Timișoara 20-21 mai 1981.
21. Amza, Gh., Popovici, V., Roșca, I.- *Nomograme de calcul și construcție a concentratoarelor combinate de energie ultrasonoră.* Buletinul I.P. „Gheorghe Gheorghiu-Dej” București - Seria Mecanică, Construcții de Mașini, Transporturi-Aeronave, torn XLIV, nr.3 (iul-sept)/1982, pag-70-77, fig.5, tab.1, ref.5.
22. Amza, Gh.- *Contribuții teoretice și experimentale privind tipurile constructive de blocuri ultrasonice, compunerea și elementele constructive specifice prelucrării în câmp ultrasonor.* Buletinul I.P. „Gheorghe Gheorghiu-Dej” București - Seria Construcții de Mașini, tom XLVI- XLVII, 1984-1985, pag.95-109, fig.9, tab.2, ref. 10.

23. Amza, Gheorghe-*Ultrasunete de mari energii*- Ed. Academiei, București, 1984.
24. Amza, Gh.- *Sisteme ultraacustice*, Ed. Tehnică, București, 1989.
25. Amza, Gh - *Design Of ultrasonic transducers used in the structure of the ultrasonic cleaning equipments. Modern Mechanical Design*. September 18-20 1991.
26. Amza,Gh, ș.a - *Nontraditional Manufacturing Processes*, Editura „De Montfort University”, Leicester, United Kingdom, 1994.
27. Amza, Gh. - *A review of control and electronic systems in piezoelectric transducers*- Ed. De Montfort University, Workpackage 1, SPA Cap.1109, Leicester, UK, June 1995.
28. Amza, Gh., - *Echipament universal cu ultrasunete folosit în chirurgie și tratament*, Contract de cercetare nr. 836/1996.
29. Amza, Gh., ș.a, - *Tehnologia materialelor*, Editura Tehnică, București, 1999
30. Amza, Gh., Nitoi, D., - Marinescu M., Borda, C., -*Design and finite element method simulation of the tool cone for the ultrasonic metal machining*-Tehnologii Neconventionale- CITN 2000- Brasov 2-3 noiembrie
31. Amza Gh, ș.a, - *Procese de operare*, vol.Ed. BREN, București 2000.
32. Amza Gh, Radu, C ș.a., - *Procese de operare*, vol.Ed. BREN, București 2000.
33. Amza, Gh., Dumitru, G., Rândașu, V., Amza, C., - *Tratat de tehnologia materialelor*, Ed. Academiei, București, 2000
34. Amza, Gheorghe, Popovici, Victor, Radu Constantin.-*Finite element modelling and analysis of simple ultrasonic horns*, Buletin U.P.B. 2005.
35. Amza Gh., Buțu L., Marinescu M., Minca A., Borda C. - *Theoretical research for monitoring acoustic cavitations*, *Conferința cu participare internațională* 3-4 noiembrie 2005, București.
36. Amza, Gh., Oprean C., Titu A. M.,Turc D. **CONTRIBUTIONS REGARDIN DESIGNING AND CONSTRUCTING ULTRASONIC HORIZONTAL CONE-SHAPEDFILTERS**, Proceedings of The2 International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management Cluj-Napoca 22 – 24 of November, 2012: **ISSN:1582-2559 (pag.299-302)**
37. Oprean C.,Titu A. M., Amza, Gh., Turc D. **CONTRIBUTIONS REGARDING DESIGNING AND CONSTRUCTION OF VERTICAL GAS FILTERS WITH ULTRASOUNDS**, Proceedings of The International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management Cluj-Napoca 22–24 of November, 2012:**ISSN:1582-2559 (pag.389-392)**
38. Turc D., Oprean C., Amza Gh., Titu A.M., **CONTRIBUTIONS REGARDING THE DESIGNING AND USAGE OF ULTRASONIC CYCLONE TYPE OF FILTERS**, Proceedings of The2 International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management Cluj-Napoca 22 – 24 of November, 2012 **ISSN:1582-2559 (pag.439-443)**
39. Turc D., Oprean C., Titu A.M., Amza Gh. **REGARDING FINAL GAS FILTERS WITH ULTRASOUNDS**, Proceedings of The2 International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management Cluj-Napoca 22–24 of November, 2012 :**ISSN:1582-2559 (pag.445-449)**
40. Akulichev V.A. - *The structure of solutions of equations describing pulsations of cavitation bubbles*, *Akusticheskii J.* 13 (1967) 533 (in Russia).
41. Anderson C. And Collins H. – *Distributed piezoelectric senso/actuator desfgin for dynamic measurement/control of distributed parameter system* , *Journal of Sound Vibration*, no. 138, pp. 17-34, 1991.
42. Anton, I., - *Cavitația*, Ed. Academiei, vol. I,II, București 1984.
43. Ausländer, D., - *Fizica proceselor activate cu ultrasunete*, *Ultraacustica '86*, caietul 22, Timișoara, 1986.
44. Awad S.B. - *An Ultrasonic Semi-AqueousAlternative to Vapor Degreasing*, *Precision Cleaning*, I (1), p. 75, 1993.

45. Bailey T. And Hubbard J.E. Jr - *Distruted piezoelectric polymer active vibration control of a cantilever beam* – Journal of Guidance Control Dynamic no.8 605 – 11, 1985.
46. Bahadori, A., Vuthaluru, H.B.-*Simple methodology for sizing of absorbers of TEG (triethylene glycol) gas dehydration systems*, Energy, 2009, 1-7.
