

INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMIȘOARA
FACULTATEA DE TEHNOLOGIE CHIMICĂ

Sef lucr.ing. MARIANA ȘORA

CONTRIBUȚII PRIVIND FILTRAREA SUSPENSIILOR SOLID-LICHID
ÎN CIMP ULTRASONIC ȘI IDENTIFICAREA TIPULUI FILTRĂRII.

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC,
Prof.dr.ing. ZENO GROPSIAN

16401

- 1989 -

INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA
BIBLIOTECA
CENTRALĂ
Volumul N. 542671
Data 362 - C

CUPRINSUL LUCRĂRII

	Pag.:
1. INTRODUCERE.	3
Notații folosite în capitolul 2.	7
2. ECUAȚIILE FILTRĂRII.	9
2.1. Elemente generale.	9
2.2. Proprietățile filtrante ale suspensiilor solid-lichid.	11
2.3. Calculul proceselor de filtrare.	14
2.3.1. Indicatori tehnologici pentru evaluarea filtrării.	14
2.3.2. Ecuația generalizată a filtrării și dependențe generale între parametrii filtrării la diferență constantă de presiune	16
2.3.3. Ecuațiile filtrării cu formarea precipitatului. .23	
2.3.3.1. Variația rezistenței specifice a stratului de precipitat datorită variației porozității precipitatului și a concentrației suspensiei. .30	
2.3.3.2. Ecuațiile filtrării pentru suspensii îngroșate și stratificabile la diferență de presiune constantă	37
2.3.4. Elemente de operare privind asigurarea productivității maxime a filtrelor cu funcționare discontinuă.	42
2.3.5. Metode pentru identificarea tipului procesului de filtrare a suspensiilor solid-lichid.	45
2.3.6. Exemple de calcul pentru identificarea tipului filtrării.	55
2.3.7. Verificări experimentale privind filtrabilitatea suspensiilor solid-lichid.	68
3. INTENSIFICAREA OPERAȚIEI DE FILTRARE PRIN UTILIZAREA ENERGIEI ULTRASUNETELOR	89
3.1. Parametrii fundamentali și legile fizice ale vibrațiilor elastice cu frecvență ultrasonică	89
3.1.1. Sistemul oscilator ultrasonic.	89
3.1.2. Cimpul ultrasonic. Unde ultrasonice. Mărimi caracteristice.	94
3.2. Utilaje cu ultrasunete pentru filtrarea suspensiilor	101
3.2.1. Elemente ale construcției și funcționării utilajelor cu ultrasunete pentru filtrarea suspensiilor lichid-solid	102

3.2.2. Dimensionarea transductorului ultrasonic magnetostrictiv.	105
3.2.3. Dimensionarea concentratoarelor ultrasonice cu secțiune transversală variabilă	108
3.3. Elemente caracteristice ale filtrelor acustice avind membrana filtrantă oscilantă într-un plan perpendicular pe direcția de curgere a filtratului.	115
3.4. Posibilitatea influențării umidității capilare a precipitatului prin intervenția oscilațiilor acustice.	123
4. CONTRIBUȚII PRIVIND DIMENSIONAREA ȘI REALIZAREA STANDULUI DE LABORATOR.	131
4.1. Elemente ale soluției constructive ale utilajului de filtrare acustică	131
4.2. Dimensionarea transductorului magnetostrictiv și a concentratorului ultrasonic folosit. Program de calcul.	138
5. CONTRIBUȚII PRIVIND STABILIREA MODELULUI MATEMATIC AL FILTRĂRII ÎN CIMP ULTRASONIC PENTRU CLASA DE UTILAJE LA CARE MEMBRANA FILTRANTĂ OSCILEAZĂ ÎN DIRECȚIA DE CURGERE A FILTRATULUI.	143
5.1. Determinări experimentale pe utilajul de laborator realizat.	143
5.1.1. Curbele de filtrare pentru aceleași suspensii în prezența și în absența cimpului ultrasonic.	143
5.1.2. Productivitatea filtrului în prezența și în absența cimpului ultrasonic.	151
5.2. Explicarea fenomenologică a filtrării în cimp ultrasonic în utilajele avind membrana filtrantă oscilantă în direcția de curgere a filtratului.	156
5.3. Stabilirea modelelor matematice ale filtrării.	169
5.3.1. Filtrarea în absența cimpului ultrasonic.	169
5.3.2. Filtrarea în prezența cimpului ultrasonic	173
5.3.3. Program de calcul pentru identificarea parametrilor din relațiile modelelor matematice.	176
6. CONCLUZII GENERALE.	181
7. BIBLIOGRAFIE.	185

1. INTRODUCERE

Filtrarea este un proces hidrodinamic de separare a sistemelor eterogene fluid-solid cu ajutorul unui strat filtrant cu structură poroasă care reține solidul și este permeabil numai pentru fluid. Scopul procesului de filtrare este obținerea fie a precipitatului, fie a filtratului, sau a ambilor. Forța motoare a procesului este diferența de presiune dintre cele două părți ale stratului filtrant, filtrarea fiind din punct de vedere al fazei fluide un fenomen de curgere printr-un mediu poros [11,30].

Numai aparent filtrarea este un proces relativ simplu. Datorită multiplilor factori care o influențează și deci a conținutului ei extrem de complex, elaborarea unei teorii complete a filtrării se realizează cu dificultate [36]. Unele teorii existente, referitoare la filtrare, s-au dezvoltat pe baza modelelor fizice simplificate ale curgerii prin stratul de precipitat. În literatură se evidențiază necesitatea completării teoriei clasice a filtrării și prin introducerea unor sisteme de modele care să permită o mai bună înțelegere a fenomenelor implicate și o studiere a influenței tuturor parametrilor filtrării.

Dacă operația clasică de filtrare este încă deficitară sub aspectul cunoașterii teoretice complete, informațiile referitoare la teoria filtrărilor neconvenționale care se impun însă în practica industrială pe plan mondial, în ultimii 25 de ani, sînt mult mai reduse. În literatură sînt prezentate rezultate ale unor cercetări privind intensificarea operațiilor de transfer prin suprapunerea peste starea staționară a fluidelor a unor mișcări oscilatorii care introduc în sistem energii suplimentare de valoare relativ redusă în raport cu eficiența obținută. Oscilațiile includ folosirea pulsațiilor, a vibrațiilor și a ultrasunetelor [1,9,17,20,21,23,54]. Există numeroase aplicații ale ultrasunetelor în industria chimică pentru intensificarea operațiilor de transfer [20,23,52]. Referitor la intensificarea operației de filtrare, prin aplicarea ultrasunetelor rețin atenția lucrările [15,32,38, 52,63,67,68,69].

Lucrarea de doctorat elaborată se referă în principal la intensificarea operației de filtrare a suspensiilor solid-lichid în câmp ultrasonic și se învecinează în cercetările și realizările similare prezentate recent în literatură [3,18, 52, 63, 74]. Pro-

cedeul de filtrare studiat poate sta la baza unei tehnologii moderne neconvenționale de filtrare cu aplicații în industria chimică.

Autoarea prezentei lucrări de doctorat și-a conceput, dimensionat și realizat într-o variantă originală un filtru de laborator cu ultrasunete, caracterizat prin aceea că membrana filtrantă oscilează în direcția de curgere a filtratului. Pentru această categorie de utilaje s-a explicat fenomenologic posibilitatea intensificării operației de filtrare în câmp ultrasonic ca urmare a prezenței simultane a trei fenomene: propagarea undei acustice sub formă de unde elastice, propagarea oscilațiilor membranei filtrante prin suspensia viscoasă și efectele de strat limită în vecinătatea membranei filtrantei oscilante. Ca o consecință a acestor trei fenomene, se distruge aglomerarea particulelor solide sub membrana filtrantă și are loc oxigenizarea volumică a suspensiei din spațiul de sub membrana filtrantă, astfel încât debitul de filtrat, respectiv productivitatea filtrului crește de peste două ori, în cazul suspensiilor studiate, față de filtrarea aceleiași suspensii, fără ultrasunete. S-au stabilit modelele matematice ale filtrării în absența, respectiv în prezența câmpului ultrasonic, modele verificate experimental cu o precizie foarte bună, ceea ce confirmă valabilitatea ipotezelor admise. Se menționează că această parte teoretică a lucrării este originală, neîntâlnită în literatura de specialitate. Concluziile la care s-a ajuns completează alte informații din literatură referitoare la filtrarea în câmp ultrasonic. Lucrarea de doctorat este structurată pe 6 capitole, o listă bibliografică cu 82 titluri, dintre care 15 titluri se referă la lucrări ale autoarei.

În capitolul 2, pe baza informațiilor din literatură, după o prezentare a proprietăților filtrante ale suspensiilor solid-lichid, se trece la calculul proceselor de filtrare fiind evidențiată ecuația generalizată a filtrării și unele dependențe generalizate între parametrii filtrării la diferență constantă de presiune. Pe baza ecuației generalizate a filtrării se dau ecuațiile caracteristice ale unor tipuri de filtrare prezentate sintetic în tabelul 2.1 [31,32,42]. Se prezintă mai detaliat filtrarea cu formarea precipitatului, mai frecvent întâlnită în aplicații. Pentru aprecierea productivității și a regimului rațional de lucru al filtrelor cu funcționare discontinuă se prezintă unele elemente de calcul. Capitolul 2 reprezintă o sinteză referitoare la ecuațiile filtrării, sistematizându-se mai multe metode, prezentate în paragraful 2.3.5 care permit identificarea tipului procesului

lui de filtrare a suspensiilor solid-lichid. Sînt prezentate în paragraful 2.3.6 exemple de calcul, obținute prin prelucrarea unor date determinate experimental în laborator. În paragraful 2.3.7, pe baza unor sistematice verificări experimentale s-a identificat că există un anumit grad de agitare a suspensiei pentru care filtrarea decurge identic prin două membrane filtrante, orizontale, superioară și inferioară ale unei capsule cilindrice imersată în suspensie. Acest grad de agitare este o mărime caracteristică suspensiei și condițiilor de lucru.

Capitolul 3 se referă la intensificarea operației de filtrare a suspensiilor solid-lichid prin utilizarea ultrasunetelor. În prima parte se prezintă parametrii fundamentali și legile fizice ale vibrațiilor elastice cu frecvență ultrasonică [5,13,17,21], elemente necesare pentru studiul și dimensionarea sistemului oscilator ultrasonic format din transductorul magnetostrictiv cuplat mecanic cu concentratorul acustic și membrana filtrantă. Acest sistem oscilator constituie, din punct de vedere funcțional, partea principală a utilajelor folosite pentru filtrarea în cîmp ultrasonic. Stabilirea relațiilor pentru dimensionarea transductoarelor magnetostrictive și a concentratoarelor ultrasonice a permis proiectarea și apoi executarea prin autodotare a utilajului de filtrare, folosit în măsurători. Pe baza informațiilor din literatură [3,15,21,23,38], se prezintă diferite utilaje cu ultrasunete pentru filtrarea suspensiilor solid-lichid. Într-o lucrare recentă [63] se analizează teoretic și se prezintă rezultatele experimentale ale unui filtru cu ultrasunete realizat în variantă constructivă la care oscilațiile membranei filtrante sînt într-un plan perpendicular pe direcția de curgere a filtratului. Reține atenția în acest tip de utilaj, folosit pentru purificarea triacetatului de celuloză, triplarea productivității ca urmare a intervenției cîmpului ultrasonic. Prezentarea teoriei utilajelor de filtrare ultrasonice avînd membrana filtrantă oscilantă într-un plan perpendicular pe direcția de curgere a lichidului, aduce informații utile, evidențîndu-se caracterul deosebit de complex al problemei și necesitatea comparării mărimilor calculate cu cele măsurate experimental.

Capitolul 4 are o structură originală și se referă la realizarea standului experimental existent în cadrul laboratorului de Fenomene de transfer și utilaje în industria chimică de la Facultatea de Tehnologie Chimică din Timișoara. Se prezintă detaliat construcția și funcționarea utilajului folosit. Pentru realizarea filtrului ultrasonic, pe baza relațiilor stabilite în capitolul 3, s-a dimensionat elec-

tromagnetic transductorul magnetostrictiv și sub aspect mecanic concentratorul ultrasonic. Identificarea regimului de rezonanță electroacustică a sistemului oscilator al filtrului a fost posibilă prin utilizarea unui traductor electronic care asigură conversia semnalului mecanic variabil într-un semnal electric proporțional și care poate fi vizualizat pe ecranul unui osciloscop. Asigurarea regimului de rezonanță reprezintă o condiție fundamentală pentru funcționarea filtrului acustic cu eficiență maximă. Toate componentele standului de laborator sunt realizate din materiale indigene, având caracter de nouitate tehnică pe plan național după informațiile din literatură [3,46,80]. În capitolul 5, pe baza unor sistematice măsurători experimentale, se prezintă în prima parte determinările experimentale efectuate pe utilajul de laborator realizat care prelucrate au condus la cunoașterea curbelor de filtrare, respectiv a productivității filtrului, în prezența și în absența cimpului ultrasonic. Într-o a doua etapă, curbele experimentale obținute pentru dependența cu timpul a productivității filtrului s-au reprezentat în urmăriți și portate, evidențiindu-se astfel intensificarea procesului de filtrare în prezența cimpului ultrasonic. Pentru stabilirea modelului matematic a fost necesară justificarea fenomenologică a aspectelor care intervin în funcționarea filtrului ultrasonic. Pe baza acestor elemente s-au stabilit modele matematice originale ale filtrării în prezența și în absența cimpului ultrasonic. Pentru identificarea parametrilor din relațiile modelelor matematice s-a elaborat un program de calcul în limbaj BASIC, pentru microcalculatorul TDM-5, care permite selectarea valorilor parametrilor ce asigură, cu o anumită precizie impusă, modelarea curbei experimentale. Modelul matematic stabilit corespunde procesului de filtrare în utilajele în care membrana filtrantă oscilează în direcția de curgere a filtratului. În capitolul 6 se prezintă concluziile generale care se desprind din conținutul lucrării, precum și contribuțiile originale. Lucrarea elaborată are un caracter de pionierat în literatura noastră, abordează și rezolvă aspecte ale unei teme de actualitate și este utilă pentru practica industrială în contextul introducerii progresului tehnic în producție. Filtrarea în cimp ultrasonic reprezintă o problemă complexă, care se încadrează în domeniul ingineriei chimice moderne și pentru a cărei rezolvare este necesară și o colaborare interdisciplinară datorită implicării unor cunoștințe de electrotehnică, hidraulică și mecanică.

2. ECUATIILE FILTRARII

2.1. Elemente generale

Filtrarea este operația de separare, mai mult sau mai puțin completă, a sistemelor eterogene fluid-solid în fazele componente, folosind un strat filtrant cu o structură poroasă care reține solidul și este permeabil numai pentru fluid [11,30].

În lucrare se studiază numai filtrarea amestecurilor eterogene solid-lichid. Filtrarea este un proces hidrodinamic de curgere printr-un mediu poros, determinat de diferența de presiune aplicată între cele două părți ale mediului poros.

În literatură sînt menționați un număr mare de factori care influențează operația de filtrare. Unii dintre acești factori au valori constante pe durata filtrării, majoritatea, însă, au valori variabile în timp. Ca urmare, deși aparent filtrarea intervine ca o operație relativ simplă, datorită caracterului ei nestaționar și ai multiplilor factori care o influențează, elaborarea unei teorii complete, care să țină seama de toate aceste influențe se realizează cu dificultate. Există numeroase rezultate privind scrierea ecuațiilor filtrării, dar la acestea s-a ajuns fie pe baza unor considerații teoretice simplificatoare, fie pe baza unor sistematice determinări experimentale.

Factorii care influențează operația de filtrare se referă la lichid (natura, viscozitatea, densitatea, proprietăți corozive), solid (natura, forma și dimensiunile particulelor), suspensie (mod de obținere, concentrație, vîrstă, proprietăți reologice, cantitate sau debit), precipitat sau sediment (omogenitate, umiditate finală, compresibilitate, rezistență hidraulică), strat filtrant (natură, arie, grosime, dimensiunea porilor, rezistență hidrodinamică, rezistență mecanică, rezistență chimică, capacități de regenerare), condițiile de filtrare (presiunea și temperatura de filtrare, debitul sau viteza de filtrare, durata operației, funcționarea continuă sau discontinuă a filtrului), faza de spălare a precipitatului (natura lichidului de spălare, debitul și concentrația lichidului de spălare, durata spălării). Alegerea eficientă și economică a procedurii, a utilajului și a condițiilor de filtrare a unei anumite suspensii, se face numai după cunoașterea efectelor factorilor care influențează filtrarea suspen-

siei respective.

Îmbunătățirea performanțelor operației de filtrare are în vedere mărirea productivității filtrului, obținerea unui filtrat mai limpede, micșorarea umidității finale a precipitatului, reducerea consumului de lichid de spălare la o puritate impusă a precipitatului, regenerarea mai rapidă și mai completă a mediului filtrant, consum minim de energie. Principalele soluții clasice pentru îmbunătățirea operației de filtrare pot fi: mărirea temperaturii, mărirea presiunii, coagularea prealabilă a particulelor fine, evitarea fărâmițării granulelor suspensiei, sedimentarea prealabilă, adausuri de materiale auxiliare pulverulente sau fibroase [11,30,31,32].

Obiectul teoriei filtrării este de a cerceta în ce mod viteza de curgere depinde de proprietățile suspensiei care se filtrează și ale mediului filtrant pe de o parte și de condițiile de lucru pe de altă parte.

Dinamica fluidelor a fost studiată extensiv pentru medii poroase. Atât precipitatul, cât și mediul filtrant sînt astfel de medii. Măsură în care cunoștințele pot fi folosite pentru a evalua problemele filtrării va depinde de măsura în care se pot prevedea proprietățile suspensiei, condițiile de lucru și proprietățile mediului filtrant în timpul formării precipitatului. Prin natură sa, mediul filtrant este neomogen. În general, porii nu sînt uniformi ca mărime, au forme neegale și sînt distribuiți neuniform pe suprafață. Trebuie să se menționeze că criteriul pentru pori - distanța dintre deschizături - este de același ordin de mărime cu cel al particulelor suspensiei și că curgerea prin mediul filtrant are loc numai prin pori. Deci, pe suprafața filtrului, viteza locală de curgere a lichidului va fi diferită în puncte diferite. Aceasta înseamnă că precipitatul, perpendicular pe direcția principală de curgere, este neomogen. De asemeni, o suspensie, oricît de bine agitată ar fi, nu va fi niciodată omogenă. În plus, în majoritatea filtrelor, profilul vitezelor va fi mai neregulat datorită - între altele - unor efecte de perete foarte puternice. Toate acestea se adaugă la neomogenitatea primelor straturi ale precipitatului. Datorită faptului că numărul de treceri într-un precipitat este foarte mare în comparație cu numărul limitat de pori din mediul filtrant, structura primară a unui precipitat va fi determinată de primele straturi ale sale. Deci, întregul pre-

precipitat va fi neomogen perpendicular pe direcția de curgere. Această microneomogenitate conduce ușor la o macroneomogenitate.

O a doua observație este aceea că un precipitat format în condiții de curgere va avea o densitate departe de aceea a particulelor în starea lor de împachetare cea mai densă. Structura precipitatului este stabilizată de curgere. Orice precipitat format prin filtrare este de aceea într-o stare de instabilitate.

O a treia observație este aceea că - în lumina celor arătate mai înainte - nici o măsurare directă a unui parametru caracteristic ca porozitatea și distribuția porozității nu este posibilă fără a deranja precipitatul. Aceste informații trebuie obținute prin căi indirecte. Orice informație obținută prin alte mijloace decît în celula de compresibilitate trebuie să fie considerată cu atenția corespunzătoare [26,27].

O ultimă observație ce rezultă din tipul de operație, este aceea că precipitatul și mediul filtrant se influențează reciproc.

2.2. Proprietățile filtrante ale suspensiilor solid-lichid

Proprietățile filtrante ale suspensiilor se referă la grupa de proprietăți de care depind viteza de filtrare și de sedimentare, viteza și gradul complet de spălare, de dehidratare și de totală eliminare a precipitatului de pe mediul filtrant. Deoarece rezistența mediului filtrant este mult mai mică decît a stratului de precipitat care se depune pe el, viteza de filtrare și ca urmare productivitatea filtrului este determinată de permeabilitatea precipitatului care poate fi exprimată prin mărirea inversă și anume rezistența stratului de precipitat. Rezistența stratului de precipitat se caracterizează prin rezistența specifică medie a precipitatului, volumică, r_v și respectiv rezistența specifică medie masică a precipitatului, r . Porozitatea medie a precipitatului ϵ , este partea de volum liber din precipitat [41,42] :

$$\epsilon = \frac{V_{\text{pori}}}{V_{\text{pp}}} = 1 - \frac{m_s}{\rho_s \cdot V_{\text{pp}}} \quad (2.1)$$

Porozitatea precipitatului, dimensiunea porilor și raza

capilarelor prin care se deplasează lichidul depind de dimensiunea particulelor fazei solide. Suprafața specifică σ este suprafața particulelor fazei solide raportată la unitatea de volum a masei. Pentru particule sferice $\sigma = \frac{6}{d}$, iar pentru particule de formă neregulată $\sigma = \frac{6}{\psi d}$, în care d este diametrul particulelor sferice, iar ψ coeficientul de formă pentru particule neregulate.

În cazul unor suspensii monodisperse se cunoaște dependența dintre rezistența specifică volumică a precipitatului, porozitate și dimensiunea particulelor respectiv suprafața specifică a particulelor, dependență cunoscută sub denumirea Kozeny-Gassman,

$$r_v = \frac{\Lambda^0 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d^2 \psi^2} = \frac{\Lambda^0 \sigma^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (2.2)$$

unde Λ^0 , Λ^* sînt coeficienți constanți. Ecuația Kozeny-Gassman permite cunoașterea influențelor caracteristicilor structurale asupra rezistenței specifice a precipitatului necomprimabil. Utilizarea în practică a acestei ecuații este dificilă datorită dificultăților de a cunoaște valorile corecte pentru σ , ε și d . Din ecuația (2.2) rezultă că permeabilitatea precipitatului depinde de porozitate care se poate modifica în cazul precipitatelor reale în limite largi, de la 0,3 la 0,95.

Pentru precipitatele comprimabile, compuse din particule mici, de formă neregulată, deseori aglomerate, suprafața specifică se modifică cu presiunea. În acest caz, în ecuația (2.2) în loc de σ se introduce o suprafață specifică fictivă a aglomeratelor, $\sigma_f = \sigma(1-\varepsilon)$.

Se cunosc trei tipuri de ecuații empirice care stabilesc legătura dintre rezistența specifică a precipitatului și diferența de presiune:

$$r_v = r_v^0 \Delta P^{s_1} \quad (2.3)$$

$$r_v = r_v^0 + B \Delta P^{s_2} \quad (2.4)$$

$$r_v = r_v^0 \exp s_3 \Delta P \quad (2.5)$$

unde B , r_v^0 , s_1^0 și s_2^0 sînt constante care se determină experimental, iar s_1 , s_2 , s_3 sînt coeficienții de comprimabilitate care caracterizează soliditatea permeabilității precipitatului sau creșterea

rezistenței specifice a precipitatului la creșterea presiunii de filtrare.

Capacitatea precipitatului de a se comprima se caracterizează prin comprimarea relativă:

$$\kappa = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1} \quad (2.6)$$

în care δ_1, δ_2 sînt grosimea precipitatului necomprimat, respectiv comprimat.

Parametrii fundamentali care caracterizează suspensiile și procesele de filtrare sînt: rezistențele specifice ale precipitatului r_v, r ; coeficienții de compresibilitate s și volumul precipitatului care se formează la obținerea unității de volum de filtrat, u .

Pentru determinarea proprietăților filtrante ale suspensiilor, se propune [56] considerarea duratei de formare a unui strat de precipitat cu grosimea de 1 cm. Această mărime se poate determina mai simplu decît rezistența specifică, înșă, în practică este greu uneori să se obțină precipitate de o anumită grosime, fie datorită vitezei de filtrare mici, fie datorită compinutului solut al fazei solide în suspensie. Pentru evoluarea proprietăților filtrante ale suspensiilor se indică [42] o metodă care folosește date despre cinetica de filtrare a suspensiilor la o diferență de presiune $\Delta P = 0,05 \text{ kPa}$. Relația empirică dintre volumul specific al filtratului, V , și durata de filtrare, τ , este:

$$V = V_0 \tau^b \quad (2.7)$$

în care:

V_0 - volumul de filtrat obținut într-un minut prin unitatea de suprafață de filtrare, m^3/m^2 ;

τ - durata de filtrare, min

b - exponent

În practică, pentru suspensiile care intervin în industria chimică, valorile posibile ale dimensiunilor medii ale particulelor se situează în limite largi (de la microni pînă la milimetri), ceea ce modifică corespunzător rezistența specifică, determinînd variația ale vitezelor de filtrare și productivității filtrelor.

În funcție de dimensiunea, forma și natura chimică a substanței, gradul de aglomerare a particulelor și rezistența specifică a precipitatului sînt variabile. Odată cu reducerea dimensiunii particulelor inițiale, gradul de aglomerare și respectiv porozitatea precipitatului crește. Un grad ridicat de aglomerare a particulelor determină o structură cu porozitate mare, situații întâlnite la multe precipitate de prevenienți organici, care după filtrare, în stare nedeshidratată, conțin peste 90% lichid reținut.

Viteza de filtrare a unei suspensii este influențată și de conținutul fazei solide în suspensie, viscozitatea filtratului și viteza de sedimentare a fazei solide.

La alegerea utilajului de filtrare, un rol important îl are reproducibilitatea proprietăților filtrante ale suspensiei și stabilitatea lor în timp. Prin reproducibilitatea proprietăților filtrante se înțelege posibilitatea de obținere a unor rezultate similare la filtrarea într-unul și aceluși regim de lucru, pentru suspensii luate din aceleași faze ale unor diferite operații de producție. Prin stabilitate la filtrare se înțelege reproducibilitatea proprietăților filtrante ale unei și aceluși suspensii în timp. Cauzele oscilațiilor proprietăților filtrante se corelează cu modificări aparent necesare ale calității materiei prime și ale valorilor parametrilor procesului tehnologic, ceea ce impune o atenție corespunzătoare. Folosind metode statistice se pot determina limitele posibile de oscilație a proprietăților de filtrare, ceea ce ajută la exploatarea corectă a utilajului.

2.3. Calculul proceselor de filtrare

2.3.1. Indicatori tehnologici pentru evaluarea filtrării

Filtrarea ca proces tehnologic se caracterizează prin calitate și intensitate. Evaluarea calității filtratului și implicit a filtrării, se face prin următorii indicatori [42]:

$$G_s = \frac{c_{susp} - c_f}{c_{susp}} \quad (2.8)$$

în care c_{susp} și c_f sînt conținutul fazei solide în suspensie, respectiv în filtrat.

- coeficientul de antrenare a particulelor solide:

$$K_n = \frac{c_p}{c_{\text{susp}}} \cdot 100 = (1 - G_p) \cdot 100 \% \quad (2.9)$$

- coeficientul de curățire:

$$K_c = \frac{100}{K_n} = \frac{c_{\text{susp}}}{c_p} = \frac{1}{1 - G_p} \quad (2.10)$$

Calitatea precipitatului se apreciază după conținutul de fază lichidă reținută în pori și se exprimă prin umiditatea precipitatului:

$$u_{pp} = \frac{m_{\text{li}}}{m_{pp}} \cdot 100 = \frac{m - m_{\text{sol}}}{m_{pp}} \cdot 100 \% \quad (2.11)$$

Intensitatea procesului de filtrare se evaluează prin viteza de filtrare și productivitatea filtrului.

Viteza de filtrare instantanee, w , și cea medie, w_m , se definesc prin relațiile:

$$w = \frac{dV}{d\tau} = \frac{dV_f}{S_f d\tau} \quad (2.12) \quad \text{și} \quad w_m = \frac{V}{\tau} = \frac{V_f}{S_f \tau} \quad (2.13)$$

În cazul precipitatelor necomprimibile, viteza de filtrare este proporțională cu diferența sau căderea de presiune. Coeficientul de proporționalitate dependent de parametrii filtrării, precum și de proprietățile mediului filtrant și ale suspensiei reprezintă rezistența la filtrare. Legea lui Darcy stabilește legătura dintre viteza de filtrare, diferența de presiune și rezistența medie la filtrare raportată la unitatea de vâscozitate:

$$w_m = \frac{\Delta P}{\eta R_f} = \frac{\Delta P}{R} \quad (2.14)$$

În care $R = \eta R_f$ este rezistența totală la filtrare.

Productivitatea specifică a filtrului exprimată prin filtratul obținut prin unitatea de suprafață filtrantă pe durata întregului ciclu de filtrare este:

$$Q_f = \frac{V_f}{\tau_{\text{ciclu}} \cdot S} = \frac{V_f}{(\tau + \tau_{\text{sp}} + \tau_{\text{dech}} + \tau_{\text{aux}}) \cdot S} \quad (2.15)$$

unde:

τ_{ciclu} este durata totală a unui ciclu; τ - durata de filtrare; τ_{sp} - durata de spălare a precipitatului; τ_{dech} - durata de dechidare a precipitatului; τ_{aux} - durata operațiilor auxiliare.

Din relațiile (2.13) și (2.15) rezultă că productivitatea specifică în filtrat este mai mică decât viteza medie de filtrare.

Productivitatea specifică a filtrului se poate exprima și în raport cu precipitatul umed, respectiv cu faza solidă conținută în precipitat, prin relațiile:

$$Q_{\text{pp}} = \frac{m_{\text{pp}}}{\tau_{\text{ciclu}} \cdot S} \quad (2.16) \quad \text{și} \quad Q_{\text{g}} = \frac{m_{\text{pp}} \left(1 - \frac{u_{\text{H}_2\text{O}}}{100}\right)}{\tau_{\text{ciclu}} \cdot S} \quad (2.17)$$

Pe durata filtrării, principalii parametri ai procesului (diferența de presiune și viteza de filtrare) se pot modifica. Se identifică următoarele trei cazuri posibile:

- filtrarea la diferență constantă de presiune (w - variabil, ΔP - constant);
- filtrarea cu viteză constantă (w - constant, ΔP - variabil);
- filtrarea cu viteză și diferență de presiune variabilă (w - variabil, ΔP - variabil).

2.3.2. Ecuația generalizată a filtrării și dependența maximă între parametrii filtrării la diferență constantă de presiune

Creșterea rezistenței la filtrare pe durata procesului este dată de ecuația generalizată a filtrării [31,32,42,58]:

$$\frac{dR}{dV} = k \cdot V^2 \quad (2.18)$$

Ecuația filtrării poate fi considerată corespunzătoare

numeri sub formă diferențială, respectiv când se aplică la cantități infinit mici.

În ecuația (2.18) k este o constantă care caracterizează creșterea rezistenței totale la filtrare, iar n - un exponent, care poate lua orice valoare, între $+2$ și $-\infty$. Pentru anumite valori ale exponentului n , ecuația (2.18) descrie procese care se pot identifica cu anumite tipuri de filtrare. Astfel, pentru:

$n = 2$ - filtrarea cu infundarea totală a porilor membranei filtrante ;

$n = 1,5$ - filtrarea cu infundarea parțială a porilor membranei filtrante ;

$n = 1$ - filtrarea de tip intermediar ;

$n = 0,5$ - filtrarea cu infundarea porilor precipitatului care se formează ;

$n = 0$ - filtrarea cu formarea precipitatului ;

$n = -\infty$ - filtrarea la o rezistență constantă.

Folosind ecuația lui Hagen - Poiseuille se obțin relații care coincid cu ecuația (2.18) pentru valori ale exponentului $n = 2$ și $n=1,5$.

Procesul real de filtrare corespunde foarte rar în întregime unui tip definit de filtrare. Cele mai importante abateri se observă în perioada de început a filtrării, mai ales la separarea suspensiilor cu o concentrație mică în fază solidă. Această perioadă poate fi greu descrisă matematic, exponentul n din ecuația generalizată a filtrării se micșorează treptat. Inițial, filtrarea este cu infundarea porilor, apoi procesul se modifică în filtrarea cu formarea precipitatului. Aceasta se explică ușor dacă ne reprezentăm următoarea imagine fizică a procesului: în prima perioadă de filtrare, prin membrana filtrantă curată trec particulele solide cu dimensiuni mai mici decât porii membranei. Particulele ale căror dimensiuni sînt comparabile cu cele ale porilor îi infundă treptat, iar altele particule, care se îndreaptă simultan spre orificiul de intrare al porilor, formează o microboltă care micșorează dimensiunile porilor, iar particulele solide nu mai pot fi antrenate de filtrat, acesta scurgîndu-se limpede, iar pe suprafața membranei filtrante începe să se formeze precipitatul a cărei grosime crește continuu. În continuare, filtrarea are loc prin stratul de precipitat.

Modelul fizic al procesului de filtrare cu formarea precipitatului descrie suficient de exact procesul real și a servit la deducerea ecuațiilor care descriu acest tip de filtrare.

Modelul fizic al procesului de filtrare cu infundarea porilor constă dintr-o mulțime de capilare cilindrice paralele și se consideră că fie numărul capilarelor, fie raza lor scad treptat. Tipul intermediar de filtrare nu are model fizic.

În practica industrială și de laborator este larg răspândită filtrarea la diferență de presiune constantă. Ținând cont de definiția vitezei de filtrare și cea a rezistenței totale la filtrare, bazată pe ecuația lui Darcy și anume relațiile (2.12), (2.13) și (2.14), rezistența hidraulică totală la filtrare se poate exprima prin relația:

$$R_v = \frac{\Delta P}{\eta v} = \frac{\Delta P}{\eta} \frac{d\tau}{dv} = \frac{\Delta P}{\eta} \cdot \frac{d\tau}{dv} \quad (2.19)$$

Prin integrarea ecuației generalizate a filtrării (2.18), se pot exprima mai multe dependențe între parametrii procesului de filtrare, utile pentru identificarea tipului de filtrare, cu consecințe practice în dimensionarea filtrelor. Din relația (2.18) se obține:

$$\frac{dR_v}{R_v^n} = kv \quad (2.20)$$

din care prin integrare rezultă:

$$\int_{R_{v_0}}^{R_v} R_v^{-n} dR_v = k \int_0^v dv \quad (2.21)$$

și în final:

$$R_v = \left[R_{v_0}^{1-n} + (1-n)kv \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (2.22)$$

unde R_{v_0} este rezistența la filtrare în momentul inițial, adică rezistența mediului filtrant, r_m .

Se poate deseri scris:

$$R_v = \left[r_m^{1-n} + (1-n)kv \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (2.23)$$

relație ce exprimă creșterea rezistenței totale la filtrare în funcție de volumul specific de filtrat, V .

Pentru a exprima variația rezistenței totale la filtrare în funcție de timpul de filtrare, în ecuația generalizată a filtrării se înlocuiește dV din (2.19) și se integrează ecuația generalizată (2.18) între limitele R_{V_0} și R_V , respectiv 0 și τ

$$\frac{dR_V}{R_V^n} = k \frac{\Delta P}{\eta} \cdot \frac{d\tau}{R_V} \quad (2.24)$$

și

$$\int_{R_{V_0}}^{R_V} R_V^{-(n-1)} dR_V = \frac{k\Delta P}{\eta} \int_0^\tau d\tau \quad (2.25)$$

Prin efectuarea calculelor se obține:

$$R_V = \left[R_{V_0}^{2-n} + (2-n) \frac{k\Delta P}{\eta} \cdot \tau \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (2.26)$$

deoarece $R_{V_0} = r_m$, se poate scrie:

$$R_V = \left[r_m^{2-n} + (2-n) \frac{k\Delta P}{\eta} \cdot \tau \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (2.27)$$

Pe baza ecuațiilor (2.19), (2.23), (2.27) se pot deduce și alte dependențe între parametrii procesului de filtrare. Astfel, din relațiile (2.19) și (2.23) rezultă dependența între volumul specific de filtrat și viteza instantanee de filtrare

$$\frac{\Delta P}{\eta w} = \left[r_m^{1-n} + (1-n)kV \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (2.28)$$

de unde:

$$w = \frac{\Delta P}{\eta} \left[r_m^{1-n} + (1-n)kV \right]^{\frac{1}{n-1}} \quad (2.29)$$

Viteza instantanee de filtrare variază între limitele

$$w_0 = \frac{\Delta P}{\eta R_{V_0}} = \frac{\Delta P}{\eta r_m} \text{ până la } w = \frac{\Delta P}{\eta R_V}$$

Înlocuind rezistența totală la filtrare în momentul inițial, R_{V_0} sau r_m , în relația (2.29) se obține:

$$w = \frac{\Delta P}{\eta} \left[\left(\frac{\Delta P}{\eta w_0} \right)^{1-n} + (1-n)kV \right]^{\frac{1}{n-1}} \quad (2.30)$$

de unde:

$$w^{n-1} = w_0^{n-1} - (n-1) \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{n-1} \cdot kV \quad (2.31)$$

respectiv:

$$V = \frac{w_0^{n-1} - w^{n-1}}{(n-1) \cdot k \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{n-1}} \quad (2.32)$$

sau:

$$V = \frac{1}{k(n-1)} \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{1-n} (w_0^{n-1} - w^{n-1}) \quad (2.33)$$

relație ce redă dependența între volumul specific de filtrat și viteza instantanee de filtrare.

Din relațiile (2.19) și (2.27) rezultă dependența între viteza instantanee de filtrare și timpul de filtrare:

$$\frac{\Delta P}{\eta w} = \left[r_m^{2-n} + (2-n) \frac{k \Delta P}{\eta} \cdot \tau \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (2.34)$$

Ținând cont că rezistența membranei filtrante, r_m , constituie rezistența în momentul inițial R_v , se poate înlocui prin expresia $r_m = R_v = \frac{\Delta P}{\eta w}$, rezultând astfel pentru viteza instantanee de filtrare expresia:

$$w = \frac{\Delta P}{\eta} \left[\left(\frac{\Delta P}{\eta w_0} \right)^{2-n} + (2-n) \frac{k \Delta P}{\eta} \cdot \tau \right]^{-\frac{1}{2-n}} \quad (2.35)$$

de unde:

$$w = \left[w_0^{n-2} - (n-2)k \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{n-1} \cdot \tau \right]^{\frac{1}{n-2}} \quad (2.36)$$

sau

$$w = w_0 \left[1 - (n-2)k \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{n-1} \cdot w_0^{2-n} \cdot \tau \right]^{\frac{1}{n-2}} \quad (2.37)$$

Relațiile (2.36) și (2.37) redau scăderea în timp a vitezei instantanee de filtrare.

Prin egalarea relațiilor (2.33) și (2.27) se obține o dependență între volumul specific de filtrat și timpul de filtrare:

$$\left[r_m^{1-n} + (1-n)kV \right]^{\frac{1}{1-n}} = \left[r_m^{2-n} + (2-n) \frac{k \Delta P \cdot \tau}{\eta} \right]^{\frac{1}{1-n}} \quad (2.38)$$

de unde:

$$V = \frac{1}{(1-n)k} \left\{ \left[r_m^{2-n} + (2-n) \frac{k \Delta P \cdot \tau}{\eta} \right]^{\frac{1-n}{2-n}} - r_m^{1-n} \right\} \quad (2.39)$$

Tinând cont că $R_{V_0} = r_m = \frac{\Delta P}{\eta w_0}$ se obține:

$$V = \frac{1}{(1-n)k} \left\{ \left[\left(\frac{\Delta P}{\eta w_0} \right)^{2-n} + (2-n) \frac{k \Delta P \cdot \tau}{\eta} \right]^{\frac{1-n}{2-n}} - \left(\frac{\Delta P}{\eta w_0} \right)^{1-n} \right\} \quad (2.40)$$

de unde, prin calcule, rezultă următoarea dependență între volumul specific de filtrat, viteza momentană inițială și timp:

$$V = \frac{1}{(1-n)k} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{1-n} \left\{ \left[w_0^{n-2} + (2-n)k \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{n-1} \cdot \tau \right]^{\frac{1-n}{2-n}} - w_0^{n-1} \right\} \quad (2.41)$$

Din ecuația generalizată a filtrării (2.18) și din relațiile generale (2.23), (2.27), (2.33), (2.37), (2.39), (2.41) care redau diferite dependențe între parametrii procesului de filtrare și anume $R_V(V)$, $R_V(\tau)$, $V(w)$, $w(\tau)$, $V(\tau)$, $V(w_0, \tau)$, înlocuind valoarea exponentului n cu valori particulare se obțin relațiile caracteristice pentru diferite tipuri cunoscute de filtrare.

Pe baza ecuației generalizate a filtrării, relația (2.18), se pot stabili cinci tipuri de filtrare pentru care se deduc expresiile dependențelor analitice dintre unele perechi de parametri ai filtrării. În tabelul 2.1 se prezintă rezultatele calculelor efectuate [42].

Tabelul 2.1 Ecuații caracteristice unor tipuri de filtrare

Dependentă	Filtrare cu înfundare totală a porilor $n = 2$	Filtrare cu înfundare parțială a porilor $n = 1,5$	Filtrare de tip intermediar $n = 1$	Filtrare cu înfundarea porilor precipitației $n = 0,5$	Filtrare cu formarea precipitației $n = 0$
$\frac{dR_V}{dV} (R_V)$	$\frac{dR_V}{dV} = kR_V^2$	$\frac{dR_V}{dV} = kR_V^{1,5}$	$\frac{dR_V}{dV} = kR_V$	$\frac{dR_V}{dV} = kR_V^{0,5}$	$\frac{dR_V}{dV} = k$
$V (R_V)$	$V = \frac{1}{k} \cdot \frac{R_V - r_m}{R_V \cdot r_m}$	$V = \frac{2}{k} \cdot \frac{\sqrt{R_V} - \sqrt{r_m}}{\sqrt{R_V} \cdot \sqrt{r_m}}$	$V = \frac{1}{k} \ln \frac{R_V}{r_m}$	$V = \frac{2}{k} (\sqrt{R_V} - \sqrt{r_m})$	$V = \frac{1}{k} (R_V - r_m)$
$V (\tau)$	$V = \frac{\eta}{kAP} W_0 (1 - e^{-\frac{kAP}{\eta} \tau})$	$V = \frac{W_0}{1 - \frac{k}{2} \sqrt{\frac{\Delta P W_0}{\eta}}} \tau$	$V = \frac{1}{k} \ln (1 + k W_0 \tau)$	$V = \frac{2}{k} \sqrt{\frac{\Delta P}{\eta W_0}} \times (1 - \sqrt{1 - 1,5k \sqrt{\frac{\Delta P}{\eta}} W_0^{1,5} \tau})$	$V = \frac{\Delta P}{k \eta W_0} \times (\sqrt{1 + 2k \frac{\eta}{\Delta P} W_0^2 \tau} - 1)$
$w (\tau)$	$w = W_0 e^{-\frac{k}{\eta} \frac{\Delta P}{\tau} \tau}$	$w = \frac{W_0}{(1 + \frac{k}{2} \sqrt{\frac{\Delta P W_0}{\eta}} \tau)^2}$	$w = \frac{W_0}{1 + k W_0 \tau}$	$w = W_0 [1 - 1,5k (\frac{\Delta P}{\eta})^{0,5} W_0^{1,5} \tau]^{-\frac{2}{3}}$	$w = \frac{W_0}{\sqrt{1 + 2k \frac{\eta}{\Delta P} W_0^2 \tau}}$
$w (V)$	$w = W_0 - k \frac{\Delta P}{\eta} V$	$w = W_0 (1 - \frac{k}{2} \sqrt{\frac{\Delta P}{\eta}} V)^2$	$w = W_0 e^{-kV}$	$w = W_0 (1 + \frac{k}{2} \sqrt{\frac{\Delta P}{\eta}} V)^2$	$w = \frac{W_0}{\sqrt{1 + k \frac{\eta}{\Delta P} V}}$
ecuațiile dependentelelor liniare	$w = w_0 - k \frac{\Delta P}{\eta} V$	—	$\frac{1}{w} = \frac{1}{W_0} + k \tau$	—	$\frac{\tau}{V} = \frac{k}{2} \cdot \frac{\eta}{\Delta P} V + \frac{1}{W_0}$
ecuațiile dependentelelor liniare	$w = w_0 - k \frac{\Delta P}{\eta} V$	—	$\frac{1}{w} = \frac{1}{W_0} + k \tau$	—	$\frac{\tau}{V} = \frac{k}{2} \cdot \frac{\eta}{\Delta P} V + \frac{1}{W_0}$
ecuațiile dependentelelor liniare	$w = w_0 - k \frac{\Delta P}{\eta} V$	$\frac{\tau}{V} = \frac{k}{2} \sqrt{\frac{\Delta P}{\eta W_0}} + \frac{1}{W_0}$	$\lg w = \lg W_0 - 0,43kV$	$\frac{1}{w} = \frac{1}{W_0} + \frac{k}{2} \sqrt{\frac{\eta}{\Delta P}} \cdot V$	$\frac{\tau}{V} = \frac{1}{W_0} + \frac{k}{2} \sqrt{\frac{\eta}{\Delta P}} \cdot V$
[k]	adimensională	$m^{-0,5}$	m^{-1}	$m^{-1,5}$	m^{-2}

2.3.3. Ecuații ale filtrării cu formarea precipitatului.

Filtrarea cu formarea precipitatului se întâlnește de cele mai multe ori în practica industrială. În acest caz, în orice moment, rezistența hidrolică totală la filtrare se compune din rezistența membranei filtrante R_m și rezistența precipitatului R_{pp} :

$$R = R_m + R_{pp} \quad (2.42)$$

sau raportînd rezistența la filtrare la unitatea de vîscozitate, se obține:

$$R_v = r_m + \frac{\lambda}{\eta} R_{pp} \quad (2.43)$$

Rezistența precipitatului crește proporțional cu grosimea precipitatului, δ , și cu rezistența sa specifică, r_v .