47. Ballato A. and Smith J.G.,- *Network representation for piezoelectric bimorphs*, IEEE Trans.Ultrason.Ferroelec.Freq.Control, vol.38, no.6, Nov.1991
48. Barnett, S. B., - *Negative effect of long duration pulsed ultrasonic irradiation*, *Ultrasound in Med.*, 3B, 1977.
49. Bathe, K., - *Finite element procedures in engineering analysis*, London: Prentice – Hall, 1982.
50. Begg, R. I., - *Ultrasound production by rattus villosissimuss*, *Ultrasonics*, 14, Hliffe Books, London, 1973.
51. Berlincourt, D., - *Piezoelectric cristals and ceramics*, în *Ultrasonic Traducers materials*, Mattiat, O., New York, Plenum Press, 1971.
52. Blehmann, I.I., Djanelidze, G. I., - *Vibraționnoe peremeșenie*. „Nauka”, 1964.
53. Blitz, J.,- *Fundamental of Ultrasnincs*, Butterworth, London, 1967.
54. Blitz J., Geoff Simpsons, - *Ultrasonic Methods of Nondestructive testing* – London 1980.
55. Blumenfeld, Maty., - *Introducere în metoda elementelor finite*, Ed. Tehnică 1995.
56. Borodinas, S., - *Theoretical calculation and analysis of the compound ultrasonic cylindrical concentrators*, International Conference “ Vibroengineering – 98”, Lithuania 24 - 26 septembrie 1998.
57. Brown, B., Goodman, I.E - *High intensity ultrasonics. Industrial aplicațion*, Hliffe, London, 1973.
58. Brignel, John., -*Intelligent sensors systems*, Institute of Publishing 1994.
59. Brown, B., Goodman, I.E., - *High intensity ultrasonocs industrial applications*; Hliffe Books, London, 1973.
60. Buțu, L. – *Contribuții privind curățirea și debavurarea cu ultrasunete a pieselor de mare precizie* - Teză de doctorat - UPB, Catedra Tehnologia Materialelor și Sudare, București, 2006.
61. Cahn, R. W., - *Materials Science and Technology*, vol 1...18, Editura Weinheim, New York, 1980.
62. Capineri et.al - *Ultrasonic Transducer as Black-Box: Equivalent Circuit Synthesis and Matching Network Design*”, *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Freq. Control*, Vol. 40, No. 6, pp. 694-703, Nov 1993.
63. Carabogdan Gh.-*Manualul inginerului termotehnician*, Editura Tehnică, București 1986.
64. Cheșa, I., - *Alegerea și utilizarea oțelurilor*. Editura Tehnică, București, 1984.
65. Chivers, R.C - *A multiple nomogram for ultrasonic propagation calculation*, *Ultraacustics*, 17, 1979.
66. Ciocan Cristy – *Contribuții privind prelucrarea materialelor dure și extradure neelectoconducătoare cu ajutorul energiei ultrasonore* –Teză de doctorat -UPB, Catedra Tehnologia Materialelor și Sudare, București, 2004.
67. Cochran A., Reynolds P., Hayward G. – *Progress in stacked piezocomposite ultrasonic transducers for low frequencz applications* , *Ultrasonic* 36)10)(1998) 969-977.
68. Cohen, B.S. și Hering, S.V. *Instrumente de Eșantionare a aerului*, a 8-a ediție, Conferința Americană a Ingineriștilor Industriali Guvernamentali, Cincinnati, OH, 1995.
69. Coulson, J. M., Richardson, J. F., Backhurst, J. R., Harker, J. H.-*Chemical Engineering*, Vol.2, Ed. Pergamon Press, 1980.
70. Crawford A.E. - *The measurement of cavitation*, *Ultrasonics* , vol. 2,1964, pg.120–123.
71. Crawley E.F. and de Luis J. – *Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures*, *AIAAJ*.25 1373-85, 1987.

72. Crawley, S. – *Built-in diagnostics for identifying an anomaly in plates using distributed piezoelectric sensors* – Smart Materials Structures and Mathematical Issues, November, 1999
73. Crețu-Nica, M., - *Activarea cu ultrasunete a mediilor lichide de lucru*. Teză de doctorat, Timișoara, 1999.
74. Dapino, M., Calkins, F., Flatau, A., Hall, D., *Measured Terfenol – D material properties under varied applied magnetic fields levels*, Proceedings of SPIE 1996 Symposium on Smart Structures and Materials, 2717 – 66, San Diego, CA, March 1996.
75. Deaconescu, T., Ivan, M. – *Instalatii de debavurat piese mici cu ajutorul ultrasunetelor, Conferinta „Optimizarea proiectarii si a tehnologiilor de prelucrare in constructia de masini”* Bacau., 1997
76. Donald, R. C., - *The Application of Finite Element Analysis to the Design of Ultrasonic Resonators*, 1994.
77. Dixon R.K. -*Carbon poolsn and flux global forest ecosystems*, Scince 263, 1994.
78. Drăgan, O.; Iancu, C.; s.a. *Ultrasunete de mari energii*, Editura Academiei București 1983
79. Dresnack, P., Metzger, I.-*Oxygen response and Aeration in Streams*, Journal of Water Pollution Control Federation, nr. 25, 1973.
80. Drimer, D., Amza, Gh., - *Tehnologia materialelor. Prelucrări cu ultrasunete*, București, I. P. B, 1983.
81. Drimer, D., Amza, Gh.- *Ultrazvukovaia svarka tekstilnii sinteticaskin i smeșanih materialov*, VI. Nemopzkozi Hegoeztesi Tudomanyas Diekmeri Konferencia, Budapest, 21-26 iunie, 1976, p. 104-114.
82. Dumitrache, Fl., - *Ultrazvukove bodove zvaranie niektorych kombinacii nezeleznycs kovov*, Teză de doctorat Bratislava, 1976.