Ecuația lui Darcy (2.14) se poate scrie sub forma:

$$w = \frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\eta (r_m + r_v \delta)} \quad (2.44)$$

în care $\delta = f(V)$.

Ecuația (2.44) este ecuația fundamentală a filtrării cu formarea de precipitat pentru suspensii nestratificabile sau lent stratificabile în câmp gravitațional.

Dependențele teoretice dintre volumul specific de filtrat, V , și timpul de filtrare, τ , se obțin integrînd ecuația (2.44) la $\Delta P = \text{const.}$ sau $w = \text{const.}$, conform regimului de lucru al filtrului. La integrarea ecuației (2.44) se fac următoarele aproximații: membrana filtrantă și precipitatul nu sînt compresibile, faza solidă nu sedimentează în timpul filtrării, volumul precipitatului care se formează este proporțional cu volumul filtratului obținut, adică raportul dintre volumul de precipitat și volumul de filtrat este constant:

$$\frac{V_{pp}}{V_f} = \frac{\delta S}{V_f} = \frac{\delta}{\frac{V_f}{S}} = \frac{\delta}{v} = u = \text{constant} \quad (2.45)$$

Prin înlocuirea în ecuația (2.44) a valorii grosimii precipitatului din ecuația (2.45) se obține:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\eta(x_M + x_V \cdot V \cdot u)} \quad (2.46)$$

Integrând ecuația (2.46) la $\Delta P = \text{const.}$, de la 0 pînă la τ și respectiv de la 0 pînă la V , rezultă:

$$V^2 + \frac{2 x_M}{u \cdot x_V} \cdot V = 2 \frac{\Delta P}{u \cdot \eta \cdot x_V} \cdot \tau \quad (2.47)$$

sau

$$\tau = \frac{u \eta x_V}{2 \Delta P} \cdot V^2 + \frac{x_M \cdot \eta}{\Delta P} \cdot V \quad (2.48)$$

Ținînd cont că $V = \frac{\delta}{u}$, se obține

$$\tau = \frac{\eta x_V \delta^2}{2 \Delta P \cdot u} + \frac{x_M \cdot \eta \cdot \delta}{u \cdot \Delta P} \quad (2.49)$$

Dacă rezistența nodului filtrant se poate neglija, $x_M = 0$, relațiile (2.47) și (2.49) devin:

$$V^2 = \frac{2 \Delta P}{\eta x_V \cdot u} \cdot \tau \quad \text{sau} \quad V = \sqrt{\frac{2 \Delta P \cdot \tau}{\eta x_V \cdot u}} \quad (2.50)$$

și

$$\tau = \frac{\eta x_V \delta^2}{2 \Delta P \cdot u} \quad (2.51)$$

Ecuația (2.48) se poate scrie sub forma:

$$\frac{\tau}{V} = \frac{\eta x_V \cdot u}{2 \Delta P} \cdot V + \frac{x_M \cdot \eta}{\Delta P} \quad (2.52)$$

care, în coordonate $\tau - V$, reprezintă o dreaptă (fig. 2.2, c), a cărei ordonată la origine este $N = \frac{\eta x_M}{\Delta P}$, iar panta dreptei este $K = \frac{\eta x_V \cdot u}{2 \Delta P}$.

Ecuația (2.52) corespunde cu ecuația liniară, obținută din ecuația generalizată a filtrării (2.18) pentru $n=0$, în coordonate $\tau - V$, tabelul 2.1.

Prin reprezentarea grafică a ecuației (2.52) pe baza determinărilor experimentale se pot calcula rezistența speci-

fioi medie a precipitatului, r_v , și rezistența membranei filtrante, r_m

$$r_v = \frac{2\mu \Delta P}{\eta \cdot u} \quad (2.53)$$

$$r_m = \frac{\mu_s \Delta P}{\eta} \quad (2.54)$$

Deoarece mărimea $u = \frac{V_{pp}}{V_s}$ nu se poate determina experimental datorită deznod, relația se modifică astfel încât rezistența specifică a precipitatului să se exprime pe unitate de solid uscat conținut în precipitat, (r).

Rezistența specifică a precipitatului, raportată la unitatea de viscozitate se definește ca o lungime fictivă a porilor pe unitatea de precipitat obținut pe filtru. Rezistența specifică a precipitatului se poate exprima diferit, în funcție de modul de exprimare a unității de precipitat [76]

- în cazul cînd se exprimă pe unitate de volum a precipitatului, rezistența specifică se măsoară în:

$$[r_v] = \frac{m}{m^3} = m^{-2}$$

- în cazul cînd se exprimă pe unitatea de masă de solid uscat din turta de precipitat, rezistența specifică se măsoară în

$$[r] = \frac{m}{kg}$$

Rezistența precipitatului, raportată la unitatea de viscozitate, se va putea exprima astfel

$$\frac{1}{\eta} \cdot R_{pp} = r_v \cdot \frac{V_{pp}}{S} = r \cdot \frac{m}{S} \quad (2.55)$$

de unde rezultă:

$$r_v = \frac{r \cdot m}{V_{pp}} \quad (2.56)$$

Înlocuind expresia rezistenței specifice volumice în relația (2.44) se obține:

$$v = \frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\eta \left(x_m + \frac{x_m}{V_{pp}} \cdot \delta \right)} \quad (2.57)$$

Ținând cont că $\delta = \frac{V_{pp}}{S}$, relația (2.57) devine:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\eta \left(x_m + \frac{x_m}{V_{pp}} \cdot \frac{V_{pp}}{S} \right)} = \frac{\Delta P}{\eta \left(x_m + x_m \cdot \frac{m}{S} \right)} \quad (2.58)$$

Masa solidului uscat, m_s , din precipitat depinde de volumul de filtrat rezultat și de conținutul fazei solide în suspensia inițială, x , și amasa, pe baza bilanțului de materiale se obține [54]

$$m_s = V_f \cdot \frac{\rho_{s \cdot x}}{1 - mx} \quad (2.59)$$

m fiind cantitatea de precipitat umed ce conține 1 kg solid uscat. Relația (2.58) devine:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\eta \left(x_m + x_m \cdot \frac{V_f}{S} \cdot \frac{\rho_{s \cdot x}}{1 - mx} \right)} = \frac{\Delta P}{\eta \left(x_m + x_m \cdot V \cdot \frac{\rho_{s \cdot x}}{1 - mx} \right)} \quad (2.60)$$

Prin separarea variabilelor și integrare, la $\Delta P = \text{const.}$, între limitele $0 - \tau$, respectiv $0 - V$, se obține:

$$\eta x_m V + \frac{\eta \cdot \rho_{s \cdot x} \cdot x_m}{1 - mx} \cdot \frac{V^2}{2} = \Delta P \cdot \tau \quad (2.61)$$

sau

$$V^2 + \frac{2x_m(1-mx)}{\rho_{s \cdot x} \cdot x_m} \cdot V = \frac{2\Delta P(1-mx)}{\eta \cdot \rho_{s \cdot x} \cdot x_m} \cdot \tau \quad (2.62)$$

respectiv

$$V^2 + 2CV = K\tau \quad (2.63)$$

în care:

$$C = \frac{x_m(1-mx)}{\rho_{s \cdot x} \cdot x_m} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2) \quad (2.64)$$

$$K = \frac{2\Delta P(1-\alpha x)}{\eta \cdot \rho_g \cdot r \cdot x} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.65)$$

Ecuația (2.63) reprezintă o altă formă pentru dependența $V(\tau)$ în cazul filtrării cu formarea unui precipitat necomprimibil.

Rezistența membranei filtrante se poate exprima prin rezistența unui anumit strat de precipitat cu rezistența egală cu a membranei filtrante, dar avind o grosime echivalentă, σ_{ech}

$$R_m = \sigma_{\text{ech}} \cdot R_v \quad (2.66)$$

Volumul specific al filtratului, V_{ech} , obținut la depunerea unui strat de precipitat cu grosimea σ_{ech} este egal cu

$$V_{\text{ech}} = \frac{\sigma_{\text{ech}}}{u} \quad (2.67)$$

u fiind raportul între volumul precipitatului și volumul filtratului corespunzător (relația 2.45)

$$u = \frac{V_m}{V_{\text{f ech}}} = \frac{\sigma_{\text{ech}} \cdot S}{V_{\text{f ech}}} = \frac{\sigma_{\text{ech}}}{\frac{V_{\text{f ech}}}{S}} = \frac{\sigma_{\text{ech}}}{V_{\text{ech}}} \quad (2.68)$$

Ținind cont de relația (2.66), volumul specific echivalent de filtrat este:

$$V_{\text{ech}} = \frac{R_m}{R_v \cdot u} \quad (2.69)$$

Înlocuind expresia $\frac{R_m}{R_v \cdot u}$ cu V_{ech} în relația (2.47) se obține:

$$V^2 + 2V_{\text{ech}} \cdot V = \frac{2\Delta P}{u \cdot \eta \cdot R_v} \quad (2.70)$$

Adăugind în partea stângă a ecuației (2.70) V_{ech}^2 iar în partea dreaptă valoarea aceleiași mărimi corespunzătoare din relația (2.69) se obține:

$$V^2 + 2V_{\text{ech}} \cdot V + V_{\text{ech}}^2 = \frac{2\Delta P}{u \cdot \eta \cdot R_v} \cdot \tau + \frac{R_m^2}{R_v^2 \cdot u^2} \quad (2.71)$$

sau

$$(V+V_{ech})^2 = \frac{2\Delta P}{\eta r_v u} \left(\tau + \frac{\eta r_m^2}{2\Delta P r_v u} \right) \quad (2.72)$$

Expresia $\frac{\eta r_m^2}{2\Delta P r_v u} = \tau_{ech}$ are dimensiunea secundă și reprezintă timpul în care se formează stratul de precipitat cu grosimea δ_{ech} , la trecerea volumului specific de filtrat V_{ech} . Se obține astfel ecuația lui Ruth [42]:

$$(V+V_{ech})^2 = \frac{2\Delta P}{\eta \cdot r_v u} (\tau + \tau_{ech}) \quad (2.73)$$

sau

$$V+V_{ech} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\eta \cdot r_v u} (\tau + \tau_{ech})}^{0.5} \quad (2.74)$$

Relația (2.74) constituie un caz particular al relației (2.39) pentru $n=0$.

Dacă $n=0$, relația (2.39) devine:

$$V = \frac{1}{k} \left[\left(r_m^2 + \frac{2k\Delta P}{\eta} \cdot \tau \right)^{0.5} - r_m \right] \quad (2.75)$$

sau

$$V + \frac{r_m}{k} = \sqrt{\frac{2\Delta P \cdot k}{\eta} \tau + r_m^2} = \sqrt{\frac{2\Delta P \cdot k}{\eta} \left(\tau + \frac{r_m^2 \eta}{2\Delta P \cdot k} \right)} \quad (2.76)$$

de unde:

$$V + \frac{r_m}{k} = \sqrt{\frac{2\Delta P \cdot k}{\eta}} \cdot \sqrt{\tau + \frac{r_m^2 \eta}{2\Delta P \cdot k}} \quad (2.77)$$

respectiv:

$$V + \frac{r_m}{k} = \sqrt{\frac{2\Delta P \cdot k}{\eta}} \left(\tau + \frac{r_m^2 \eta}{2\Delta P \cdot k} \right)^{0.5} \quad (2.78)$$

Se compune relația (2.78) cu relația (2.74) în care sînt înlocuiți termenii V_{ech} și τ_{ech} prin expresiile corespunzătoare

$$V + \frac{r_m}{r_v u} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\eta \cdot r_v u}} \left(\tau + \frac{r_m^2 \eta}{2\Delta P \cdot r_v u} \right)^{0.5} \quad (2.79)$$

Comparând termenii relațiilor (2.78) și (2.79) rezultă că ecuațiile pot fi identice dacă:

$$k = r_p \cdot u \quad (2.80)$$

Dacă rezistența membranei filtrante se poate neglija adică $r_m = 0$, ecuația (2.39) în următoarea formă:

$$V = \frac{1}{(1-n)k} \left[(2-n) \frac{k \cdot \Delta P}{\eta} \cdot \tau \right]^{\frac{1-n}{2-n}} \quad (2.81)$$

sau

$$V = \frac{1}{(1-n)k} \left[\frac{k \cdot \Delta P}{\eta} (2-n) \right]^{\frac{1-n}{2-n}} \cdot \tau \quad (2.82)$$

Această ecuația este de tipul relației (2.7), care descrie cinetica procesului de filtrare și care este forma cea mai simplă a unei relații între volumul specific de filtrat și timpul de filtrare. Exponentul b din relația (3.7) este egal cu raportul $\frac{1-n}{2-n}$ doar dacă $r_m = 0$. Cunoșcând exponentul b se poate calcula exponentul n corespunzător, în vederea identificării tipului de filtrare.

Cinetica procesului de filtrare poate fi redată prin ecuațiile (2.7) și (2.74). În sistemul de coordonate $V-\tau$ (chiar în condițiile scării logaritmice a axelor), ecuația (2.74) se reprezintă printr-o linie curbă, în timp ce ecuația (2.7) printr-o dreaptă. În general, se consideră că relația empirică (2.7) este o aproximație suficient de exactă a cineticii procesului și că diferența între dreaptă redată prin ecuația (2.7) și curba reală dată de ecuația (2.74) este de 20% în perioada inițială, iar odată $V = V_{ech}$ diferența scade la 6%.

Curba cineticii de filtrare este influențată și de alți parametri în afară de rezistența membranei filtrante, r_m . Chiar dacă $r_m = 0$, abaterile față de relația (2.74) care în acest caz coincide cu (2.7), se datoresc erorilor experimentale sistematice în determinarea volumului de filtrat, V_f , a timpului, τ , a diferenței de presiune, ΔP , și a viscozității, η , precum și modificării unor mărimi care, la soluționarea ecuațiilor teoretice, au fost considerate constante, ca de exemplu, exponentul n și coeficientul $k = r_p \cdot u$.

2.3.3.1. Variația rezistenței specifice a stratului de precipitat datorită variației porozității precipitatului și a concentrației suspensiei [25,39] .

A: Distribuția precipitatului nu este aceeași pe întreaga grosime a stratului de precipitat; ea este minimă lângă mediul filtrant și maximă la limita de separare cu suspensia, variind cu atât mai mult cu cât precipitatul este mai compresibil. Porozitatea precipitatului difere deaceste particulele de lângă mediul filtrant și cele din straturile superioare de precipitat sînt în condiții diferite. Curba de distribuție a porozității pe înălțimea stratului de precipitat are forme diferite în funcție de proprietățile reologice ale precipitatului. Modificarea valorii medii a porozității, ε , în procesul de filtrare determină modificarea rezistenței specifice volumice a precipitatului, α_v , precum și a raportului între volumul precipitatului și volumul filtratului, α . Modificarea valorii produsului $\alpha_v \alpha$ poate fi considerată proporțională cu modificarea funcției $(\frac{\alpha_v \varepsilon}{\varepsilon})^2$.

În fig.2.1 se prezintă repartiția presiunilor în precipitat și suspensie la un filtru cu mediu filtrant orientat. Se

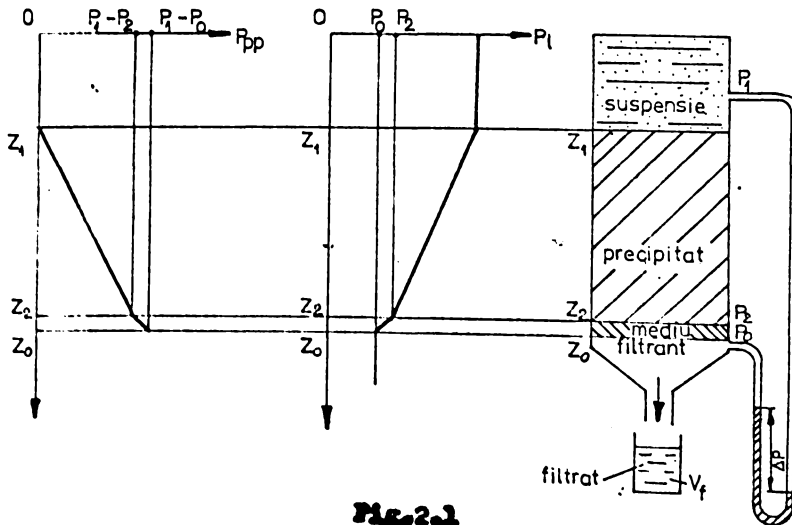


Fig.2.1

constată că presiunea statică a lichidului, P_1 , care are valoarea P_2 în suspensie, scade de-a lungul precipitatului, atingând valoarea P_2 la nivelul mediului filtrant. Presiunea

hidrostaticii în precipitat, P_{pp} , aregte de la valoarea zero, considerată la nivelul superior al precipitatului, astfel ca să se verifice relația:

$$P_1 = P_{pp}(z) + P_1(s) = \text{const.} \quad (2.83)$$

Variațiile liniare considerate pentru $P_1(s)$ și $P_{pp}(z)$ corespund unui precipitat perfect incompresibil.

Rezistența specifică a unui precipitat compresibil variază cu adâncimea z în precipitat, printr-o dependență în general neliniară, deoarece variază presiunea în precipitat; este necesar deci, ca în ecuația generală a filtrării să se introducă o valoare medie a acestei rezistențe specifice.

$$x_{\text{med}} = \frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_2} \int_0^z \frac{dP_{pp}(z)}{x(P_{pp})} \quad (2.84)$$

Dacă se neglijează pierderea de presiune $P_2 - P_0$ prin mediul filtrant, atunci $P_1 - P_2 = P_1 - P_0 = \Delta P$, relația (2.84) devine:

$$x_{\text{med}} = \frac{\Delta P}{\Delta P} \int_0^z \frac{dP_{pp}}{x(P_{pp})} \quad (2.85)$$

Rezolvarea prin integrare a relațiilor (2.84) și (2.85) se realizează fie grafic, fie analitic, după cum dependența $x(P_{pp})$ este cunoscută experimental sub formă de curbe sau este exprimată analitic.

În cazul relațiilor (2.3), (2.4), (2.5) s-a presupus că întreg precipitatul este sub acțiunea presiunii ΔP . Considerând rezistențele specifice de forma:

$$x_v = x_v^0 + B \Delta P^{\alpha_2} \quad (2.4)$$

se determină presiunea optimă de filtrare pentru obținerea unui volum maxim de filtrat într-un timp dat. Din relația

(2.50) rezultă:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\eta u}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{x_v^2 + B \Delta P^{s_2}}} \cdot \tau \quad (2.86)$$

Prin derivarea relației (2.86), considerând $dV/d(\Delta P) = 0$, se obține:

$$\Delta P_{optim} = \left[\frac{x_v^2}{B(s_2 - 1)} \right]^{\frac{1}{s_2}} \quad (2.87)$$

Relația trebuie considerată numai pentru $s_2 > 1$, ceea ce corespunde precipitatelor comprimbile.

Dacă în relația (2.86) se introduce valoarea medie a rezistenței specifice a precipitatului, se obține:

$$V = \sqrt{\frac{2}{\eta u}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{x_{v,med}^2}} \cdot \tau = \sqrt{\frac{2}{\eta u}} \cdot \sqrt{\tau \int_0^{\Delta P} \frac{dP_{pp}}{x_v(P_{pp})}} \quad (2.88)$$

Pentru a determina presiunea optimă de filtrare, ținând cont de relația (2.88), se caută maximum funcției $V(\Delta P)$. Valoarea ΔP care anulează derivata $dV/d(\Delta P)$ este diferența de presiune optimă de filtrare, volumul de filtrat fiind maxim, numai dacă rezistența specifică $x_v(P_{pp})$ devine infinită pentru $P_{pp} = P_{optim}$ ceea ce, evident, este contrazis de experiență. Concluzia obținută pe baza relației (2.88) cu privire la presiunea optimă de filtrare indică necesitatea completării acestor relații ținând cont și de rezistența mediului filtrant, $x_{mf} \neq 0$, care dacă nu trebuie neglijată, precum și de fenomenele care se manifestă în zona de contact între precipitat și mediul filtrant. Aceste fenomene legate de primul strat de precipitat depus, împreună cu rezistența mediului filtrant, determină o rezistență specifică inițială la filtrare, diferită de zero și care, în mod suplimentar, se poate modifica pe parcursul filtrării.