83. Dumitrache Rujinski, Al. – *Cercetări teoretice și experimentale privind utilizarea ultrasunetelor în procesul de tratare a cariilor* – Teză de doctorat- UPB, Catedra Tehnologia Materialelor și Sudare, București, 2006.
84. Dumitru, E.; Nicolau, P; s.a. -*Ultrasunetele, posibilități de utilizare în industria alimentară*, Editura Ceres, București 1990.
85. Eisner, E., - *Design of sonic amplitude transformer for high magnification*, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, 1990.
86. Eisner, E., Saeger, J., - *A longitudinally resonant stub for vibrations of large amplitude*, *Ultrasonics*, vol. 3, 1965.
87. *Engineering and Desing -Adsortion Desing Guide*, Departament of the Army, US. Army Corps of Engineers, 1 Mar 2001.
88. Ensminger, D., - *Ultrasonics. The low and high Intensity Application*, Ed. Marcel Dekker Inc.,New York, 1978.
89. Errol Eernisse, Roger Ward, - *Survey of Quartz Resonator Sensor Technologies*, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls*, 1990.
90. Fabien Josse, Zach Shana, David Radtke, - *Analysis of Piezoelectric Bulk – Acoustic – Wave Resonators as Detectors in Viscous Conductive Liquids*, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls*,1990.
91. Florea J., Robescu, D., Petrovici, T. -*Metode pentru determinarea debitului vehiculat de aeratoarele mecanice de suprafață*, în volumul Colocviului de Echipamente pentru tratarea și epurarea apelor, București, 1980.
92. Florea, J., Robescu, D. -*Hidrodinamica instalațiilor de transport hidropneumatic și de poluare a apei și a aerului*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983.
93. Fredrich, W., Lerch, R., Soldner, R., - *Simulations of piezoelectric lamb wave delay lines using a finite element method*, *IEEE Trans. Ultrason, Freq. Contr.*, vol. 37, 1990.

94. Fridman, V., Klopovsky, V. A., - *The low liquid pressure acoustic hydrodynamic transducer and its use in sprayng processes*, *Ultrasonics*, 14, 1976.
95. Fry, W., Fry, R., - *Determination of absolute sound levels and acoustic absorption coefficients by thermocouple probes*. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1954, 26, 294-297.
96. Gafitanu, M.; Focşa, V.; s.a. - *Vibrații și zgomote*, Editura Junimea, Iași 1980.
97. ***Gas Processors Suppliers Association (GPSA), „Engineering Data Book”, Eleventh Edition 1998, Section 20: Dehydration, pag. 20-4, 20-6, 20-9, 20-11, 20-12...15, 20-20, 20-33.
98. Gavrilaş, I., Marinescu, N. I., - *Prelucrări neconvenționale în construcția de mașini, vol. I*, Editura Tehnică, București, 1991.
99. Gavrilă, I. - *Ultrasonarea acumulatorilor electrice*, Editura științifică și enciclopedică, București 1982.
100. Gauthier J.C. - *Reduction des emission d'oxides d'azote dans les chaudières industrielles pas utilisation de bruleurs a bas Nox*, *Revue Generale de Thermique*, nr. 359, november 1991.
101. Gelet, A., Chapelon, J.-Y., Bouvier, R., Souchon, R., Pangaud, C., Abdelbrahim, A., Cathignol, D., Dubernard, J.M., - *Treatment of prostate cancer with transrectal focuse ultrasound: early clinical experience*. *Eur. Urol.*, 1996, 29, 174-183.
102. George Buchanan, John Peddieson, - *Axisymmetric Vibration of Infinite Piezoelectric Cylinders Using One Dimensional Finite Elements*, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls*, 1989.
103. Gerth, W.,A., Hemmingsen, E.,A.,- *Heterogenous nucleation of bubbles in gas suprasaturated aqueous solutions*, *Journ. Coll. Interface Science*, 74, 1980.
104. Ghersegal, D.A. s.a.- *Aparate cu ultrasunete*, Editura Tehnica, Bucuresti, 1962.
105. Ghersegal, D.A.; Fridman, V.M. „*Aparate cu ultrasunete*”, Editura tehnică, București 1962.
106. Ghiculescu, D. – *Prelucrări neconvenționale*, Editura Printech, București, 2004.
107. Gîrleanu, G. – *Contribuții privind controlul nedistructiv al materialelor metalice cu ajutorul actuatorilor ultrasonore* - Teză de doctorat - UPB, Catedra Tehnologia Materialelor și Sudare, București, 2003.
108. Gooberman, G. L. – *Ultrasonics*, Hart Publishing co., 1969.
109. Graham, E., - *Cavitation bio-effects at 1,5 MHz*, *Ultrasonics*, 9, 1980.
110. Hagedorn, P., Wallaschek, J., - *Travelling wave ultrasonic motors, Part I: Working principle and mathematical modelling of the stator*, *J. Sound and Vibration*, vol. 1992.
111. Hagood S. And Ryall T. – *Considerations in placement of piezoceramic actuators that are used in structural vibration control* , in Proc. 38th IEEE Conf. Decision Contr., Phoenix, AZ Dec. 1991, pag.1118-1123.
112. Hammit, F.,G., - *Cavitation erosion. The state of the art and predicting capability*, *Appl. Mechanics Reviews*, vol. 32, no. 6, 1979.
113. Hammit, F.,G., Okada, T., - *Vibratory horn cavitation erosion comparasions*, University of Michigan, 1980.
114. Hemsel, T., Wallasghek, J., - *Piezoelectric linear vibration drive for high driving forces*, International Conference ”Vibroengineerig - 98”, Lithuania24-26 septembrie 1998.
115. Harte, C. R., Baker, E. M., Purcell, H. H., *Ing. Eng. Chem.* 25, 528, 1933, citat de 3.
116. Hirata, H., Ueha, S., - *Force factor design of a disk vibrators used for ultrasonic motors*. *J. Acoust. Soc. Japan*, vol 13, 1992.
117. Hirata, H., Ueha, S., - *Revolution speed charateristics of an ultrasonic motors estimadet from the pressure distribution of the motor*, *Japan, J. appl. Phyl.*, vol 31, 1992.
118. Hirata H., Sadayuki Ueha, - *Characteristics Estimation of a Travelling Wave Type Ultrasonic Motor*, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls*, 1993

119. Houdenko, B., Chpirt, E.- *Aeratory dlia ocistki stocinîh*, vol. Ed. Maşghiz, Moscova, 1973.
120. Ibănescu, R., Poterasu, V., - *Dynamical analysis of nonlinear mechanical vibrating system using bond-graph and a simulation method*, International Conference "Vibroengineering - 98", Lithuania 24 - 26 septembrie 1998.
121. Iclăzan, T. – *Probleme ale sistematizării tehnice în aplicațiile ultrasunetelor în tehnologie*, *Ultraacustica'86*, Caietul 22, Timișoara, 1986.
122. Iclăzan, T., - *Cercetări asupra parametrilor constructivi și funcționali la mașinile de prelucrat cu ultrasunete*, Teză de doctorat, Timișoara 1975.
123. Iganat, M. – *Contribuții privind scanarea optică folosind actuatori senzori ultrasonici pe bază de materiale inteligente*, Teză de doctorat, UPB, Catedra tehnologia materialelor și sudare, București, 2000.
124. Ikeda, T., - *Fundamentals of piezoelectric materials science*, Ohm Co., Tokio, 1984
125. Inhaba, R., Tokushima, A., Ise, Y., - *Piezoelectric ultrasonic motor*, in *Proc, IEEE Ultrason Symp.*, 1987.
126. Ionescu, N., Dobre, M., - *Cercetări privind prelucrarea materialelor dure prin vibrașchiere; Galați, Simpozionul de Tehnologii Speciale și Neconvenționale*, Octombrie 1994.
127. Isarie, I. -*Cercetări privind pulverizarea și arderea carburanților lichizi în câmp ultrasonic*", *Sesiune de comunicări*, Institutul de învățământ superior Sibiu 1980.
128. Jan Soderkvist; - *Electric Equivalent Circuit for Flexural Vibrations in Piezoelectric Materials*; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls, 1990.
129. Julian, R. Frederick., - *Ultrasonic Engineering John Wiley&Sons, Inc.,New York-London-Sydney*, 1965
130. Jurkauskas, A.,- *Diagnostics of Precise Mechanism Supports International Conference "Vibroengineering - 98"* Lithuania 24 - 26 septembrie 1998.
131. Kafarov, V. -*Fundamentals of Mass Transfer*, Mir, Publishers, Moscow, 1975.
132. Kainth, G, S., ș.a. – *Studiul prelucrării materialelor cu ultrasunete*, Int. Journal of Machine-Tools, G.B., No. 1, 1989.
133. Keller, A., - *The influence of the cavitation nuclei spectrum on cavitation inception*, *IUTAM Shymp. On Non steady flow of water at high speeds*, Leningrad, 1971.
134. Kenjo, T., Shasida, T., - *Introduction to Ultrasonics motors*, Tokyo: Sogodenshi Syuppansya, 1991.
135. Kidger, M., Szilard, J., - *A new ultrasonic lens*, *Ultrasonics*, 14, 1976.
136. Kikuchi, Y., - *Ultrasonic Transducers*, Tokyo, Tohoku University Electronics Series, Corona Publishing, 1999
137. Kikuchi, K. – *Ultrasound/Their Application in Science and Technology*, New York, 1989.
138. Kidger, M., Szilard, J., - *A new ultrasonic lens*, *Ultrasonics*, 14, 1976.
139. Konash, P., Bastiaans, G., - *Piezoelectric crystals as detectors in liquid chromatography*, *Anal. Chem.* Vol 52, 1980.
140. Krimholtz, R., Leedom, A., - *New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers*, *Electronlett*, 1976; reflected ultrasound, *Proc. IEEE.* vol. 73, 1985.
141. Krohn, D.A. – *Fiber Optic Sensors. Fundamental and Application-* Instrument Society of America, USA, 1988, pag. 111-128, 131-149.
142. Kumabe, J., - *Vibration Cutting*, Tokyo, Jikkyou Publishing Co, 1979.
143. Kumabe, J., Saito, T.,-*Ultra-Precision Turning by applying ultrasonic vibration*, *J. J.S.P.E.* 47, no. 10/1981, p. 1252...1257.
144. Kumabe, J., - *Application of ultrasonic vibratory Machining*, *Tool Engineering* 30, no. 1/1986, p. 58...66.

145. Kumabe, J., - *Ultrasonic Super-position Vibration Cutting of Ceramics*, J.JSPE, vol 52, nr. 11, 1986, pag. 1851-1857.
146. K.A. Kunke, S. Locke, - *Finite Element Analysis of Vibrational Mode in Piezoelectric Ceramic Disks*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls, 1990.
147. Lauterborn, W., - *Cavitation and coherent optics, Cavitation and Inhomogenities in Underwater Acoustic*, Gottingen, 1979.
148. Lăzăroiu Gh. - *Sisteme de purificare totală a gazelor*, al VII-lea Simpozion Tehnologii, instalații și echipamente pentru îmbunătățirea calității mediului, vol. 1, pag. 238-245, București, 9-13 noiembrie 1998.