Dacă ținem seama de variația presiunii în precipitat (fig.2.3), din ecuația diferențială a filtrării, scriem sub forma (2.60), rezultă:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{P_1 - P_2}{\eta \cdot x_{mf}^2 \cdot (1 - s_2) \cdot V} = \frac{P_2 - P_1}{\eta \cdot x_{mf}^2} \quad (2.89)$$

Dacă presiunea P_1 în suspensie este constantă, presiunea P_2 la intrarea în membrana filtrantă este:

$$P_2 = P_0 + \eta \Sigma_m \cdot \frac{dV}{d\tau} = P_0 + \Sigma_m w \eta \quad (2.90)$$

Ținând cont de relația (2.84) se obține:

$$\Sigma_{med} = \frac{P_1 - P_0 - \eta \Sigma_m w}{P_1 - P_0 - \Sigma_m w \eta} \quad (2.91)$$

$$\int_0^{\Sigma_{med}} \frac{dP}{P} = \int_0^{\Sigma_{med}} \frac{dP}{x(P, P_0)}$$

și deci în cazul filtrării la presiune constantă, rezistența specifică medie apasă ca o funcție de diferența de presiune $\Delta P = P_1 - P_0$ și de viteza instantanee de filtrare, w .

În literatură se menționează că de fapt rezistența specifică depinde în mod suplimentar și de timp, prin intermediul volumului de filtrat obținut și deci:

$$x = x(P, P_0, \frac{dV}{d\tau}, V) \quad (2.92)$$

Neglijarea unor dependențe din relația (2.92) se poate face de la caz la caz pe baza unor cunoscători corespunzătoare.

Variația porozității precipitatului influențează rezistența specifică a acestuia. Porozitatea unui precipitat compact variază pe de o parte cu timpul, iar pe de altă parte în spațiu, de-a lungul înălțimii precipitatului. Porozitatea medie a întregului precipitat scade spre o valoare constantă după un interval relativ îndelungat de timp.

Din ecuația diferențială (2.60) se obține:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{\eta \Sigma \left(\frac{\Sigma_m}{r} + V \frac{\rho_s \Sigma_m}{1 - \Sigma} \right)} \quad (2.93)$$

Termenul:

$$V \cdot \frac{\rho_s \Sigma_m}{1 - \Sigma} = \frac{m}{s} \quad (2.94)$$

reprezintă masa solidului uscat din precipitatul depus pe

unitatea de suprafață filtrantă, la trecerea volumului de filtrat V_f , iar prin analogie, termenul $\frac{x}{1-x}$ reprezintă masa echivalentă a precipitatului depus pe unitatea de suprafață filtrantă, a cărei rezistență este egală cu rezistența x_m a mediului filtrant.

Masa solidului uscat din precipitatul depus pe filtru după trecerea unui volum de filtrat V_f se poate scrie și sub forma:

$$m_s = S \cdot \delta (1 - \varepsilon) \rho_s \quad (2.95)$$

Din relațiile (2.94) și (2.95) rezultă pentru înălțimea precipitatului expresia:

$$\delta = V \frac{\rho_s \cdot x}{1-x} \cdot \frac{1}{(1-\varepsilon) \rho_s} \quad (2.96)$$

Masa echivalentă $\frac{x}{1-x}$ va avea o înălțime echivalentă corespunzătoare:

$$\delta_{ech} = \frac{x}{1-x} \cdot \frac{1}{(1-\varepsilon) \rho_s} \quad (2.97)$$

Deci la începutul filtrării porozitatea precipitatului este mare, ea scade în timp, cu consecința corespunzătoare asupra mărimii δ_{ech} .

Bilanțul de materiale al operației de filtrare conduse la relația (2.59) de unde, masa solidului uscat din precipitatul obținut la trecerea unității de volum de filtrat, este:

$$\frac{m}{V_f} = \frac{\rho_s \cdot x}{1-x} \quad (2.98)$$

Se constată că această masă specifică depinde de factori constanți, densitatea filtratului ρ_s și concentrația suspensiei x , dar și de factorul variabil m , dependent de porozitatea ε a precipitatului, ceea ce se evidențiază în relațiile:

$$m = \frac{\text{masa precipitatului umed}}{\text{masa solidului uscat conținut}} \quad (2.99)$$

$$m = \frac{\text{masa solidă din masa umedității precipitatului}}{\text{masa solidului uscat}} \quad (2.100)$$

adică:

$$m = 1 + \frac{\rho_f \cdot \epsilon_p \cdot V_{\text{pori}}}{\rho_s (1 - \epsilon) V_{\text{pori}}} = 1 + \frac{\rho_f \cdot \epsilon}{\rho_s (1 - \epsilon)} \quad (2.101)$$

Deoarece variațiile porozității precipitatului sînt importante în primele momente ale filtrării, prin intermediul relației (2.101) rezultă variații importante ale raportului $\frac{m}{V_f^M}$. În cazul operațiilor de filtrare de durată foarte scurtă, a unor suspensii foarte concentrate rezultă variații accentuate ale rezistenței specifice, respectiv a permeabilității precipitatului. Doar în cazul suspensiilor foarte diluate, la care operația de filtrare durează mai mult, parametrul m se poate considera constant.

În cazul precipitatelor comprimate, viteza momentană definită de relația $w = \frac{dV}{d\tau}$ (2.12), nu este constantă în primele momente ale filtrării de-a lungul înălțimii precipitatului, în același moment (fig.2.2).

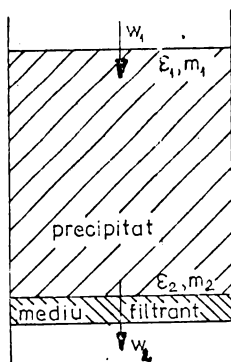


Fig.2.2

$m_1 > m_2$, iar pentru viteza momentană se obține:

$$w_2 = \frac{1 - m_2 \alpha}{1 - m_1 \alpha} w_1 = \frac{m}{s} \cdot \frac{1}{\rho_f} \cdot \frac{dm}{d\tau} \quad (2.102)$$

Deoarece $\frac{dm}{d\tau} < 0$, în concordanță cu scăderea porozității precipitatului în timp, din relația (2.102) rezultă că în primele momente ale filtrării $w_2 > w_1$.

Dacă se presupune viteza ca o funcție numai de timp și nu și de adâncimea în precipitat pot rezulta erori relativ mari. În operațiile de filtrare care duresc perioade relativ îndelungate, variațiile de viteză la diferite nivele ale precipitatului, devin necesare, iar corectitudinea curbelor $\tau/V(V)$ este afectată de erori numai în perioada inițială.

B. Dependența rezistenței specifice a precipitatului de concentrația suspensiei care se filtrează. Pentru diferite suspensii și condiții de filtrare, poate fi o funcție monoton crescătoare sau descrescătoare, poate să treacă printr-un maxim sau minimum, etc. Formulele propuse în literatură pentru descrierea dependenței arătate cu un caracter particular și sînt utile numai pentru precipitatele cu o rezistență monoton descrescătoare sau crescătoare cu concentrația.

Ținînd seama de complexitatea procesului de filtrare, dependența generală a rezistenței specifice a precipitatului de concentrația suspensiei (exprimată prin fracția masică a solidului), $r(x)$, se găsește prin alegerea unei formule care să cuprindă variantele posibile ale dependenței $r(x)$ de forma [19]:

$$r = a_0 + b_0 x^k \exp(d_0 x) \quad (2.103)$$

în care a_0 , b_0 , k și d_0 sînt coeficienți care determină forma curbei și care se identifică pentru fiecare suspensie pe cale experimentală și/sau calcul.

Pentru determinarea coeficienților din relația (2.103) se folosește metoda egalizării sau a celor mai mici pătrate. La metoda egalizării, prin schimbarea variabilelor și alegerea valorilor concentrației x care formează o progresie aritmetică cu rația h , se obține următoarea ecuație liniară:

$$y = 0,4343 h a_0 + k(\lg x_1 - \lg x_{1+1}) \quad (2.104)$$

$$\text{unde: } y = \lg(x_1 - a_0) - \lg(x_{1+1} - a_0) \quad (2.105)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Coeficientul a_0 apare sub forma:

$$a_0 = (x_1 x_2 - x_3^2) / (x_1 + x_2 - 2x_3) \quad (2.106)$$

unde r_1 și r_2 sînt rezistența precipitatului corespunzătoare la concentrațiile x_1 și x_2 , iar r_3 este rezistența precipitatului la $x_3 = \sqrt{x_1 x_2}$.

Virinea b_0 se găsește din ecuația:

$$\sum \lg(r_1 - a_0) = n \cdot \lg b_0 + k \sum \lg x_1 + 0,4343 d_0 \sum x_1 \quad (2.107)$$

Pentru funcții monotone descrescătoare sau crescătoare, rezultate bune se obțin cu relațiile:

$$r = a_0 + b_0 x^k \quad (2.108)$$

și

$$r = b_0 x^k \quad (2.109)$$

Pe baza premiselor experimentale și teoretice, procesul filtrării la concentrații mici ale fazei solide în suspensii se poate împărți convențional în două grupe. Prima grupă: dimensiunea particulelor fazei solide este mai mică decît dimensiunea porilor mediului filtrant, iar concentrația este insuficientă pentru formarea bolților deasupra porilor și formarea stratului de precipitat pe suprafața filtrului. Particulele pătrund în interiorul materialului filtrant și infundă treptat porii săi. Pentru această grupă de procese este caracteristică creșterea bruscă a rezistenței precipitatului la scăderea concentrației suspensiei. A doua grupă cuprinde filtrarea suspensiilor cu particule de formă asimetrică (neregulată), a căror dimensiune este mai mare sau de același ordin cu dimensiunea porilor. Asemenea particule se rețin de preferință pe suprafața filtrantă, formînd stratul de precipitat cu o rezistență hidraulică mică. La a doua grupă de procese este caracteristic că la $x \rightarrow 0$ și $r \rightarrow 0$.

2.3.3.2. Ecuațiile filtrării pentru suspensii îngroșate și stratificabile la diferență de presiune constantă [64].

Pentru a mări productivitatea filtrului, separarea suspensiilor concentrate în precipitat umed și filtrat se realizează uneori în două etape. La început suspensia se îngroșă prin decantare, iar apoi suspensia îngroșată obținută se separă prin filtrare. În literatură se precizează că ecuația filtrării unei suspensii îngroșate pe un filtru cu un mediu filtrant orizontal este analoagă cu cea pentru filtrarea suspensiilor obișnuite (2.47).

Stratificarea suspensiilor pe un filtru cu mediu filtrant orizontal, datorită forței gravitaționale, este accentuată de creșterea vitezei de sedimentare a particulelor solide și de scăderea vitezei de filtrare.

La filtrarea unor suspensii stratificabile se disting patru etape (fig.2.3).

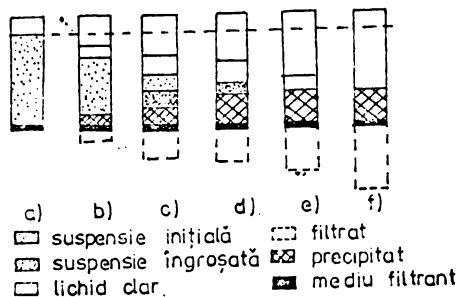


Fig.2.3

In momentul inițial, pe filtru se găsește numai stratul de suspensie inițială (fig.2.3,a). In cursul primei etape de filtrare (fig.2.3,b), la partea superioară apare un strat de lichid clar, ca urmare a sedimentării particulelor solide, iar pe filtru se depune un strat de precipitat; totodată prin membră ma filtrantă trece un volum de filtrat, iar nivelul lichidului de pe filtru scade corespunzător. Deci, prima etapă a filtrării suspensiilor stratificabile se caracterizează prin existența pe filtru a trei straturi: lichid clar, suspensie inițială și precipitat. In această etapă, viteza de filtrare fiind suficient de mare, particulele solide depuse sub acțiunea gravitației sînt înglobate în precipitatul format și nu se acumulează sub formă de suspensie îngroșată. In această situație raportul $\alpha = \frac{v_{PR}}{v_f}$ este variabil, fiind mai mare la început.

In a doua etapă, datorită scăderii vitezei de filtrare, din cauza măririi grosimii stratului de precipitat, particulele solide care sedimentează nu sînt înglobate complet în precipitat și la suprafața acestuia se formează un strat de suspensie îngroșată (fig.2.3.c). Din acest moment procesul decurge prin filtrarea stratului de suspensie îngroșată. Etapa a doua se caracterizează prin existența pe filtru a patru straturi: lichid clar, suspensie inițială, suspensie îngroșată și precipitat. Această etapă se încheie în momentul în care stratul de suspensie inițială dispare, aceasta fiind separată în întregime în lichid clar și suspensie îngroșată.

Etapa a treia (fig.2.3.d) se caracterizează prin existența pe filtru a trei straturi: lichid clar, suspensie îngroșată și precipitat. In această etapă, stratul de lichid clar are deci o înălțime

time constantă, iar procesul decurge prin filtrarea suspensiei îngroșate, pînă la dispariția stratului respectiv.

În cursul celei de a patra etape are loc filtrarea lichidului clar prin stratul de precipitat (fig.2.3.e), procesul încheindu-se cînd lichidul clar dispare (fig.2.3.f).

Pentru prima etapă a filtrării suspensiilor stratificabile, ecuația filtrării se deduce astfel.

Pentru mărimea $u = \frac{V_{DP}}{V_f}$ se scrie în acest caz expresia:

$$u = \frac{V_{DP}}{V_f + V_{l.c}} = \frac{\frac{V_{DP}}{S}}{V_f + \frac{l.c}{S}} \quad (2.110)$$

în care $V_{l.c}$ este volumul lichidului clar separat, V_f - volumul filtratului, V_{pp} - volumul corespunzător al precipitatului obținut, S fiind secțiunea transversală constantă a filtrului.

Considerînd constantă viteza de sedimentare, w_{sed} , a particulelor solide se poate scrie:

$$\frac{V_{l.c}}{S} = w_{sed} \cdot \tau \quad (2.111)$$

în care τ este durata procesului.

Din relațiile (2.110) și (2.111) se obține:

$$\frac{V_{DP}}{S} = \delta = u \left(V_f + \frac{V_{l.c}}{S} \right) = u \left(V_f + w_{sed} \cdot \tau \right) \quad (2.112)$$

Înlocuind această valoare a grosimii precipitatului, δ , în ecuația diferențială (2.44) se obține:

$$\frac{dV}{d\tau} = - \frac{\Delta P}{\eta \left[r_m + r_v u (V_f + w_{sed} \cdot \tau) \right]} \quad (2.113)$$

sau

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta P}{r_m + \eta r_v u (V_f + w_{sed} \cdot \tau)} \quad (2.114)$$

Cu notația:

$$\frac{r_v u}{\Delta P} = a \quad (2.115)$$

se obține:

$$\frac{dV}{dZ} = \frac{1}{a \cdot V + a \cdot w_{sed} \cdot Z + \frac{R}{\Delta P}} \quad (2.116)$$

de unde:

$$\frac{dZ}{dV} = aV + a \cdot w_{sed} \cdot Z + \frac{R}{\Delta P} \quad (2.117)$$

Prin integrarea ecuației (2.117) se obține ecuația pentru prima etapă a filtrării suspensiilor stratificabile sub forma:

$$Z = \left(\frac{1}{w_{sed}} + \frac{R}{\Delta P} \right) \left(\frac{a w_{sed} \cdot V}{a \cdot w_{sed}} - 1 \right) - \frac{V}{w_{sed}} \quad (2.118)$$

Pentru aplicații practice, ecuația (2.118) se transformă într-o ecuație adimensională [51,52]

$$\frac{w_{sed} \cdot Z}{V} = \left(1 + \frac{w_{sed} \cdot R}{\Delta P} \right) \left(\frac{a w_{sed} \cdot V}{a \cdot w_{sed} \cdot V} - 1 \right) - 1 \quad (2.119)$$

în care se pot introduce trei criterii de filtrare, nedimensionale:

$$Fl_{II} = \frac{w_{sed} \cdot Z}{V} \quad (2.120), \quad Fl_{III} = a \cdot w_{sed} \cdot V \quad (2.121)$$

și

$$Fl_{IV} = \frac{w_{sed} \cdot R}{\Delta P} \quad (2.122)$$

Ecuația filtrării pentru etapă se scrie și sub forma:

$$Fl_{II} = (1 + Fl_{IV}) \frac{Fl_{III} - 1}{Fl_{III}} - 1 \quad (2.123)$$

Criteriile de filtrare definite prin relațiile (2.120) (2.121), (2.122) au sens fizic. Criteriul Fl_{II} are o structură identică cu criteriul de amcronic care caracterizează evoluția proceselor (nestabilizate) nestăționare în care se încadrează și procesul de filtrare considerat.

Ținând seama de relația (2.111) se obține:

$$Fl_{II} = \frac{W_{sed} \cdot z}{V} = \frac{V_{l.c.}}{\frac{V_f}{S}} = \frac{V_{l.c.}}{V_f} \quad (2.124)$$

adică criteriul Fl_{II} reprezintă raportul dintre grosimea stratului de lichid clar și grosimea stratului de filtrat la un moment dat.

Ținând cont de relațiile (2.55) și (2.115), pentru Fl_{III} se obține:

$$Fl_{III} = \frac{\eta \cdot r_v \cdot \frac{V_{DP}}{V_f}}{\Delta P} \cdot W_{sed} \cdot \frac{V_f}{S} = \frac{W_{sed} \cdot R_{DP}}{\Delta P} \quad (2.125)$$

Sub această formă, criteriul Fl_{III} este analog cu criteriul Fl_{IV} . Criteriul Fl_{III} cuprinde rezistența stratului de precipitat, iar criteriul Fl_{IV} rezistența mediului filtrant, Numărătorii relațiilor (2.125) și (2.122) cuprind factorii care determină mărirea cantității de lichid clar, iar numitorii factorul care determină creșterea cantității de filtrat.

În concluzie, din ecuația criterială (2.123) se constată că raportul dintre grosimea stratului de lichid clar și grosimea stratului de filtrat crește odată cu creșterea factorilor care determină formarea lichidului clar și scade cu creșterea factorului care contribuie la formarea filtratului.

Dacă rezistența mediului filtrant se poate neglija ($Fl_{IV}=0$) ecuația (2.123) devine:

$$Fl_{II} = \frac{Fl_{III}}{Fl_{III}} - 1 \quad (2.126)$$

În literatură se precizează că valoarea criteriului $Fl_{III} \in (0,2)$ și ca urmare, valoarea criteriului $Fl_{II} \in (0,2.2)$, ceea ce corespunde unei largi game de rapoarte între cantitatea de lichid clar și cantitatea de filtrat.

Pentru etapele a doua și a treia a filtrării suspensiilor stratificabile ecuațiile sînt identice cu cele de la filtrarea cu formare de precipitat, în care trebuie introdusă valoarea raportului determinat pe cale experimentală, între volumul precipitatului și volumul de filtrat pentru suspensia îngroșată.

În etapa a patra viteza de filtrare este constantă și egală cu viteza de filtrare din momentul final al etapei a treia,

deoarece grosimea precipitatului este aceeași, ecuația fiind identică cu ecuația de filtrare a unui lichid pur printr-un strat de precipitat cu grosime constantă.

Relațiile deduse anterior (2.118) și (2.123) sînt valabile pentru filtrarea suspensiilor stratificabile cînd direcția și sensul de curgere a filtratului sînt aceleași cu cele ale forței de gravitație.

Pentru primul stadiu al filtrării suspensiilor stratificabile, în cazul cînd sensul acțiunii forței de gravitație și al deplasării filtratului sînt opuse, ecuația caracteristică diferă de (2.118) doar prin semne și are forma:

$$\tau = \left(-\frac{1}{w_{sed}} + \frac{R}{\Delta P} \right) \left(\frac{a - w_{sed} V}{-a w_{sed}} - 1 \right) + \frac{V}{w_{sed}} \quad (2.127)$$

sau

$$\tau = \left(\frac{1}{w_{sed}} - \frac{R}{\Delta P} \right) \left(\frac{a - w_{sed} V}{a w_{sed}} - 1 \right) + \frac{V}{w_{sed}} \quad (2.128)$$

Deoarece suspensia se află sub mediul filtrant, prima etapă se încheie atunci cînd viteza de filtrare descreștătoare, $w = \frac{dV}{d\tau}$, devine egală cu viteza de sedimentare a particulelor solide, w_{sed} , cînd raportul $u = \frac{R R}{\tau}$ devine egal cu zero. În etapa a doua a procesului are loc și în acest caz, filtrarea lichidului clar prin stratul de precipitat cu grosime constantă.

2.3.4. Elemente de operare privind asigurarea productivității maxime a filtrelor cu funcționare discontinuă.

Regimul rațional de lucru al unei instalații de filtrare se alege ținînd seama de realizarea unei productivități maxime, a utilității economice, ținînd cont de particularitățile tehnologice în ansamblu [31, 32, 42].

Din ecuația generală a filtrării cu formare de precipitat (2.44), rezultă că - dacă celelalte condiții de lucru sînt constante - viteza de filtrare este invers proporțională cu grosimea precipitatului, respectiv cu volumul de filtrat obținut. Ca urmare, pentru mărirea productivității filtrului, este necesar ca îndepărtarea precipitatului de pe mediul filtrant să se facă cît mai des și cît mai rapid. Această soluție este

valabilă numai pentru filtrele cu funcționare continuă, deoarece la filtrele cu funcționare periodică îndepărtarea precipitatului obținut implică oprirea procesului de filtrare. La filtrele cu funcționare discontinuă un ciclu complet de lucru cuprinde operații principale productive - filtrarea, spălarea și desprinderea precipitatului de pe membrana filtrantă și operații auxiliare neproductive - pregătirea filtrului, introducerea suspensiei și îndepărtarea precipitatului.

Se demonstrează că durata operațiilor principale, τ_{princ} este proporțională cu pătratul volumului specific de filtrat, dacă rezistența membranei filtrante se neglijează:

$$\tau_{\text{princ}} = \tau + \tau_{\text{sp}} + \tau_{\text{deah}} = DV^2 \quad (2.129)$$

Durata operațiilor auxiliare se consideră constantă fiind independentă de grosimea straturii de precipitat format, ea depinzând de tipul constructiv al filtrului și de condițiile de exploatare.