149. Lăzăroiu Gh.- *Impactul poluanților asupra atmosferei*, al VII-lea Simpozion Tehnologii, instalații și echipamente pentru îmbunătățirea calității mediului, vol. 1, pag. 246-253, București, 9-13 noiembrie 1998.
150. Lăzăroiu Gh.- *Protecția atmosferei împotriva poluării*, Editura PRINTECH, București, 1998, ISBN 973-98453-9-8.
151. Lăzăroiu Gh.-*Impactul CTE asupra mediului*, Editura Politehnica Press, București 2005.
152. Lăzăroiu Gh.-*Tehnologii moderne de depoluare a aerului*, Editura Agir, București 2000.
153. Lăzăroiu Gh. -*Protecția atmosferei împotriva poluării*, Editura Printech, București 1998.
154. Lighthill M. J - *Fourier Analysis and Generalized Functions*. Cambridge: The University Press, 1970, pp. 42–44.
155. Leighton, T. G. - *The Acoustic Bubble*, pp73-74, Academic Press, London, (1994).
156. Lindackers D., Burmeister M., Roth P.- *The reduction of Nox*, 23rd symp on mbustion, The Combustion Institute, 1990.
157. Lovik, A., - *Acoustic measurement of the gas bubble spectrum in water, Cavitation and Inhomogenities in Underwater Acoustic*, Gottingen, 1980.
158. Macosko Ch. W.- *Rheological Changes During Cosslinking*- British Polymer Journal, 1985,17, No.2 pag. 239-245.
159. Magheți I. - *Vibrații mecanice*, Editura Bren, 2003.
160. Manson, W., Wick, R., - *A barium titanate transducer capable of large motion at ultrasonic frequencies*, J. acoust. Soc. Amer., vol 23, mar., 1951.
161. Manchester R.C - *Precision Aqueous Cleaning System and Process Design, Precision Cleaning*, II (6), p. 11, 1994.
162. Martin C.J., Law A.N.R - *The use of thermistor probes to measure energy distribution in ultrasound fields*, Ultrasonics 18 (1980) 127–133.
163. Marinescu Marinela Nicoleta - Teza de doctorat București, 2004 -*Contributii privind procesarea materialelor compozite inteligente*.
164. Marinescu, N. -*Prelucrări cu ultrasunete*, Editura tehnică, București 1986.
165. Markov,A.I.-*Ulitzavukovoe rezanie trudnoabrabatîvaemîh materialov*. Moskva: Izdatel'stvo „Maşinostroenie”, 1968, 367 pag., ref.460.
166. Maslanky, C.J. and Maslanky, S.P.-*Instrumente de Examinare a Aerului*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
167. Masuda, M., - *Ultraprecision Cutting of steel with CBN tools*, J.S.P.E., no. 54/2/1986, p. 384...389.
168. Maurice, O'D., - *The Ultrasonic Cleaning Process, The ASME Winter Annual Meeting*, New York, 1980.
169. Maximilian Fleischer, Dieter Stein, - *New Type of Piezoelectric Ultrasonic Motor*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls, 1989.
170. Medeksza, L.A., - *Vibration Assisted Metal Turning*, Oxford, 1986, p. 335...362.
171. Menke, Dean M., et al. - *Demonstration of Alternative Cleaning Systems*, Washington, D.C., U.S. EPA, August (U.S. EPA report number EPA/600/R-95/120), 1995

172. Mettin, R., Luther, S., Ohl, C.D., and Lauterborn, W - *Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model*,. Ultrasonics Sonochemistry 6, 25-29 (1999).
173. Michael, J. W., Mike, G., Naim, M., Ahmed, B., Experimental Study of 40, 68, and 132 kHz Ultrasonic, 1998.
174. Mishiro, S., - *Ultrasonic Oscillation machining apparatus*; United States Patent, no. 4856 391/1989.
175. Mishiro, S., Hamada, S., - *Ultrasonic vibration cutting cutting*; United States Patent, no. 4911 044/1990.
176. Mishiro, S., - *Ultrasonic vibration and drive controle method thereof*, United States Patent, no. 4728843/1988.
177. Mocanu M., Lăzăroiu Gh. -*Removel of liquid droplets and mists*, The VIII-th Symposium Tehnologies, plants and eqiupament of environment quality, pag. 281-286, Bucharest, 9-12 november, 1999.
178. Mocanu M., Lăzăroiu Gh.- *Removel of gaseus pollutans and odors*, The VIII-th Symposium Tehnologies, plants and eqiupament of environment quality, pag. 287-296, Bucharest, 9-12 november, 1999.
179. Moffat A.S. -*Resurgent forests can be breenhouse gas sponges*, Scince 277, 1997.
180. Moholkar V.S., Sable S.P., Pandit A.B - *Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using the acoustic emission*, AIChE J. 46 (2000) 684–694.
181. Moissenko, G.N., - *Utilitrazvukovoe alimaznoe svertenie hrupkih materialov*, Moskva, Stanki I instrument nr. 4, 1982, p. 26...27.
182. Moriwaki, Toshimichi., Shamoto, Eiji., Inoue, Kenji., - *Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration*. Journal of the Japan Society of Precision Engineering (Seimitsu Kogaku Kaishi), 57, nr.11 (nov), 1991, pag-1983-1988.
183. Moriwaki, Toshimichi., Shamoto, Eiji., Inoue, Kenji., - *Ultraprecision Ductile Cutting of Glass by Applying Ultrasonic Vibration*. Annals of the CIRP, vol-41, nr.1, 1992, pag. 141-144, fig. 13, ref. 13.