Productivitatea medie a filtrului în unitatea de timp, în raport cu un ciclu de funcționare τ_{ciclu} poate fi caracterizată prin viteza medie convențională de filtrare, definită prin relația:

$$w_{\text{conv}} = \frac{V}{\tau_{\text{ciclu}}} = \frac{\sqrt{\frac{\tau_{\text{princ}}}{D}}}{\tau_{\text{princ}} + \tau_{\text{aux}}} \quad (2.130)$$

Pentru determinarea productivității maxime se calculează derivata:

$$\frac{dw_{\text{conv}}}{d\tau} = \frac{\tau_{\text{aux}} - \tau_{\text{princ}}}{2\sqrt{D \cdot \tau_{\text{princ}}} (\tau_{\text{princ}} + \tau_{\text{aux}})^2} \quad (2.131)$$

Din condiția $\frac{dw_{\text{conv}}}{d\tau} = 0$ rezultă:

$$\tau_{\text{princ}} = \tau_{\text{aux}} \quad (2.132)$$

adică productivitatea maximă a filtrului se obține atunci când durata operațiilor principale este egală cu durata operațiilor

auxiliare. Dacă membrana filtrantă are o rezistență mare, care nu poate fi neglijată, productivitatea maximă se realizează pentru $\tau_{primo} > \tau_{aux}$. În cazul unui ciclu de funcționare fără operațiile de spălare și suflare și $x_m \neq 0$ se indică relația:

$$\tau_{primo} = \tau_{aux} + 2 \sqrt{\frac{\eta \cdot x_m^2}{2 \Delta P \cdot x_v \cdot u} \cdot \tau_{aux}} \quad (2.133)$$

Din relația (2.133) se obține:

$$\frac{\tau_{primo}}{\tau_{aux}} = 1 + 2 \sqrt{\frac{\eta \cdot x_m^2}{2 \Delta P \cdot x_v \cdot u \cdot \tau_{aux}}} \quad (2.134)$$

sau

$$\frac{\tau_{primo}}{\tau_{aux}} = 1 + 2 \sqrt{Fl_I} = 1 + 2 Fl_I^{0,5} \quad (2.135)$$

În care s-a introdus criteriul de filtrare Fl_I definit prin expresia:

$$Fl_I = \frac{\eta \cdot x_m^2}{2 \Delta P \cdot x_v \cdot u \cdot \tau_{aux}} \quad (2.136)$$

Valoarea criteriului Fl_I corespunde orientativ domeniului $Fl_I \in (0,10)$, valoarea zero se corelează cu cazul

$$x_m = 0 \text{ și } \frac{\tau_{primo}}{\tau_{aux}} = 1.$$

La filtrele cu funcționare discontinuă regimul de lucru corespunzător productivității maxime nu coincide cu regimul de filtrare cel mai avantajos din punct de vedere economic, deoarece pentru realizarea productivității maxime este necesar să se efectueze cu frecvență mare operațiile auxiliare care implică muncă multă și un consum de energie mărit.

Din relația (2.47) notînd

$$A = \frac{x_m}{u \cdot x_v} \quad (2.137) \text{ și } B = \frac{2 \Delta P}{\eta \cdot u \cdot x_v} \quad (2.138)$$

se obține ecuația:

$$V^2 + 2AV = B\tau \quad (2.139)$$

a cărei soluție este: $V = -A + \sqrt{A^2 + B\tau}$ (2.140)

În cazul unui ciclu de funcționare la care operația principală cuprinde numai filtrarea, $\tau = \tau_{\text{princ}}$ și deci:

$$V = -A + \sqrt{A^2 + B\tau_{\text{princ}}} \quad (2.141)$$

Viteza medie convențională de filtrare va fi:

$$w_{\text{conv}} = \frac{V}{\tau_{\text{princ}} + \tau_{\text{aux}}} = \frac{-A + \sqrt{A^2 + B\tau_{\text{princ}}}}{\tau_{\text{princ}} + \tau_{\text{aux}}} \quad (2.142)$$

Reprezentarea grafică a relației (2.142), $w_{\text{conv}}(\tau_{\text{princ}})$ având ca parametru valori ale rezistenței membranei filtrante $r_{m1} < r_{m2} < r_{m3}$, se prezintă în fig.2.4. Se constată că la diferite valori ale rezistenței membranei filtrante, toate

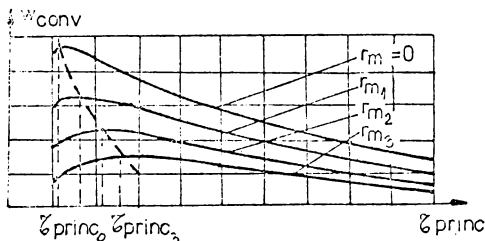


Fig.2.4

curbele prezintă un maximum suficient de plat, ca umare productivitatea filtrului se micșorează relativ puțin față de productivitatea maximă, la valori ale timpului principal τ_{princ} mult mai mari decât valorile timpului principal corespunzător maximumului fiecărei curbe, $\tau_{\text{princ } i}$ ($i=1,2,3$). În aceste condiții, operațiile auxiliare se efectuează mai rar cu consecințe economice avantajoase. Din analiza curbelor $w_{\text{conv}}(\tau_{\text{princ}})$ rezultă o situație mai avantajoasă pentru cazurile în care rezistența membranei filtrante r_m este mai mare, curbele în zona maximumului fiind mai aplatizate.

2.3.5. Metode pentru identificarea tipului procesului de filtrare a suspensiilor solid-lichid.

A. Metoda grafică

Identificarea tipului procesului de filtrare conform clasificării prezentate în paragraful 2.3.2 ($n=2; 1,5; 0,5; 1$ și 0) este posibilă după alura curbelor obținute prin reprezen-

tarea grafică în următoarele sisteme de coordonate [42]

$$w(V) ; \frac{\bar{z}}{V}(\tau) ; \frac{A}{w}(\tau) ; \frac{A}{\sqrt{w}}(V) \text{ și } \frac{\bar{z}}{\sqrt{w}}(V)$$

(fig.2.5.a,b,c,d,e), fiecare tip caracterizându-se printr-o singură dependență liniară, diferită în funcție de valoarea exponentului n . Curbele notate cu indicii 1,2,3,4,5 corespund celor 5 tipuri de filtrare din tabelul 2.1. Pentru a identi-

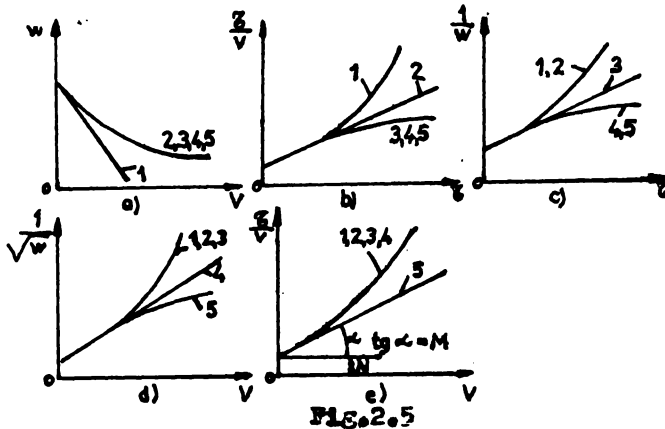


FIG.2.5

fica tipul de filtrare este suficient să se construiască numai două grafice și anume în coordonate $\bar{z}(\tau)$ (fig.2.5 b) și $\bar{z}(V)$ (fig.2.5e). Prin metoda excluderii se poate stabili tipul de filtrare, după alura curbelor obținute. Dacă pe primul grafic linia este concavă, are loc o filtrare cu infundarea completă a porilor, iar dacă linia este dreaptă intervine o filtrare cu infundarea treptată a porilor. Linia dreaptă în cel de-al doilea grafic indică o filtrare cu formarea precipitatului. Dacă în primul grafic se obține o curbă convexă, iar în cel de-al doilea una concavă, atunci filtrarea are loc după tipul intermediar sau cu infundarea porilor precipitatului care se formează și urmează să se construiască încă un grafic în coordonatele $\frac{A}{w}(\tau)$ sau $\frac{A}{\sqrt{w}}(V)$. Pentru determinarea tipului de filtrare, pe baza graficelor din fig.2.5 se preferă graficele ale căror coordonate conțin mărimile V și τ determinabile mai exact în timpul experimentelor, față de determinarea vitezei de filtrare.

Se menționează că la construcția graficelor de filtrare a suspensiilor reale se pot neglija punctele de început, deoarece tipul de filtrare se poate modifica prin sedimentarea fazei

solide și datorită particulelor fine antrenate cu filtratul.

B. Metoda grafic-qualitativă

În literatură [58] se introduce noțiunea de viteză de infundare, w_1 , datorită faptului că mărirea rezistenței totale la filtrare, R , se determină în principal astupării porilor membranei filtrante:

$$w_1 = \frac{dR}{dV} \quad (2.143)$$

Scenția generalizată a filtrării se poate scrie sub formă:

$$w_1 = \Delta R^n \quad (2.144)$$

În care exponentul n și constanta Δ caracterizează diversele tipuri de filtrare prezentate sintetizat în tabelul 2.1. Deoarece $R = \eta R_v$, rezultă legătura între constantele k și Δ din relațiile (2.12) și (2.144) $k = \Delta \cdot \eta^{n-1}$.

Ținând cont că $R = \Delta P \frac{dZ}{dV}$ din relația (2.143) se obține:

$$w_1 = \frac{d}{dV} \left(\Delta P \cdot \frac{dZ}{dV} \right) = \Delta P \frac{d^2 Z}{dV^2} \quad (2.145)$$

Din relațiile (2.144) și (2.145) rezultă:

$$\frac{\Delta P d^2 Z}{dV^2} = \Delta \left(\frac{\Delta P dZ}{dV} \right)^n \quad (2.146)$$

Logaritmand relația (2.146) se obține:

$$\lg \left(\Delta P \cdot \frac{d^2 Z}{dV^2} \right) = \lg \Delta + n \lg \left(\Delta P \frac{dZ}{dV} \right) \quad (2.147)$$

respectiv:

$$\begin{aligned} \lg \frac{d^2 Z}{dV^2} &= \lg \Delta + n \lg \Delta P - \lg \Delta P + n \cdot \lg \frac{dZ}{dV} \\ &= B + n \lg \frac{dZ}{dV} \end{aligned} \quad (2.148)$$

În care $B = \lg \Delta + n \lg \Delta P - \lg \Delta P$.

În sistemul de coordonate $\lg \frac{d^2z}{dv^2}$ și $\lg \frac{dz}{dv}$ relația (2.146) reprezintă o dreaptă a cărei pantă $\lg \gamma = n$, iar ordonata la origine este B (fig.2.6.a).

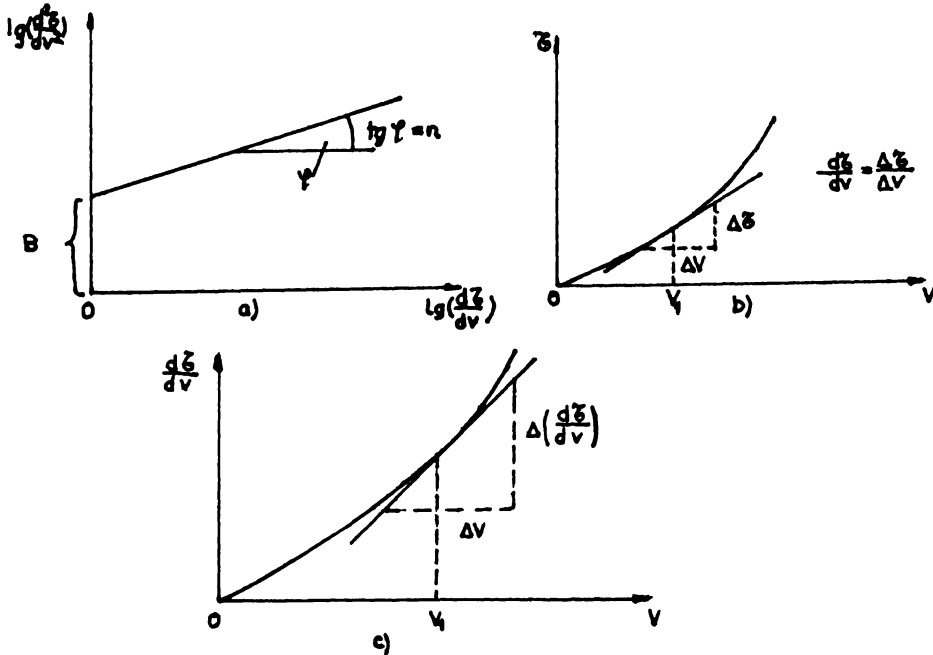


Fig.2.6.

În literatură [8] raportul $\frac{d^2z}{dv^2}$ este denumit coeficient de filtrabilitate și poate fi considerat constant la o presiune, temperatură și viscozitate dată, fiind o măsură a filtrabilității suspensiei.

În practică este posibil ca filtrarea să nu se încadreze riguros în nici unul din tipurile prezentate și totodată uneori să se modifice în timp caracterul procesului de filtrare, ceea ce se exprimă prin valori diferite ale parametrilor "k" și "n" din ecuația generalizată a filtrării.

C. Metoda analitică

Ținând cont de relația (2.146) și deoarece $R = \eta R_v$, iar $k = A \cdot \eta^{n-1}$, se obține:

$$\Delta P \cdot \frac{d^2z}{dv^2} = \frac{k}{\eta} (\Delta P \cdot \frac{dz}{dv})^n \quad (2.149)$$

respectivi:

$$\frac{d^2 z}{dv^2} = k \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{n-1} \left(\frac{dz}{dv} \right)^n \quad (2.150)$$

Ținând cont că $\frac{dv}{dz}$ reprezintă viteza instantanee de filtrare, w , rezultă:

$$\frac{d^2 z}{dv^2} = k \left(\frac{\Delta P}{\eta} \right)^{n-1} \cdot \frac{1}{w^n} = \frac{k_1}{w^n} \quad (2.151)$$

Termenul $\frac{d^2 z}{dv^2}$ se exprimă sub formă [21]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dv^2} &= \frac{d}{dv} \left(\frac{dz}{dv} \right) = \frac{d}{dv} \left(\frac{1}{\frac{dv}{dz}} \right) = - \frac{1}{\left(\frac{dv}{dz} \right)^2} \cdot \frac{d}{dv} \left(\frac{dv}{dz} \right) \\ &= - \frac{1}{\left(\frac{dv}{dz} \right)^2} \cdot \frac{d}{dz} \left(\frac{dv}{dz} \right) \cdot \frac{dz}{dv} = - \frac{1}{\left(\frac{dv}{dz} \right)^2} \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} \cdot \frac{1}{\frac{dv}{dz}} \quad (2.152) \end{aligned}$$

sau:

$$\frac{d^2 z}{dv^2} = - \frac{1}{w} \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} \quad (2.153)$$

Din relațiile (2.151) și (2.153) rezultă:

$$k_1 \cdot \frac{1}{w^n} = - \frac{1}{w} \cdot \frac{d^2 v}{dz^2} \quad (2.154)$$

Deoarece $\frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{d}{dz} \left(\frac{dv}{dz} \right) = \frac{dv}{dz} \cdot \frac{d}{dz} \left(\frac{dv}{dz} \right)$ (2.155)

se obține:

$$k_1 \cdot \frac{1}{w^n} = - \frac{1}{w} \cdot \frac{dv}{dz} \cdot \frac{d}{dz} \left(\frac{dv}{dz} \right) \quad (2.156)$$

sau

$$dz = - \frac{1}{k_1} w^{n-3} dv \quad (2.157)$$

Prin integrare rezultă:

$$\int_0^{\tau} d\tau = - \int_{w_0}^w \frac{w^{n-2}}{k_2} dw \quad (2.158)$$

de unde:

$$\tau = \frac{1}{k_2(n-2)} w^{n-2} \Big|_{w_0}^w = \frac{w^{n-2}}{k_2(n-2)} + \frac{w_0^{n-2}}{k_2(2-n)} \quad (2.159)$$

sau:

$$\tau = \frac{w^{n-2}}{(n-2)k_2 \left(\frac{\Delta P}{\eta}\right)^{n-1}} + \frac{w_0^{n-2}}{(2-n)k_2 \left(\frac{\Delta P}{\eta}\right)^{n-1}} \quad (2.160)$$

Relația (2.160) este în concordanță cu relația (2.37).

Cu notațiile:

$$c_1 = \frac{1}{(n-2)k_2 \left(\frac{\Delta P}{\eta}\right)^{n-1}} \quad (2.161)$$

$$c_2 = n - 2 \quad (2.162)$$

$$c_3 = \frac{w_0^{n-2}}{(n-2)k_2 \left(\frac{\Delta P}{\eta}\right)^{n-1}} \quad (2.163)$$

expresia (2.160) devine:

$$\tau = c_3 - c_2 w^{c_2} \quad (2.164)$$

sau

$$w = \left(\frac{c_3 - \tau}{c_2} \right)^{\frac{1}{c_2}} \quad (2.165)$$

* Considerând cunoscută pe cale experimentală curba $w(\tau)$, în continuare se prezintă o metodă pentru determinarea exponentului "n" din ecuația generalizată a filtrării, ceea ce va permite aprecierea tipului de filtrare. Dacă tipul filtrării se modifică în timp, atunci prin determinarea exponentului "n" în

diferite etape ale filtrării, se pot obține concluzii și aprecieri corespunzătoare.

Se aleg două puncte $P_1(\tau_1, w_1)$ și $P_2(\tau_2, w_2)$ relativ apropiate, care permit determinarea punctului P_3 , a cărei ordonată w_3 satisface relația:

$$w_3 = \sqrt{w_1 \cdot w_2} \quad \text{sau} \quad w_3^2 = w_1 \cdot w_2 \quad (2.166)$$

iar ^{din} graficul curbei se determină valoarea τ_3 corespunzătoare ordonatei w_3 , fig.2.7.

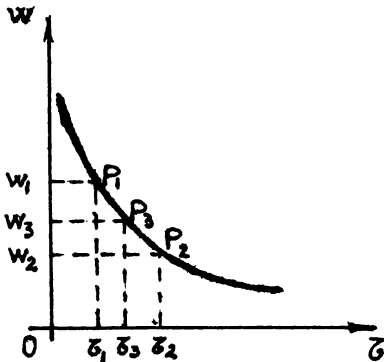


Fig.2.7

Din relațiile (2.165) și (2.166) considerate pentru punctele P_1 , P_2 și P_3 , se obține:

$$\left(\frac{c_3 - \tau_3}{c_1}\right)^{\frac{2}{c_2}} = \left(\frac{c_3 - \tau_1}{c_1}\right)^{\frac{1}{c_2}} \cdot \left(\frac{c_3 - \tau_2}{c_1}\right)^{\frac{1}{c_2}} \quad (2.167)$$

de unde pentru c_3 rezultă:

$$c_3 = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2 - \tau_3^2}{\tau_1 + \tau_2 - 2\tau_3} \quad (2.168)$$

Pentru $\tau = 0$, $w = w_0$, din relația (2.165) se obține:

$$\frac{c_3}{c_1} = w_0^{c_2} \quad (2.169)$$

sau:

$$c_1 = \frac{c_3}{w_0^{c_2}} \quad (2.170)$$

Din relațiile (2.164) și (2.170) se obține:

$$c_3 - \tau = c_3 \left(\frac{\tau}{w_0}\right)^{c_2} \quad (2.171)$$

Prin logaritizarea relației (2.171) rezultă:

$$c_2 = \frac{\lg\left(\frac{c_3 - \tau}{c_3}\right)}{\lg\left(\frac{\tau}{w_0}\right)} \quad (2.172)$$

respectiv $n = C_2 + 2$.

In continuare, din relația (2.161) sau (2.163) se poate calcula k .

D. Procesul de filtrare cu formare de precipitat este caracterizat prin valoarea $n=0$ a exponentului din ecuația generalizată a filtrării (2.18), care devine în acest caz

$$\frac{dR}{dV} = k \quad (2.173)$$

din care rezultă relația cunoscută (2.48) scrisă sub forma:

$$\tau = K_0 V^2 + N_0 V \quad (2.174)$$

Din relația (2.174) se deduce forma liniară:

$$\frac{\tau}{V} = LV + N \quad (2.175)$$

in care mărimile constante L și N au expresiile cunoscute (relația 2.52):

$$L = \frac{\eta K_0 u}{2 \Delta P} \quad (2.176)$$

$$N = \frac{\eta K_0}{\Delta P} \quad (2.177)$$

Din relația (2.174) se obține:

$$V = -\frac{N}{2L} + \sqrt{\frac{N^2}{4L^2} + \frac{\tau}{L}} \quad (2.178)$$

de unde, prin derivare, pentru viteza de filtrare se obține expresia:

$$w = \frac{dV}{d\tau} = \frac{1}{2L \sqrt{\frac{N^2}{4L^2} + \frac{\tau}{L}}} \quad (2.179)$$

Ecuația (2.179) poate fi liniarizată sub forma:

$$\frac{L}{w} = 4LN\tau + N^2 \quad (2.180)$$

În fig.2.8 a sînt prezentate curbele $w(\tau)$ - relația (2.179), curba 1 și $w^{-2}(\tau)$ - relația (2.180), dreapta 2, pentru rezistența specifică a precipitatului τ_p , considerată

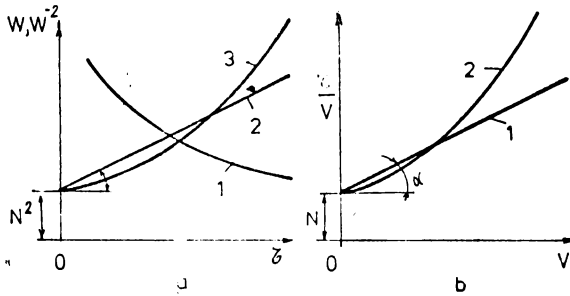


Fig.2.8

constantă. Experimental se constată în unele situații o dependență $w^{-2}(\tau)$ neliniară, datorită schimbării rezistenței specifice cu creșterea volumului filtratului, ceea ce corespunde în fig.2.8.a

curbei 3.

La presiune constantă, evaluarea modificării rezistenței specifice a precipitatului $\tau_p(V)$ se poate face folosind relația:

$$\tau_p = \tau_{vp} V^a \quad (2.181)$$

unde τ_{vp} și a sînt constante.