184. Moțoiu C., Lăzăroiu Gh., Apostol T. -*Emisia de SO2 și reducerea ei*, Procceding Tempus – Envirom, Universitatea de vară, Protecția mediului în România, pag. 331-334 București, 6-10 iunie, 1994.
185. Mukaishima, H., - *Application of piezoelectric ceramics*, Tokyo, 1989.
186. Nagy, I. -*Ultrasunete și utilizarea lor*, Editura științifică și enciclopedică, București 1982.
187. Nagai, K. and Konno, M. - *Electromechanical vibrators and their application circuit element*, Corona Co., Tokyo, 1984.
188. Nakamura, K., Kurosawa, M., Ueha, S., - *Design of a hybrid transducer-type ultrasonic motor*, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelct.Frequency Control, no.40, pp.402-406, 1993.
189. Neppiras, E. A., High – *Power ultrasonic – general*, Ultrasonics, 13, 4, 1975.
190. Niemczewski B - *A comparison of ultrasonic cavitation intensity in liquids*, Ultrasonics, vol. 18, no. 3, pp. 107–110, 1980.
191. Niemczewski, B - *Estimation of the suitability of selected organic solvents for ultrasonic cleaning*, Ultrasonic 6, 1999, pg.149-156.
192. Nerubai, M.S., - *Vliianie ulitrazvukovih kolebanii na mehaniceskie svoistva jiaroprocimh i titanovih splavov. Tez. dokl. mejdunar simpoziuma „Procinosti materialov i elementov konstrukții pri zvukovih i ulitrazvltkovih dastotah nagrugenii*”, Kiev: „Naukova Durnka”, 1984,118 pag.
193. Nesbitt W, Andrew McFarland , - *Piezoelectric Materials for Ultrasonic Wave Applications*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls, 1997.
194. Nye, J., - *Physical properties of crystals*, Oxford, UK, Oxford University Press.

195. Noltingk B.E., Neppiras E.A. - *Cavitation produced by ultrasonics*, Proc. Phys. Soc. Lond. B 63 (1950) 674–685, 1950.
196. O'Donoghue M. - *The Ultrasonic Cleaning Process*, Microcontamination, 2 (5), 1984.
197. Ohnishi, K., Naito, K., Nakazava, T., - *Ultrasonic linear actuator using coupled vibration of longitudinal and flexural vibrations*, J., Acoust. Soc. Japan, vol. 47, 1991.
198. Oliver, D.E. - *Diffusional Separation Processes*, John Wiley, Sons, Inc. New York, 1966.
199. Onoe, M., et. Al. 1- *Fundamentals of Solid Vibration Theory for Electrical and Electronic Engineering*, pp.117-57, Ohm Co., Tokyo.
200. Oroveanu T., David V., Stan Al. D., Trifan C. - *Colectarea, transportul, depozitarea și distribuția produselor petroliere și gazelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București 1985.
201. Pană, T. - *Absorbitori dinamici de vibrații*, Editura tehnică, București 1984.
202. Papadakis E – *Ultrasonic Instruments and Devices- Refrence for Modern Instrumentation, Techniques and Technology*, Academic Press New York, (ISBN 01253 19517), 2000.
203. Papuc, Gh. – *Contribuții privind proiectarea și realizarea unor motoare ultrasonice folosite în microrobotică*, UPB-Teză de doctorat- Catedra Tehnologia Materialelor și Sudare, București, 2006.
204. Paul, H., Venkatesan, S., - *Axisymmetric vibration of a piezoelectric solid cylinder guided by a thin film*, J. Acoust. Soc. Am., 1986.
205. Perkins, J. P., - *Power Ultrasonic Equipment. Practice and Application, Sonochemistry Symposium*, Warwick University, UK, 8-11 April 1986.
206. Perry, R., Green, G.- *Perry's Chemical Engineer's Handbook*, Section 2: Physical and Chemical Data, The McGraw Hill Company, 1999, ISBN 0-07-049841-5, pag.2-126.
207. Piazza t., Puskas W - *The Ideal Ultrasonic Parameters for delicate part cleaning*, august, 2001.
208. Popa, B., Iscrulescu, V. - *Procese de ardere în câmp sonor*, Editura tehnică, București 1973.
209. Popilov, L.T., - *Spravocinic po electriceskim I ultrazvukovim metodom obrabotki materialov*, Mașinostroenie, Moskva, 1973.
210. Popovici, V., Amza, Gh., Nițescu, D., - *Metodă și instalație pentru măsurarea amplitudinii și solicitării concentratoarelor de energie ultrasonoră* “Brevet de invenție” Nr. 70941/28.03.1979.
211. Pust, L., - *Vibration of non-linear system with feedback loop*, International Conference “Vibroengineering - 98”, Lithuania 24 - 26 septembrie 1998.
212. Pușcoi N. - *Exploatarea zăcămintelor de gaze*, Editura Tehnică București 1970.
213. Qi Q., William D., O'Brien Jr. - *The Propagation of Ultrasonic Waves through a Bubbly Liquid*, IEEE, vol 42, no1, January 1995.
214. Ramutis Bansevicius, - *Ultrasonic Motors*, 1994
215. Rashmi, D., Modak, J.P., Junghare, A.S., - *Dinamic of Flywhell Shaft and Laod Shaft of a Mechanical System Involving Torsionally Flexible Finger Type Clutch Adopting State variable Approach*, International Conference “Vibroengineering– 98” Lithuania 24-26 septembrie 1998.
216. Rașeev. D., Zecheru Gh. - *Tehnologia fabricației aparatului-instalațiilor statice-petrochimice și de rafinării*, Editura Tehnică, București, 1982.
217. Reid, R., C., Prausnitz, J., M., Poling, B., E. - *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, 1987.
218. Reinhard Lerch, - *Simulation of Piezoelectric devices by Two and Three – Dimensional Finite Elements*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls, 1997.
219. Rentz O. - *Retour d'experience sus'l utilisation of SCR pour denitrifier les gas des Centrales allemandes*, Institut Franco-Allemand de recherches sru l'Environnement, 1998.

220. Robescu, D.-*Contribuții teoretice și experimentale la studiul epurării apei*. Teză de doctorat, Institutul Politehnic București, 1975.
221. Robescu, D. -*Instalații de depoluare a apei și aerului*, Institutul Politehnic București, 1979.
222. Rotten, D., Levaillant J-M., - *The ultrasonic examination to detect and diagnose breast carcinomas. Analysis of the results obtain in 125 tumors using radiographic and ultrasound mammography*. *Ultrasound Obstet. Gynecol.* 2, 202-214, 1992.
223. Rossing, T.D., and Fletcher, N.H. 1- *Principle of vibration and sound*, Springer Verlag, New York, 2004.
224. Rozenberg L. D - *Relationship of the pulsations of cavitation voids to the emission of cavitation noise and shock-waves, in High-Intensity Ultrasonic Fields*. L. D. Rozenberg, Ed. New York: Plenum, 1971, pp. 239–259.
225. Rugină, I., - *Creșterea eficienței sistemelor ultrasonice de înaltă intensitate*, București, Comisia de Acustică a Academiei, Caietul 21, 1986, pag. 24.
226. Sakharov, S., Iarionov, I., - *Application of langasite crystals in monolite filters operating in shear modes*, in proc. IEEE Freq. Contr. Symp. 1992.
227. Sashida, T., - *Trial construction and operation of an ultrasonic vibration driven motor*, OYO BUTURI, vol. 51, nr. 6, 1982.
228. Savii, G., Iclănzan, T., - *Unele considerații asupra aplicării vibrațiilor ultrasonice în industrie*, Timișoara, sept. 1975.
229. Savii, G., Iclănzan, T., Alimpie, I., - *Echipamente tehnologice cu ultrasunete de utilizări industriale*. Sesiunea de comunicări a Academiei RSR, Comisia de acustică, București, 10 dec. 1979.
230. Sârbu, N. -*Vibrații mecanice*, Litografia institutului de învățământ superior Sibiu 1985.
231. Scheffel, E,A, M, Știucă, P., - *Dispozitive cu ultrasunete*, București, Editura Tehnică Vol, I, II, pag. 104...București, 1989.
232. Scheffel, M.; Stiuca, P. -*Dispozitive cu ultrasunete*, Editura tehnică, București 1989.
233. Scheible, K. -*Development of a rationally based desing method for ultraviolet light disinfection process*, J.W.P.C.F., ianuarie 1987.
234. Schmidt, G., - *Application of the finite element method to the extensional vibration of the piezoelectric plates, in the mathematics of finite elements and Applications*, J. Whiteman Ed. New Yorc: Academic Press 1973.
235. Scheffel,M, Stiuca, F- *Dispozitive cu ultrasunete*, vol I, II, București, 1989.
236. Shibano Y., (1994) - *Ultrasonic MicroDeburring Application*, 3rd international Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology.
237. Shuyu Lin, Fucheng Zhang - *Measurement of ultrasonic power and electro-acoustic effiecy of high power transducers*, *Ultrasonics* 37, 2000, pg. 549-554.
238. Shapery R.A.- *Stress analysis of viscoelastic composite materials*, *Journal of Composites Materials* 1967, 1 : 228-67.
239. Shaulov A., Smith W.A. Singer B.- *Composite piezoelectrics for ultrasonic transducers*, *IEEE Trans. Ultrasonic Ferroelectric Freq. Control* 33(6)(1986) 812- 821.
240. Shigeki, Toyama., ș.a. - *Development of spherical ultrasonic motor*. 1996.
241. Shoji, M., Seiji, H., - *Ultrasonic cutting device*, Brevet Japonia, nr. 62-24047/1987, Brevet SUA nr. 4911044/1988.
242. Skelton, R.C., - *Effect of Ultrasonic Vibration on the Turning Process*. *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol.9, 1969, pag. 363-374, fig. 14, ref.7.
243. Snow, D., - *Innovation in Vibrational engineering: Business Aspects*, *International Conference”Vibroengineerig - 98” Lithuania* 24 – 26 septembrie 1998.
244. Stasa, F., - *Applied finite element analysis for engineers*, New York, Holt, Reinhart and Winston, 1985.

245. Stățulă, C. -*Purificarea gazelor*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1984, pag. 165, 177, 271, 273, 394, 400, 401-402, 403, 419, 440, 445, 448.
246. Stoianovici, S., Robescu, D. -*Calculul și construcția echipamentelor de oxidare a apelor*, Ed. Tehnică, București, 1984.
247. Strauss, W. -*Industrial Gas Cleaning*, Pergamon Press, New York, 1966.
248. Šukelis, A., Ragulskis, M., - *Investigation and Application of the Electro-Acoustic Generators*, International Conference "Vibroengineering-98", Lithuania 24 - 26 septembrie 1998.
249. Suslick K.S., - *The Chemical Effects of Ultrasound*, Sci. Amer., 80, 1989.
250. Susani, M., Madersbacher, S., Kratzik, C., Vingers, L., Marberger, M., -*Morphology of tissue destruction induced by focused ultrasound*. Eur. Urol., 1993, 23 (Suppl. 1), 34-38.
251. Suzuki, K., Kamo, S., Uno, M., - *The efficiency of ultrasonically vibratory tapping proces*, J.JSPE, vol. 55, no.5/1989, p. 853...858.