Din ecuațiile (2.174) și (2.181) se obține:

$$\tau = K_2 V^{2+a} + NV \quad (2.182)$$

sau

$$\frac{\tau}{V} = K_1 V^{2+a} + N \quad (2.183)$$

Creșterile experimentale indică că eadată cu creșterea volumului filtratului rezistența specifică a precipitatului poate să crească ($a > 0$) sau să se micșoreze ($a < 0$). În fig. 2.8, b este prezentată dependența $\tau/V(V)$ în cazul în care τ_p este constant, curba 1, relația (2.175) respectiv $\tau_p = f(V)$, curba 2, relația (2.183) (vezi și fig.2.5 c). Determinarea constantelor din ecuația (2.183) se face aplicînd metode numerice cu calculatoarele sau grafic-analitice. Linearizarea ecuației (2.183) se face prin logaritmare. Pentru determinarea constantei "a" se folosește curba 2 (fig.2.8, b) corespunzătoare ecuației (2.183) [20]. Ecuația (2.183) corespunde în cazul general unei curbe

de tipul $y(x)$, reprezentată grafic în fig.2.9 curba 1. Se calculează funcția $s(x) = \frac{y}{x}$, care reprezentată grafic corespunde curbei 2, (fig.2.9) la care coordonatele punctului de minim, pentru care funcția $s = s_{\min}$, se obțin din condiția $\frac{ds}{dx} = 0$. Constanta s_{\min} se poate obține grafic prin trasarea tangentei la funcția $s(x)$ paralelă cu axa absciselor. Pe de altă parte, tangenta dusă la curba $y(x)$, care trece și prin originea de coordonate, este o dreaptă $y=mx$, linia 3, fig.2.9, care fixează punctul de tangență T pe curba 1 în corelare cu coordonatele minimului funcției

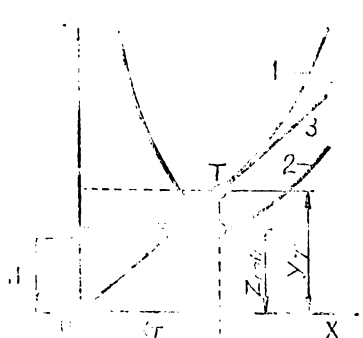


Fig.2.9

$s(x)$.

În studiul procesului de filtrare analizat se identifică $x=V$, $y = \tau/V$ și $s = \frac{\tau}{V^2}$.

Din relația (2.183) se obține funcția $\frac{\tau}{V^2} (V)$ pentru care se calculează derivata:

$$\frac{d(\frac{\tau}{V^2})}{dV} = aM_1 V^{a-1} - \frac{N}{V^2} \quad (2.184)$$

de unde, prin egalizare cu zero, se calculează valoarea abscisei, pentru care funcția $\frac{\tau}{V^2} = \min$.

$$aM_1 V^{a-1} - \frac{N}{V^2} = 0 \quad (2.185)$$

sau:

$$V = \sqrt{\frac{N}{aM_1}} = V_2 \quad (2.186)$$

Ordonata punctului de tangență T, situat pe curba $\frac{\tau}{V^2}(V)$ se obține din relațiile (2.183) și (2.186)

$$\left(\frac{\tau}{V^2}\right)_T = M_2 \left(\sqrt{\frac{N}{aM_1}}\right)^{1+a} + N = \frac{N(1+a)}{a} \quad (2.187)$$

Constanta N se poate determina pe baza curbei $\frac{z}{V}(V)$, fig.2.6.b, iar apoi din relațiile (2.186) și (2.187) se determină constantele a și M_1 sub forma:

$$a = \frac{N}{\left(\frac{z}{V}\right)_T - N} \quad (2.188)$$

respectiv

$$M_1 = \frac{N}{a} \cdot \frac{1}{V_T^{1+a}} \quad (2.189)$$

Prin determinarea constantelor M_1 , N și a , devine cunoscută funcția $z(V)$ exprimată prin relația (2.182) care caracterizează procesul real de filtrare.

2.3.6. Exemple de calcul pentru identificarea tipului filtrării

Cercetările au fost îndreptate spre stabilirea tipului procesului de filtrare în cazul suspensiilor apoase de hidroxid de magneziu. Datorită faptului că rezistența specifică a unui precipitat depinde de concentrația în fază solidă a suspensiei [60] s-a studiat filtrarea unor suspensii cu concentrații diferite, și anume: 6,67%, 9,87% și 17,87% $Mg(OH)_2$. Suspensiile au provenit din diluarea unei probe de hidroxid de magneziu, obținută din aceeași garză de la o instalație pilot pentru valorificarea magneziului din dolomită, după procedeul grefat pe industria sodiei amoniacale [14,65].

Pentru evidențierea influenței presiunii asupra procesului s-au efectuat determinările, în cazul fiecărei concentrații, la cinci diferențe de presiune : 100, 200, 300, 400 și 500 mmHg, menținută constantă în timpul filtrării.

Datele obținute experimental, sub forma curbelor de filtrare, ce redau dependența volumului specific de filtrat în funcție de timp, $V(z)$ au fost prelucrate pe baza metodelor prezentate în 2.3.5.

În fig.2.10 se redau rezultatele obținute la filtrarea suspensiei cu 17,87% $Mg(OH)_2$, la cele 5 diferențe de presiune. Deoarece nu s-a putut stabili tipul filtrării, construind pentru suspensia de hidroxid de magneziu curbale din fig.2.5 a,b,c,d,e

ceea ce înseamnă că filtrarea nu se încadrează în nici unul din cele cinci cazuri, caracterizate prin $n=2;1,5;1;0,5$; și 0, a fost necesară aplicarea metodelor prezentate la 2.3.5 B și C.

Din dependența $z(V)$ se obțin pe rând, prin diferențiere grafică, derivata întâia, $\frac{dz}{dV}$, apoi a doua, $\frac{d^2z}{dV^2}$, iar din reprezentarea logaritmică a variației derivatei a doua în funcție de derivata întâia, pentru aceeași valoare a volumului specific se obțin parametrii "n" și "k" din ecuația generalizată (fig. 2.11 - 2.20).

În toate cazurile, se observă pentru derivata a doua un punct de inflexiune, iar în reprezentarea logaritmică, două drepte cu pante diferite, n_1 și n_2 . Perechile de valori "n" și "k" determinate se prezintă sub formă tabelară.

Concentrația suspensiei: 6,67%

ΔP mmHg	Zona de început		Zona a doua		V tranziție m^3/m^2
	n_1	k_1	n_2	k_2	
100	0,54	$8,95 \times 10^5$	0,30	$1,47 \times 10^{10}$	$1,02 \times 10^{-2}$
300	0,50	$9,34 \times 10^7$	0,21	$2,71 \times 10^{11}$	$1,00 \times 10^{-2}$
500	0,52	$1,55 \times 10^{10}$	0,22	$2,45 \times 10^{11}$	$1,03 \times 10^{-2}$
Concentrația suspensiei 9,87%					
100	0,40	$8,78 \times 10^8$	0,18	$3,91 \times 10^{11}$	$1,52 \times 10^{-2}$
300	0,44	$2,91 \times 10^8$	0,19	$2,99 \times 10^{11}$	$1,60 \times 10^{-2}$
500	0,46	$2,25 \times 10^8$	0,19	$4,45 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{-2}$
Concentrația suspensiei 18,47%					
100	0,41	$1,72 \times 10^9$	0,21	$4,89 \times 10^{11}$	$1,30 \times 10^{-2}$
300	0,32	$3,08 \times 10^{10}$	0,20	$8,97 \times 10^{11}$	$0,87 \times 10^{-2}$
500	0,52	$1,067 \times 10^8$	0,19	$12,2 \times 10^{11}$	$1,10 \times 10^{-2}$

Din aceste valori rezultă că rezistența specifică a precipitatului nu este constantă în timpul filtrării și nici legea de variație a acesteia. Astfel, în prima perioadă, creșterea rezistenței este mai accentuată ($n \approx 0,5$), procesul poate fi încadrat în filtrarea cu infundarea porilor precipitatului care se formează.

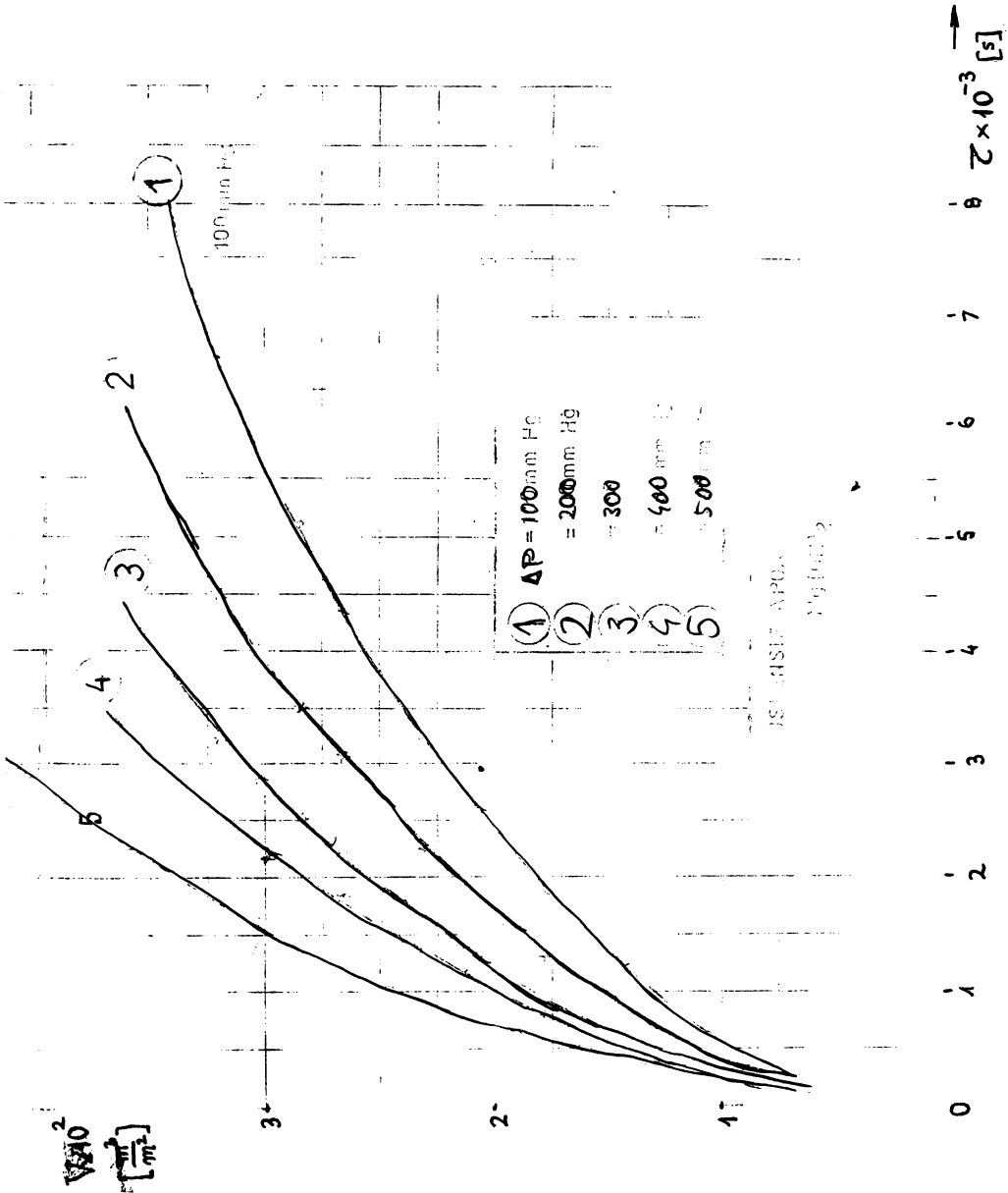


Fig. 2.10

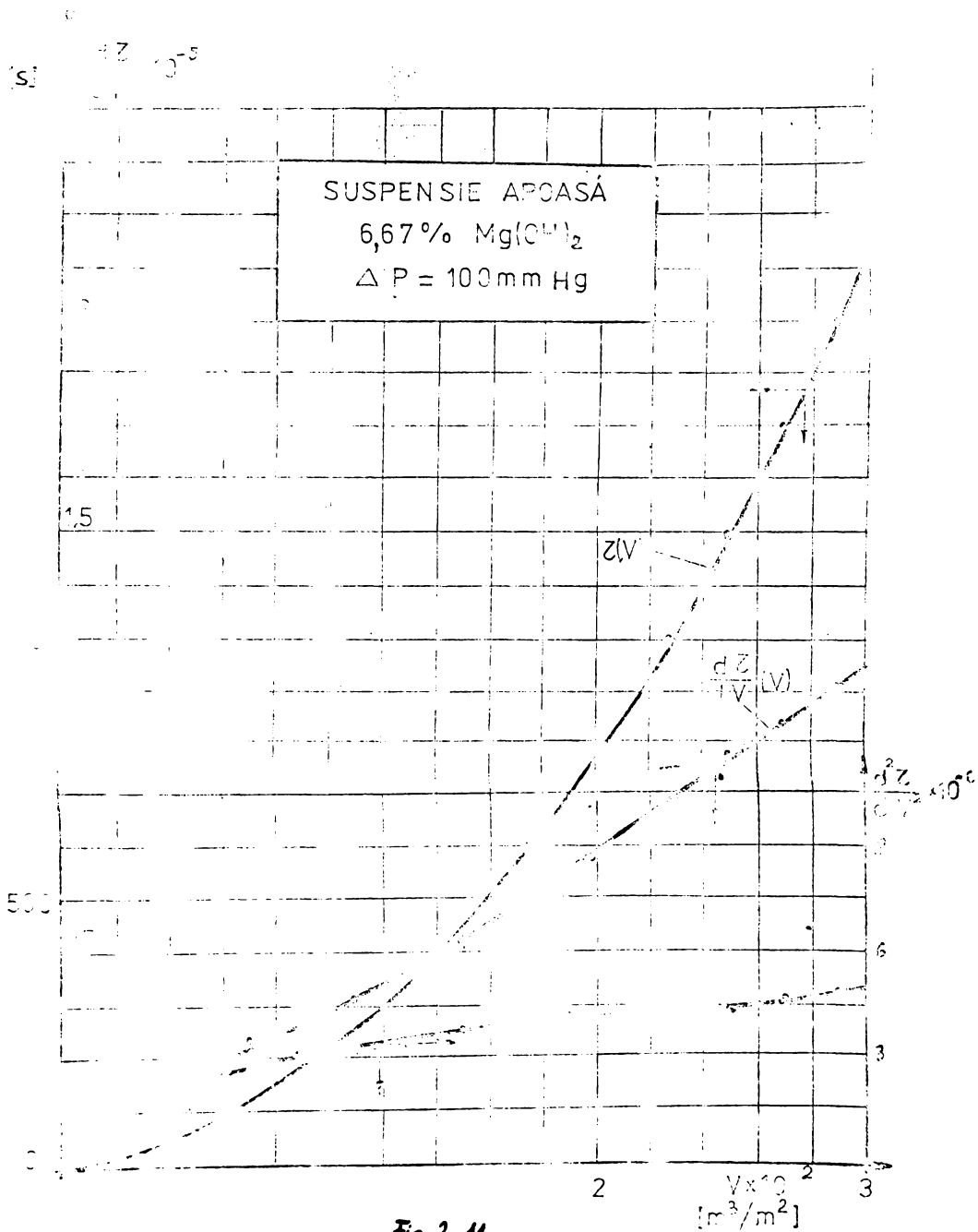


Fig. 2. 11

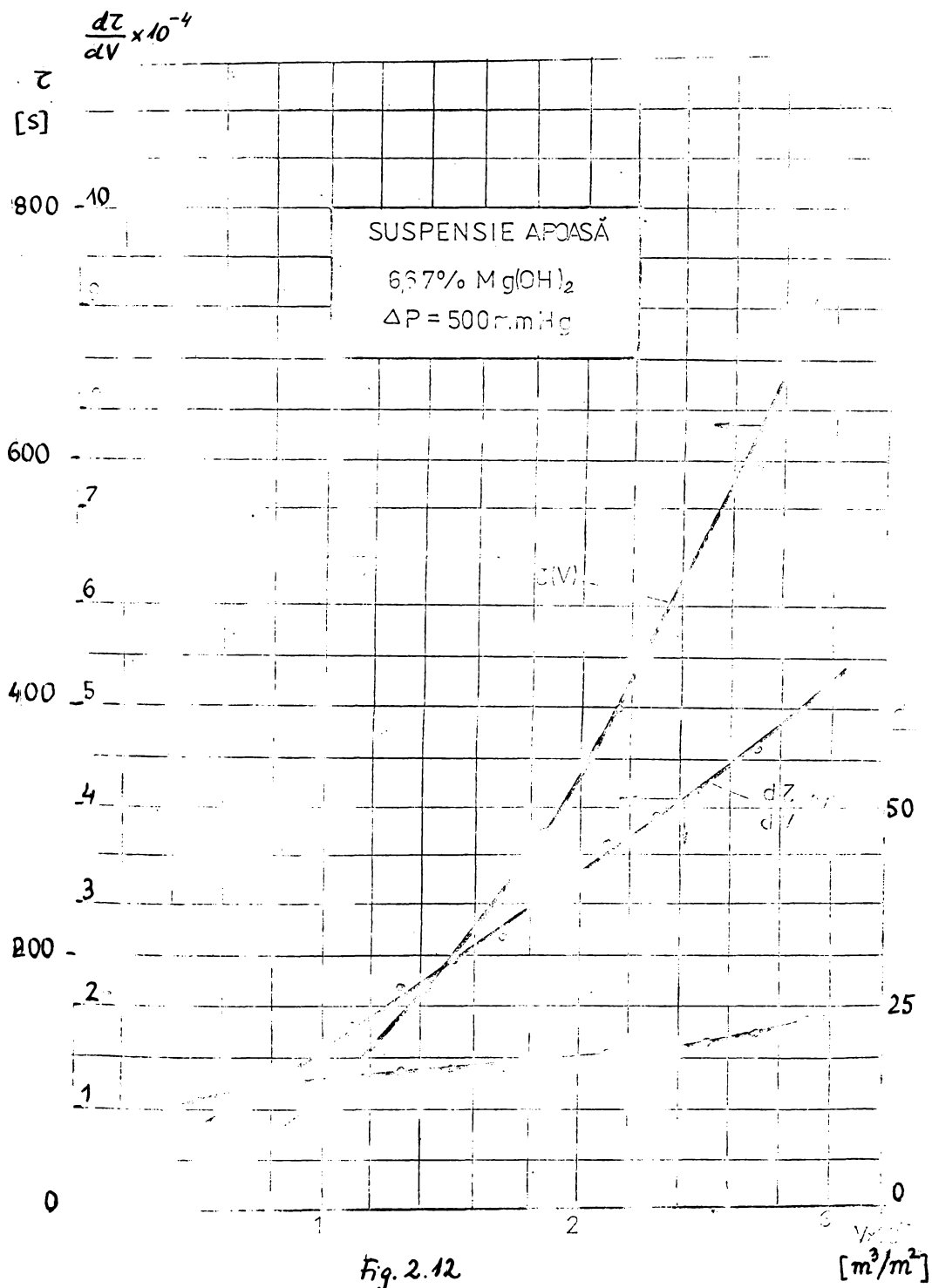


Fig. 2.12

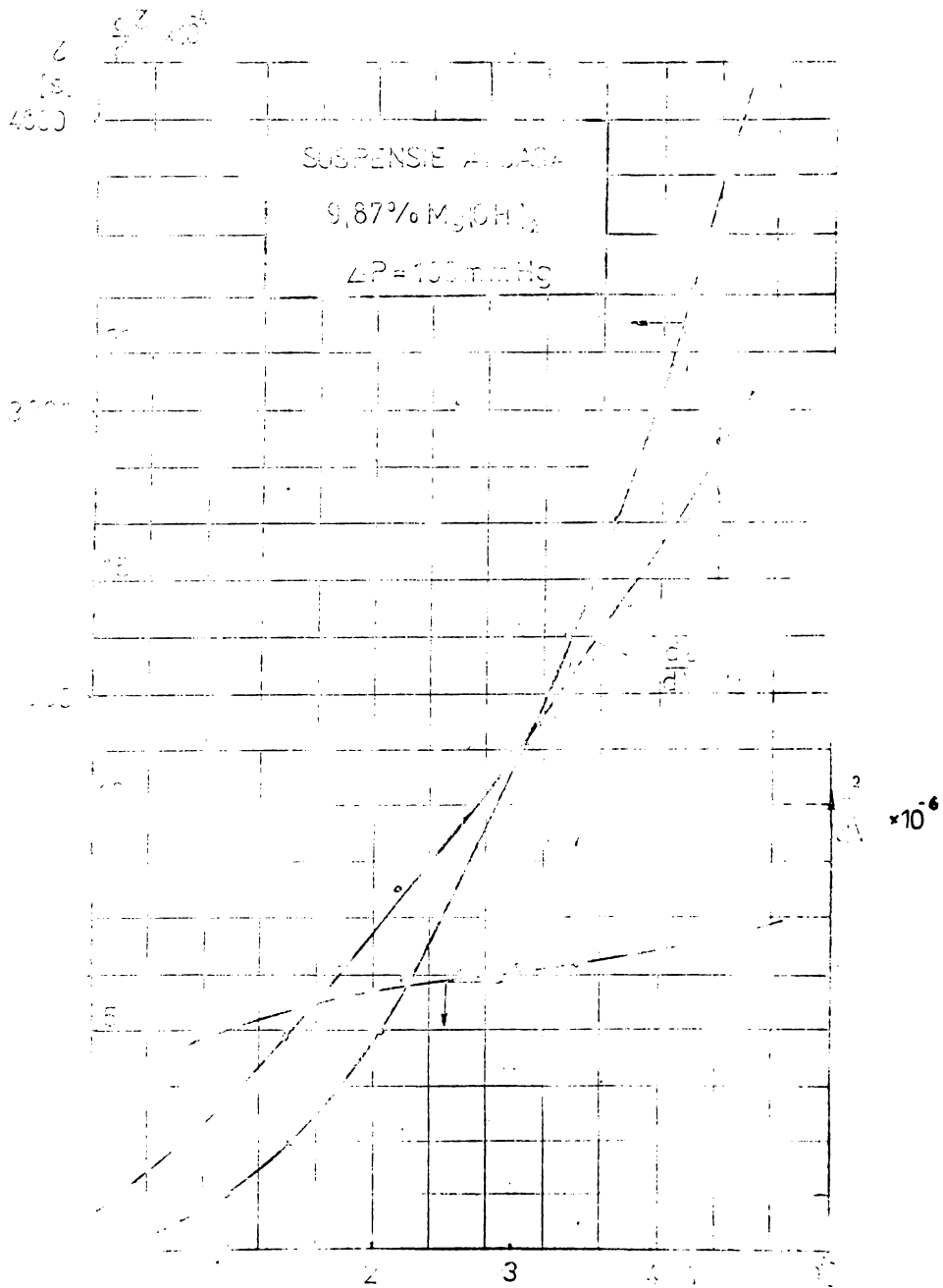


Fig. 2.13

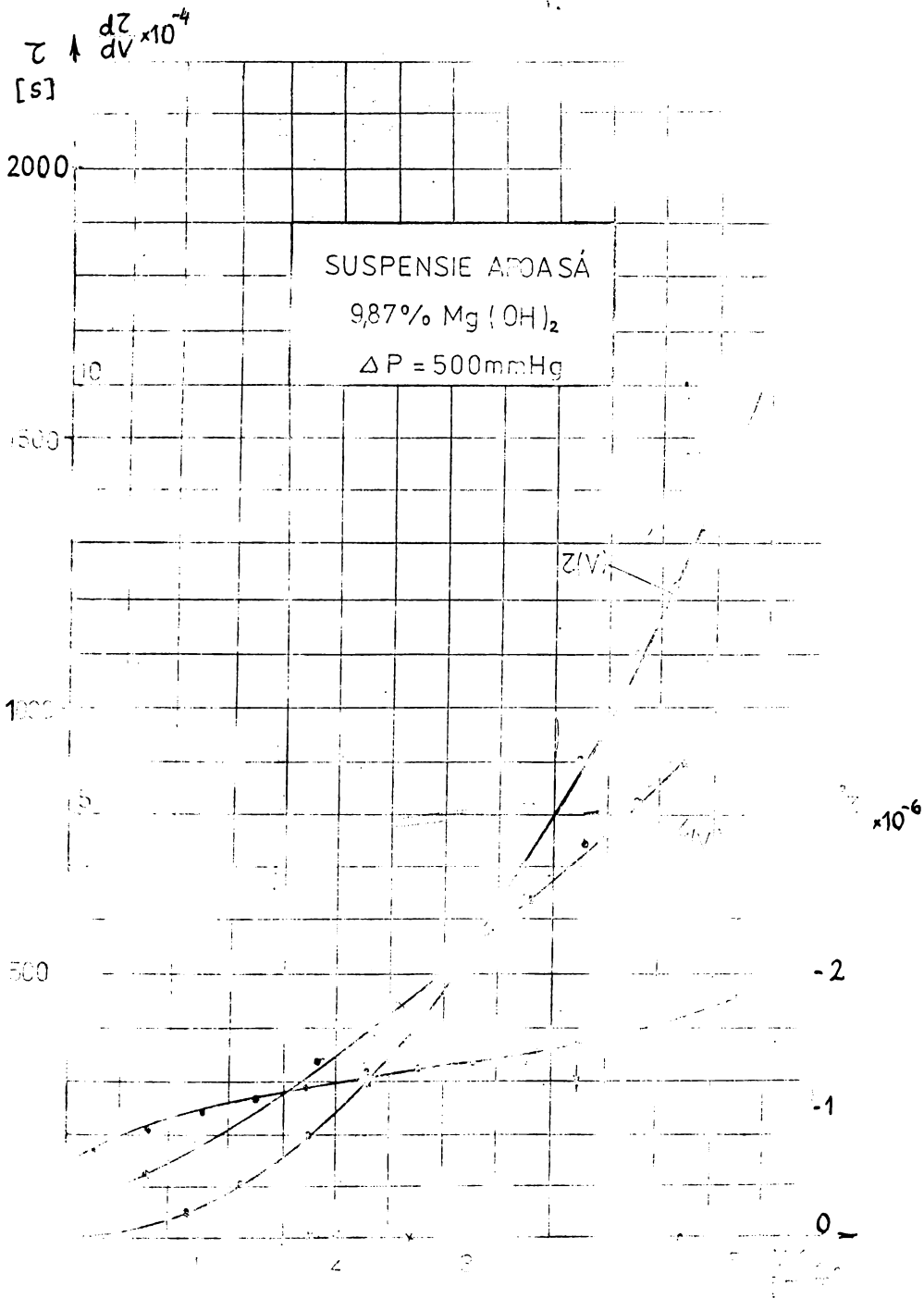


Fig. 2.14



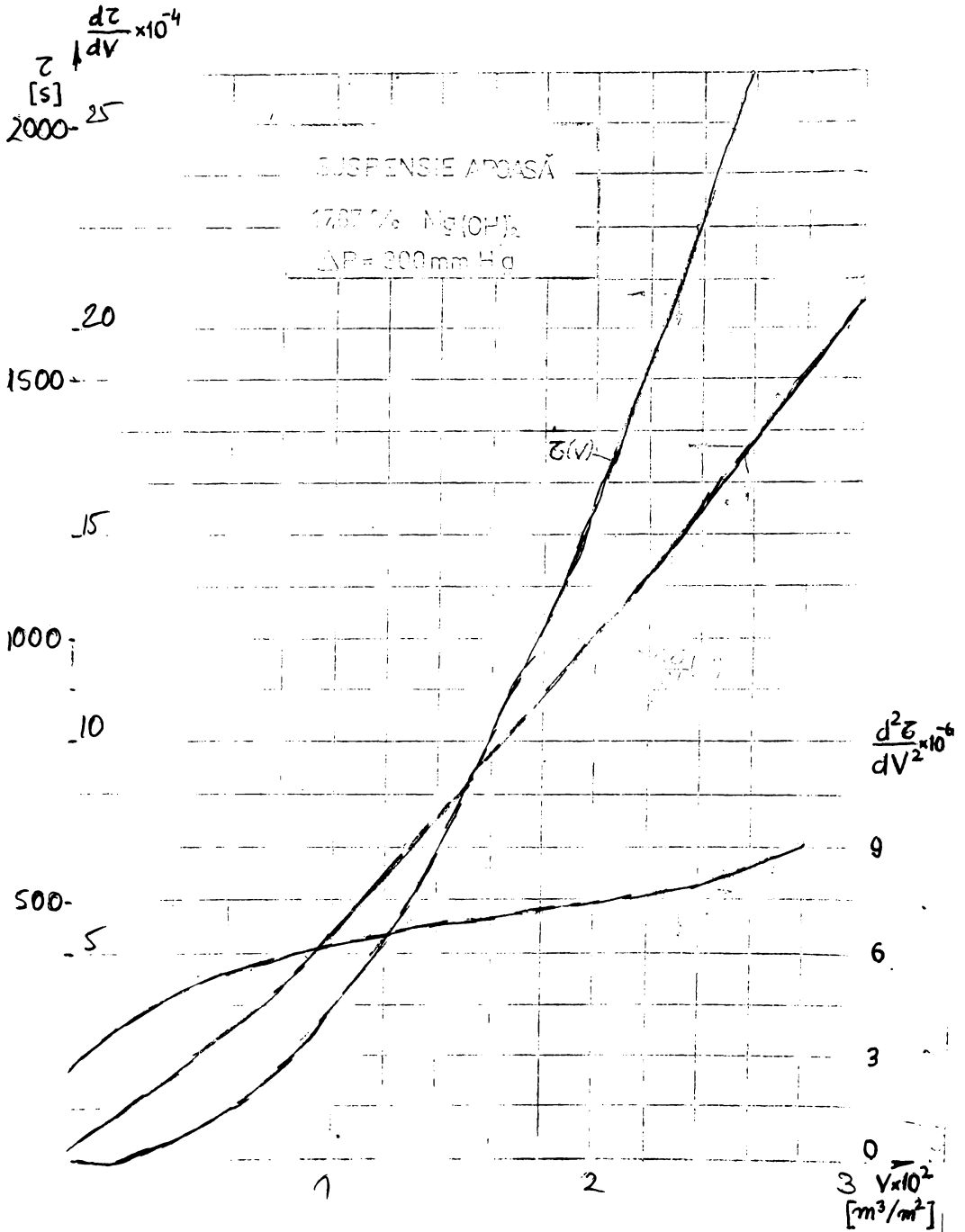


Fig. 2.15

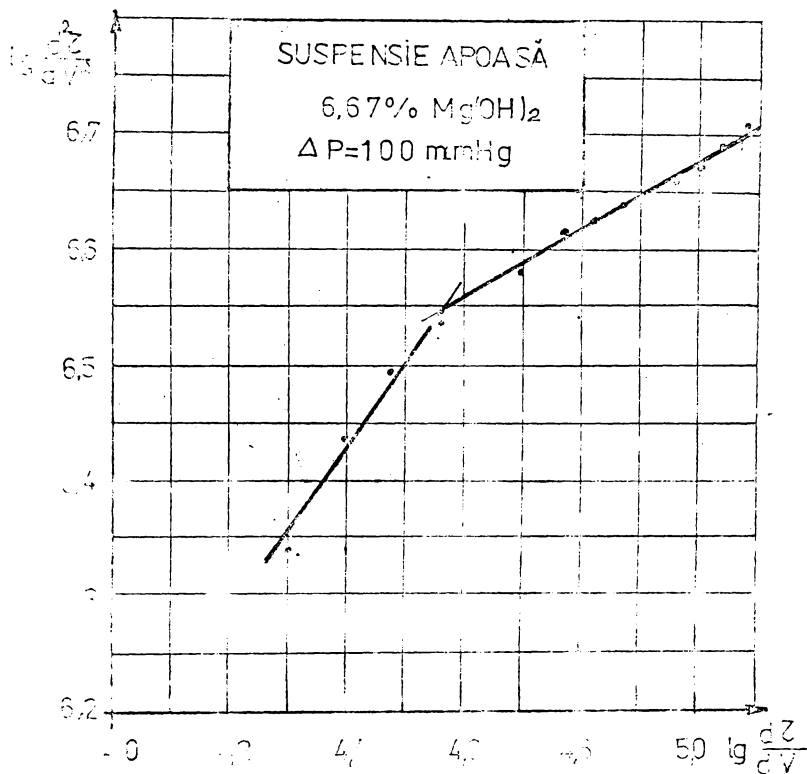


Fig. 2.16

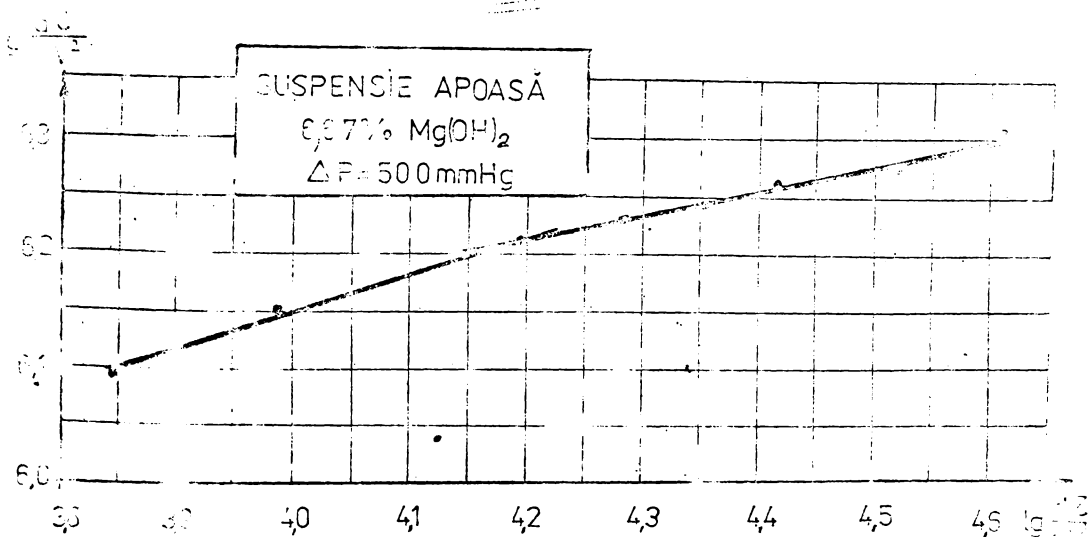


Fig. 2.17

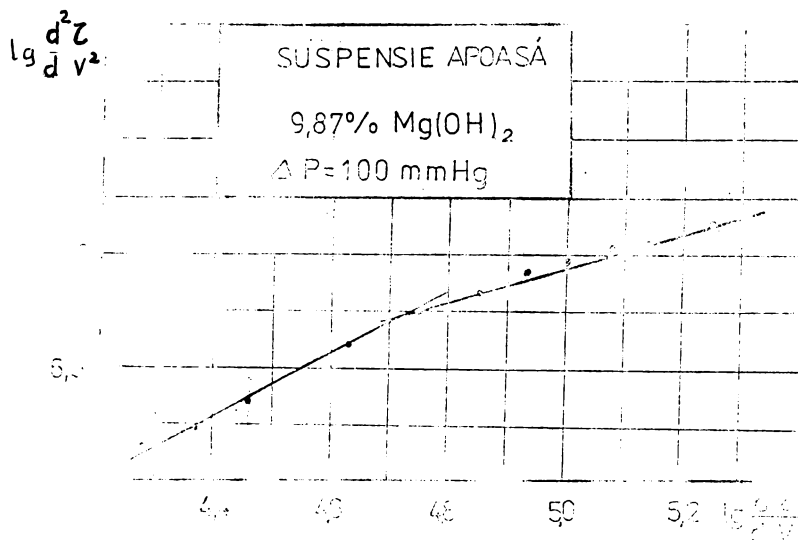


Fig. 2.18

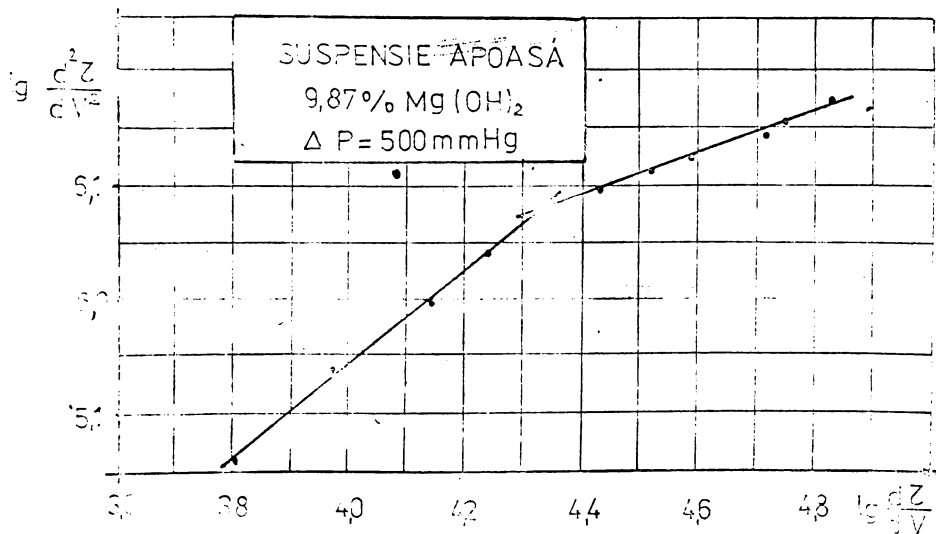


Fig. 2.19

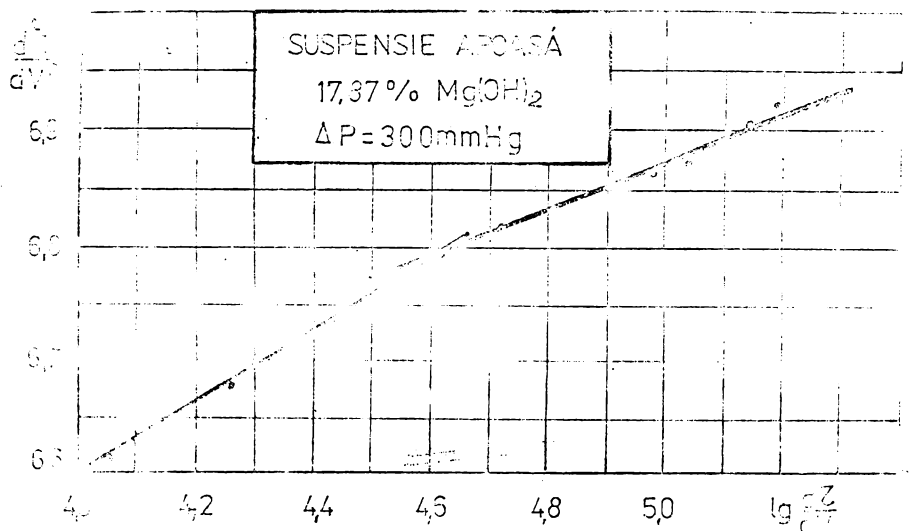


Fig.2.20

2.5. In perioada a doua, se constată că, indiferent de presiune și concentrație, valoarea exponentului "n" este $\approx 0,2$. Modificarea tipului procesului de filtrare este marcată prin $V_{\text{transiție}}$: valoarea care se identifică corespunzător abscisei punctului de intersecție al celor două drepte.

Filtrarea suspensiilor de hidroxid de magneziu este un proces de filtrare cu formarea unui precipitat a cărui rezistență specifică crește odată cu mărirea volumului de filtrat, proces ce poate fi redat și prin relația (2.182).

Valorile parametrilor α , M_2 și N s-au determinat prin metoda grafo-analitică prezentată la 2.3.5.D, care implică trasarea grafică a dependențelor $\frac{z}{v}$ (V), $\frac{z}{v^2}$ (V) și aflarea coordonatelor punctelor caracteristice, punctul T de tangență și minimumul funcției $\frac{z}{v^2}$ (V), fig.2.21 - 2.23.

Prin prelucrarea datelor experimentale s-au obținut rezultatele prezentate sub formă tabelară.

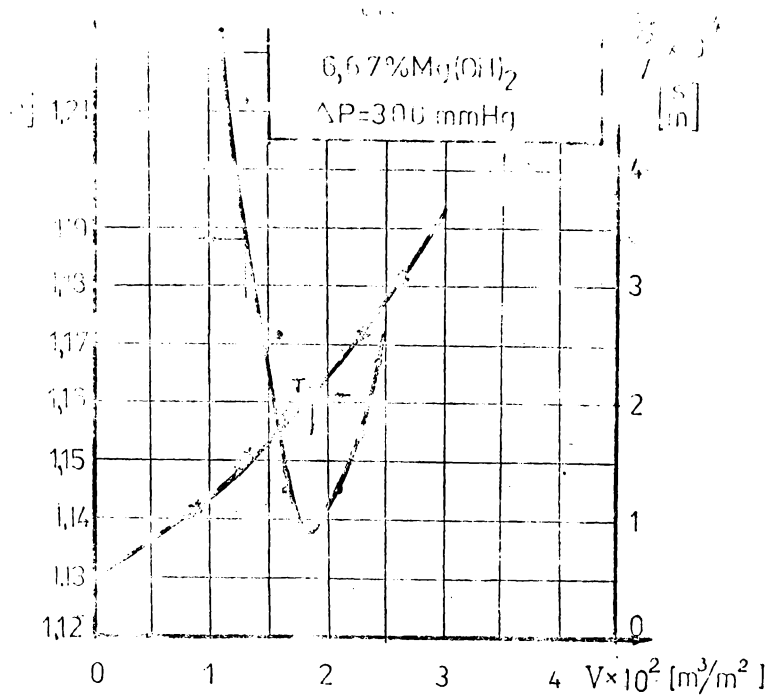


Fig. 2.21

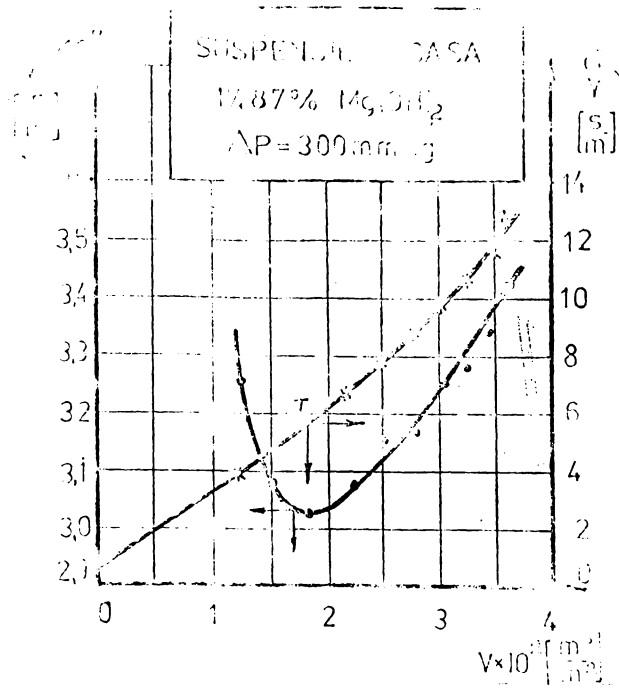


Fig. 2.22

Concentrația $x = 6,67 \%$

ΔP mmHg	V_T [$\frac{m^3}{m^2}$]	$N \times 10^{-4}$	$(\frac{Z}{V})_T \times 10^{-4}$ [s/m]	a	$M_1 \times 10^{-6}$	$r_m \times 10^{-11}$ [m^{-2}]
100	0,0292	0,5	5,45	0,101	2,42	0,665
200	0,0315	0,5	3,8	0,152	1,77	1,33
300	0,0185	0,5	2,05	0,323	3,03	1,645
400	0,0325	0,5	3,02	0,198	1,53	2,66
500	0,026	0,5	2,2	0,29	1,91	3,325

Concentrația $x = 9,87 \%$

100	0,0225	0,5	4,3	0,132	2,78	0,665
200	0,035	0,5	3,9	0,147	1,59	1,33
300	0,0355	0,55	3,1	0,215	1,47	1,99
400	0,0415	0,5	3,25	0,182	1,18	2,66
500	0,030	0,5	1,75	0,400	1,69	3,325

Concentrația $x = 17,87 \%$

200	0,016	0,5	6,6	0,0819	5,354	1,33
300	0,018	0,5	5,6	0,098	4,202	1,99
400	0,032	0,5	7,95	0,067	2,963	2,66
500	0,024	0,5	4,3	0,132	2,55	3,325

Valorile lui "a" sînt în general mici (0,1-0,2), ceea ce indică o abatere mică de la filtrarea cu rezistență specifică constantă a precipitatului, $a=0$. Se remarcă că aceste valori s-au obținut, neglijînd datele din perioada de început a procesului, deci corespund procesului dat de ecuația generalizată cu $n \leq 0,2$.