252. Șomoghi, V., s.a. -*Proprietăți fizice utilizate în calcule termice și fluidodinamice*, U.P.G., Ploiești 1997, pag. 169.
253. Taran, C. Și Strățulă, C. -*Procese difuzionale de separare*, vol. 1, Inst. de petrol și gaze, Ploiești 1979.
254. Tiersten, H., - *Linear piezoelectric plate vibration*, New York: Plenum 1969.
255. Thompson, L., M., Eichholtz R.,L.- *Ultrasonic Cleaning*, Industrial Wastewater, 54-57 (May/June 1995).
256. Tomikawa Y., Nishitsuka N., Takano T., - *Sensors and Materials*, Clarendon Press, Oxford, 1989.
257. Trans. Am. Inst. Chem. Eng. 35, 211 (1939) citat de: Perry, R.H. and Green-Perry's *Chemical Engineer's Handbook*, New York, 1997.
258. Trifan, C.-*Distribuția gazelor naturale prin rețele de conducte*, Editura U.P.G. Ploiești 2005.
259. Trifan, C. -*Distribuția fluidelor prin conducte. Partea I-Distribuția gazelor naturale*. Suport de curs, U.P.G. Ploiești 2003.
260. Trifan, C. -*Transportul și distribuția gazelor naturale. Studii aprofundate-Suport de curs*, U.P.G. Ploiești 2
261. Trifan, C., Albulescu M. -*Hidraulica, transportul și depozitarea produselor petroliere și gazelor*, Editura Tehnică, București 1999.
262. Trifan, C., Albulescu M., Neacșu S. -*Elemente de mecanica fluidelor și termodinamică tehnică*, Ed. U.P.G. Ploiești 2005
263. Tulcan, Liliana. Georgeta., - *Activarea ultrasonică a proceselor de netezire fină abrazivă*, Teză de doctorat, Timișoara, 2000.
264. Urlick R. J. - *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed. ~McGraw-Hill, New York, 1983, Chap. 4.
265. Van Wijngaarden, L. - *On the Collective Collapse of a Large Number of Gas Bubbles in Water*, *Proceedings I Ith International Congress of Applied Mechanics*, Springer, Berlin, 854-861 (1964).
266. Vartanian, M.E., Hristaforian, S.S., Eghiazarian, R.A., - *Vlianie ul'trazvukovîh kolebanii rezța na teplovîe iavleniia v zone rezaniia pri tocenii trudnoabratatvaemîh materialov*. Erevan. Politehn. Institut, Erevan, 1985, pag.7, ref.5.
267. Vobolis, J., - *Investigation of Vibroacoustic Processes in Sewing Machines*, International Conference "Vibroengineering - 98", Lithuania 24 - 26 septembrie 1998.
268. Voinea, R.; Voiculescu, D. -*Elemente de vibrații mecanice*, Editura tehnică, București 1973.
269. Voronin, A. A., Markov, A. I., - *Vliianie ulitrazvukovîh kolebanii na protess rezaniia jaroprocinîh splavov*. Stanki i instrument, nr. 11/1960.

270. Wang, Lijiang., Sun, Fengchi., - *An Experimental Study on Tool Life of Carbide Cutting Tips for Ultrasonic Vibration Turning*. Acta Armamentarii, nr.4(nov), 1988, pag.34-40, fig.4, tab.1, ref.4.
271. William, L., P., Timothy, P., - *Designer Waveforms: Ultrasonic Technologies to Improve Cleaning and Eliminate Damage*.
272. Yamaguchi, M., - *Vibrator and ultrasonic motor employing the same*, US Patent 4983874, 1991.
273. Young F. R. - *Cavitation*. London: McGraw-Hill, 1989.
274. Young, M.J.R.; Winsper, C.E.; Sansome, D.H. -*Radial mode vibrators for oscillatory metal forming*, Applied acoustic, 1970.
275. Zeqiri B., Ge'lat P.N., Hodnett M., Lee N.D. - *A novel sensor for monitoring acoustic cavitation*. Part I. Concept, theory and prototype development, IEEE Trans. UFFC 50 (2003) 1342–1350.
276. Zharii O.Y., - *An exact mathematical model of a traveling wave ultrasonic motor*, Cannes, 1994.
277. Zharii O.Y., - *Model of an ultrasonic motor with friction-slip motion conversion*, Acoust. Phys., no.39, pp.249-254, 1993.
278. Zimmermann, R., Thüroff, S., Chaussy, C., - *High intensity focused ultrasound (HIFU) treatment for localised prostate cancer - lower side effect rate by technical changes*. Eur. Urol., 2000, 37, (Suppl. 2), 134.
279. Wolf, K. - *The Truths and Myths about Water Based Cleaning - A Systems Approach to Choosing the Best Alternatives*, Pollution Prevention Review, 4(2): 141-53 (Spring 1994).
280. Wells, P.N.T. – *Biomedical Ultrasonics*, 1987.
281. Wu Y.C. -*Wet air oxidation of anaerobically digested sludge* J.W.P.C.F., ianuarie 1987.
282. *** Prospecte SONICS.
283. *** Prospecte SONOBOND.
284. *** Prospecte DUKANE.
285. *** Prospecte BRANSON.
286. *** Prospecte KLN MECASONIC.
287. *** EMS Electro Medical Systems, - *Catalog de aparate și instrumente stomatologice activate cu ultrasunete*, 2006.
288. *** ANSYS. Analysis Guides, Huston, 1998.
289. *** - *Curățarea pieselor turnate*, Traducere din limba maghiară, București, 1968.
290. *** - *Manual utilizare LabView*.
291. Y.K. Yong, Plate - *Element for the Static Temperature Behavior of Low- Frequency Quartz Resonators*, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Controls, 1997.