În concluzie metodele prezentate permit determinarea valorilor parametrilor "n" și "k", respectiv "a", " k_1 ", "N" și stabilirea ecuației procesului de filtrare. Valorile obținute prin metodele descrise sînt utile pentru calcule tehnico-economice, precizia lor fiind corespunzătoare.

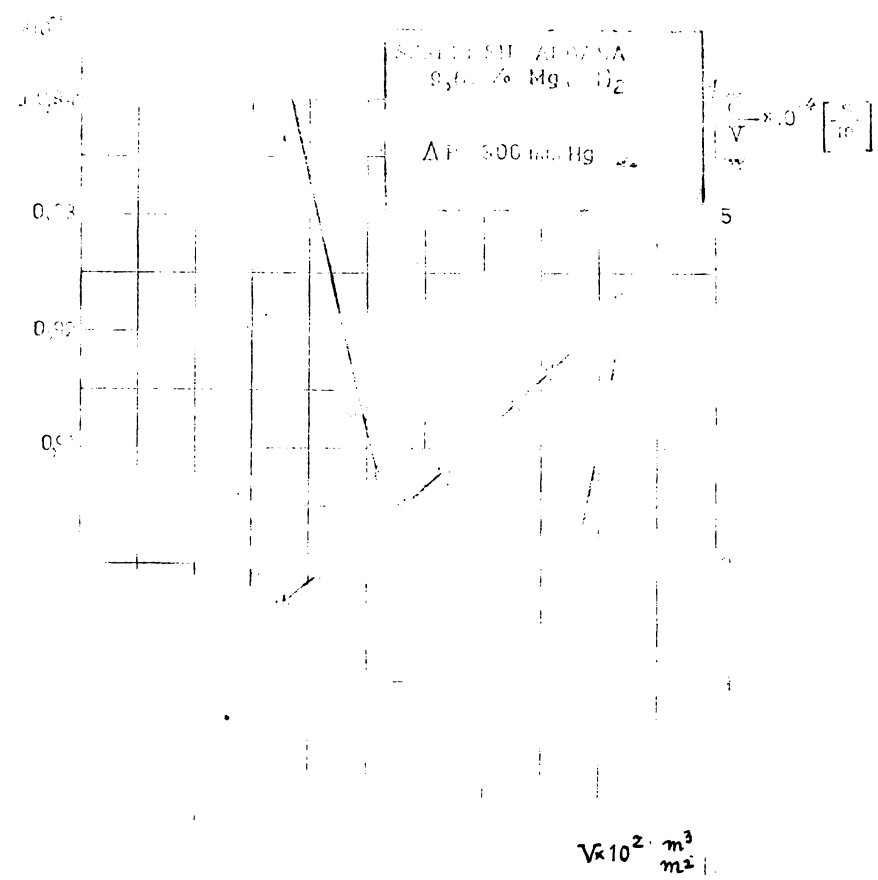


Fig. 2.23

2.3.7. Verificări experimentale privind filtrabilitatea suspensiilor solid-lichid.

La filtrarea aceleiași suspensii pe mai multe utilaje se obțin rezultate diferite, în ceea ce privește viteza de filtrare și cantitatea de precipitat depus, în funcție de tipul filtrului utilizat.

În prezent, determinarea suprafețelor de filtrare necesare pentru separarea unei suspensii se bazează pe date de funcționare obținute prin încercări pe utilaje la scară de laborator. Datele astfel obținute sînt în general specifice tipului de filtru experimentat, astfel încît aceste teste de filtrare sînt

necesare pentru fiecare tip de utilaj luat în considerare la separarea suspensiei respective.

Preocupările cercetătorilor pentru o analiză și alegere rațională, pe baza teoriei filtrării, a utilajelor pentru separarea unei suspensii, au condus la propunerile pentru unificarea testelor de filtrare în cazul procesului de filtrare cu formare de precipitat. Astfel, s-a propus pentru caracterizarea filtrabilității unei suspensii, timpul standard de formare a precipitatului (SCFT- Standard Cake Formation Time) cu o grosime de 1 cm, la o diferență de presiune de 1 at, sau, după alți autori 500 mm Hg [56]. În practică însă, este uneori greu de obținut precipitate cu o anumită grosime, fie din cauza vitezei mici de filtrare, fie pentru că în suspensia inițială conținutul fazei solide este redus. Din această cauză, pentru evaluarea proprietăților filtrante ale suspensiilor s-a propus o metodă unificată de conducere a experiențelor [42], în care drept criteriu se consideră viteza medie de filtrare a volumului specific egal cu $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

În cadrul acestui paragraf, prin verificări experimentale pe o instalație de laborator realizată în acest scop, folosind o capsulă orizontală cu două membrane filtrante, imersată în suspensia solid-lichid, s-a studiat influența agitării asupra filtrării suspensiei prin cele două membrane.

A. Prezentarea instalației de laborator.

În fig.2.24 a,b se prezintă soluția constructivă a unei capsule cilindrice cu două membrane filtrante, inferioară (2) și superioară (8) sprijinite pe grătarele metalice (1) și (7) cu diametrul 70 mm. Membranele filtrante și grătarele de susține-

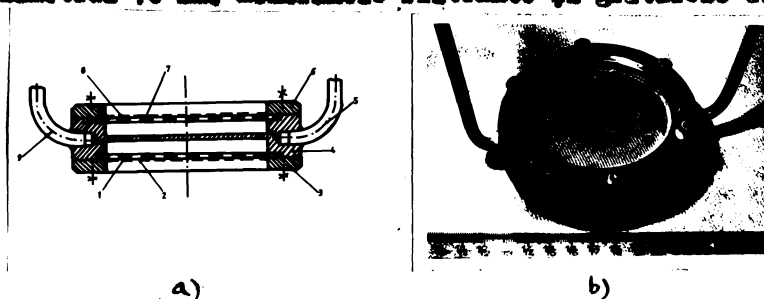


Fig.2.24.

re se fixează pe corpul capsulei (4) prin intermediul inelelor

metalice (3) și (6) strinse cu șuruburi. Spațiile din spatele membranelor sînt puse în legătură, prin intermediul racordurilor (5) și (9) cu vasele de colectare a filtratului legate la vid.

În fig. 2.25 a,b se prezintă capsula (3), anterior deoseșișă, introdusă în vasul (2) care conține suspensia solid-lichid. Capsula filtrantă, avînd înălțimea 26 mm, este operată în poziție orizontală și încadată simetric între două grătare metalice (4), aflate la distanța 150 mm, fixate mecanic de un sistem bielă-manivelă (1) prin intermediul căruia se asigură mișcarea pe verticală de-a lungul unei curse de 15 mm, cu o anumită frecvență.

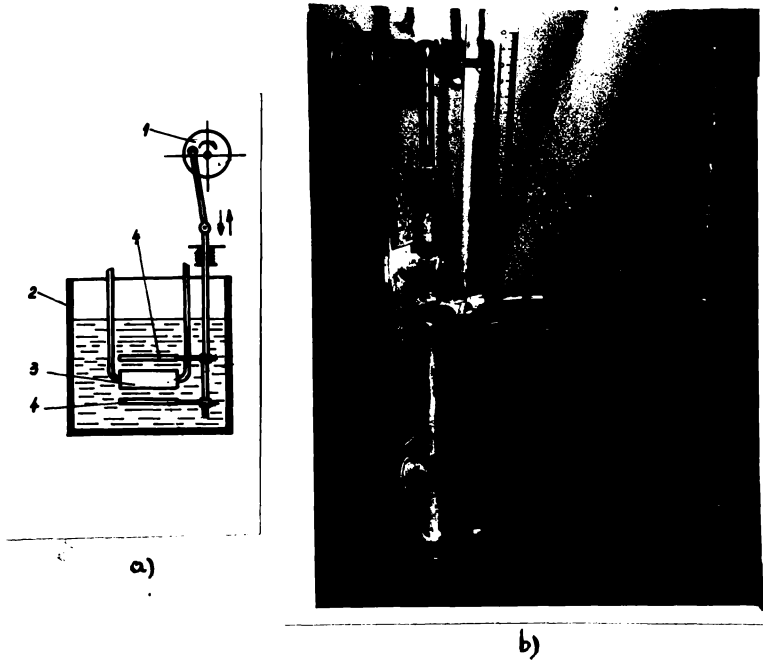


Fig. 2.25

B. Determinări experimentale pe instalația de laborator.

Folosind instalația prezentată în fig. 2.25 s-au filtrat diferite suspensii apoase. Experimentările, efectuate la diferență constantă de presiune, $\Delta P = 380 \text{ mmHg}$, au constatat în filtrarea suspensiilor în absența agitării, respectiv la diferite frecvențe ale grătarelor oscilante, obținîndu-se datele necesare tranziției curbelor cineticii procesului de filtrare, $V(\tau)$, pe cele două membrane ale capsulei filtrante.

S-au filtrat astfel diferite suspensii apoase: caolin spălat de Harghita (fig.2.26 - 2.37), hidroxid de aluminiu (fig.2.38, 2.39), talc (fig.2.40), carbonat de calciu obținut prin reacția de carbonatare a laptelui de var (fig.2.41) și două suspensii de carbonat de calciu din tehnologia de purificare a soluțiilor de zahăr obținute prin extracție (fig.2.45, 2.46).

În fig.2.26 a se prezintă comparativ curbele de filtrare a suspensiilor apoase de caolin de Harghita, cu diferite concentrații în fază solidă (10; 4; 2; 0,5 %), în absența agitării, iar în fig.2.26 b se prezintă variația diferenței dintre volumele filtrate în același timp, la mai multe momente, prin cele două membrane în funcție de concentrația suspensiei; curbele s-au obținut folosind datele din fig.2.26 a. Din aceste curbe rezultă concluzia că pentru o concentrație de cea 11 %, desfășurarea procesului de filtrare prin cele două membrane este identică, cît și faptul că odată cu creșterea concentrației suspensiei scade rolul agitării în egalizarea filtrării prin cele două fețe ale capsulei. S-au efectuat determinări utilizînd și un agitator rotativ cu două elice (fig.2.29). În fig.2.27 sînt redată curbele corespunzătoare filtrării, în absența agitării, a suspensiilor conținînd 4 % fază solidă și anume caolin, caolin cu adăus de 5 %, respectiv 10 % bentonită. Curbele din fig. 2.28- 2.33 reprezintă cinetica procesului de filtrare a suspensiilor apoase de caolin, cu sau fără adăus de bentonită, la diferite frecvențe ale grătarelor oscilante. Pentru a evidenția influența presiunii s-a filtrat suspensia apoasă cu 2 % caolin la mai multe diferențe de presiune și anume: 260, 380, 500 mm Hg cu și fără agitare, fig.2.30. Din curbele $V(\tau)$ s-au obținut curbele reprezentînd variația în timp a vitezei instantanee de filtrare, $w(\tau)$, fig.2.34 - 2.36. În aceste figuri săgețile indică sensul de circulație a filtratului prin membrana filtrantă. Din analiza curbelor de filtrare, atât $V(\tau)$, cît și $w(\tau)$, se constată că filtrarea decurge mai repede prin membrana inferioară și că odată cu creșterea frecvenței de agitare a suspensiei cu ajutorul grătarelor oscilante, vitezele proceselor de filtrare prin membrana superioară și inferioară a capsulei tind să se egaleze, ca urmare a împiedecării sedimentării particulelor solide. Prin construcțiile grafice $V(f)$ la $\tau = \text{const.}$ în care se reprezintă volumul specific de filtrat colectat după un

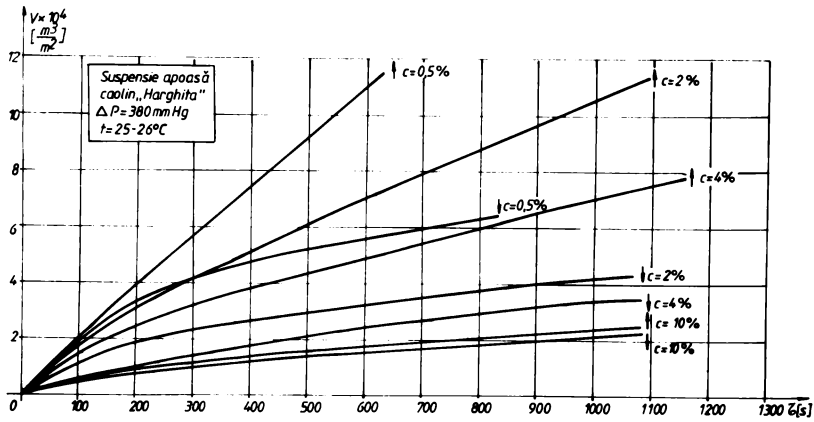


Fig. 2.26 a

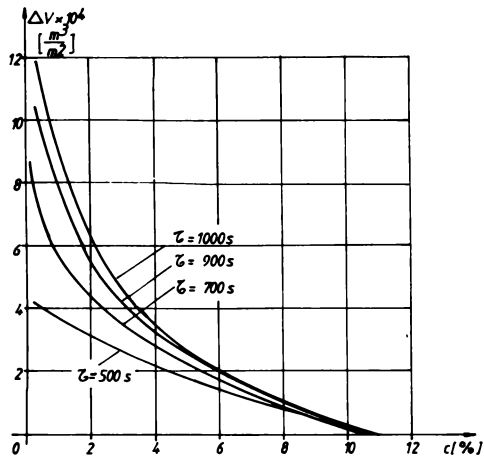


Fig. 2.26 b

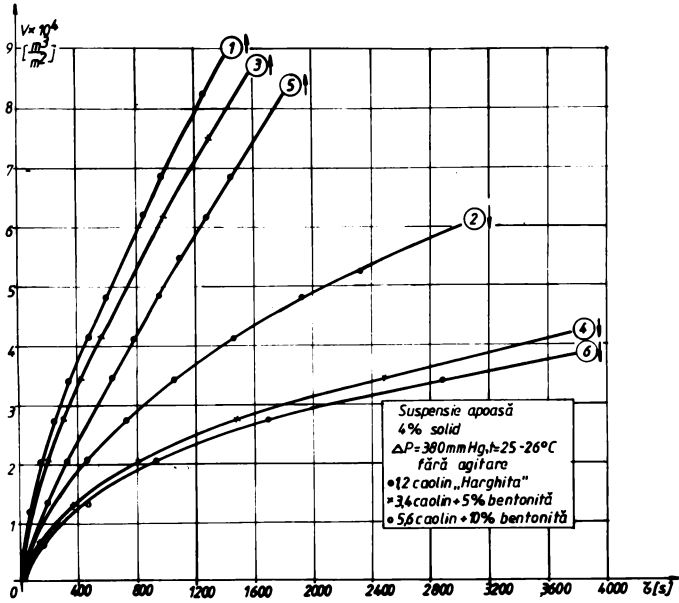


Fig. 2.27

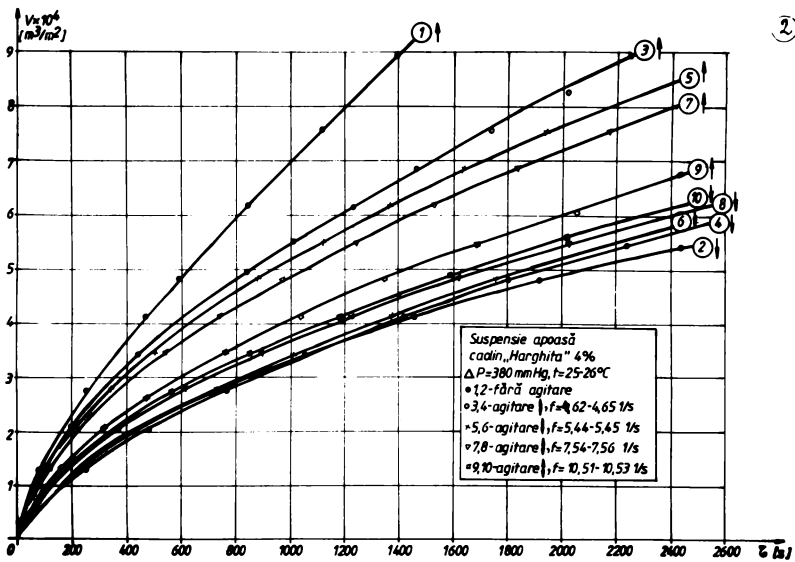


Fig. 2.28

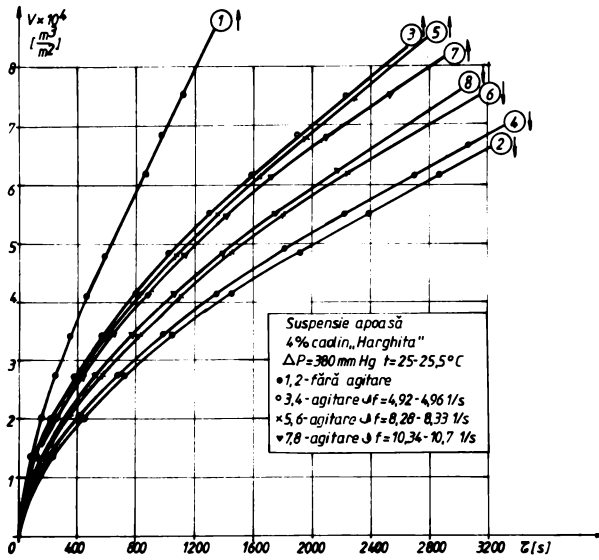


Fig. 2.29

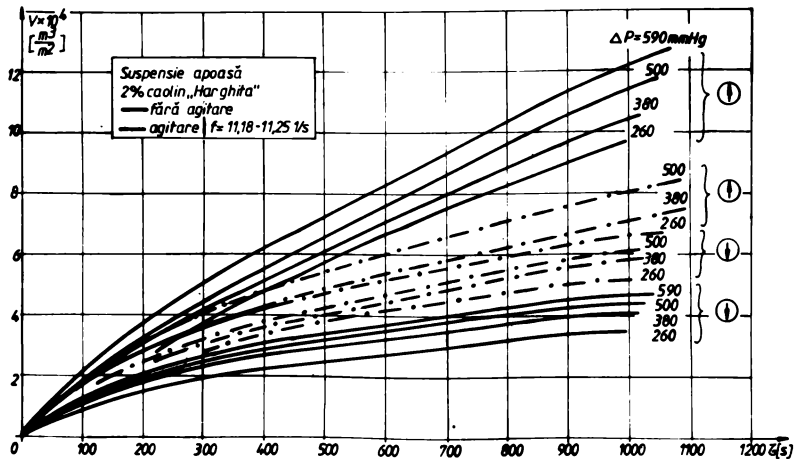


Fig. 2.30

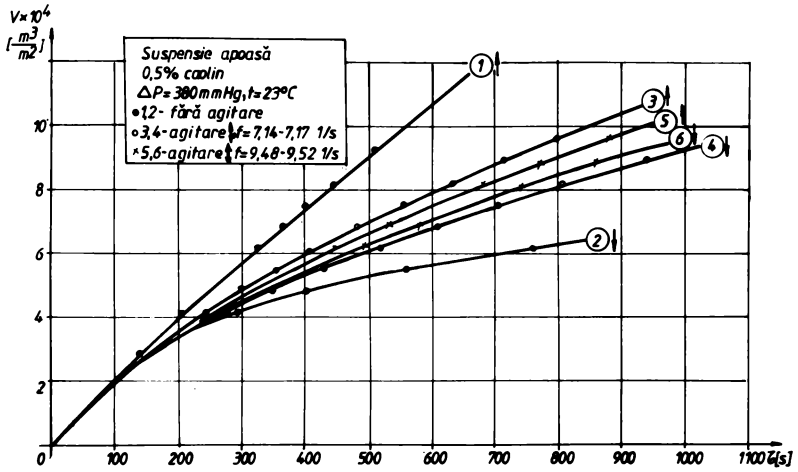


Fig. 2.31

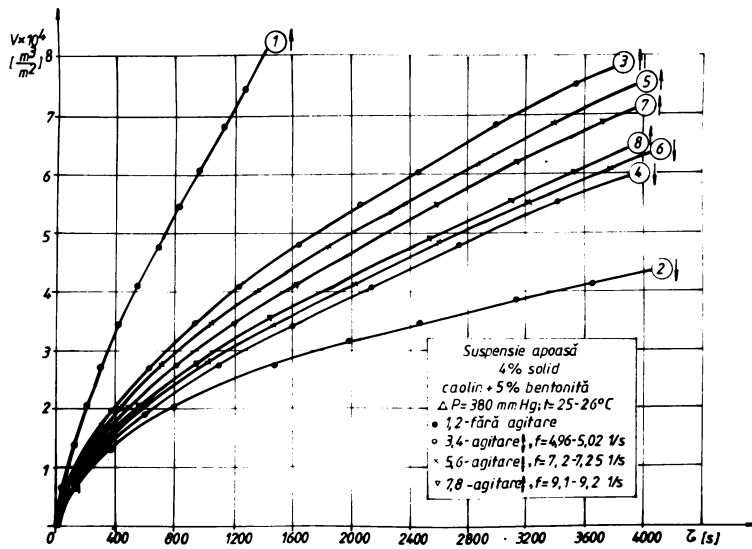


Fig. 2.32

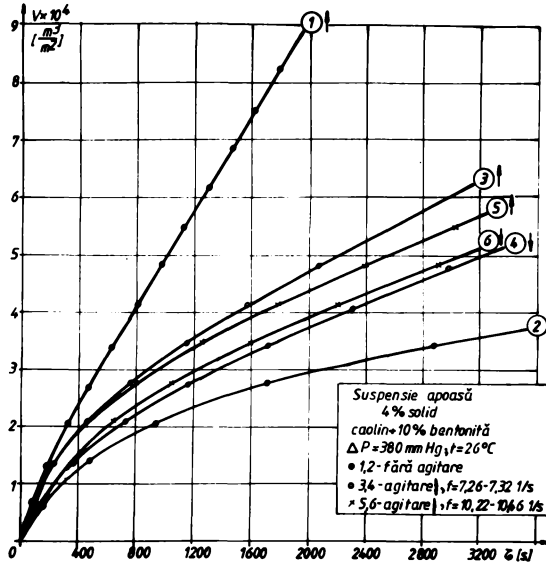


Fig. 2.33

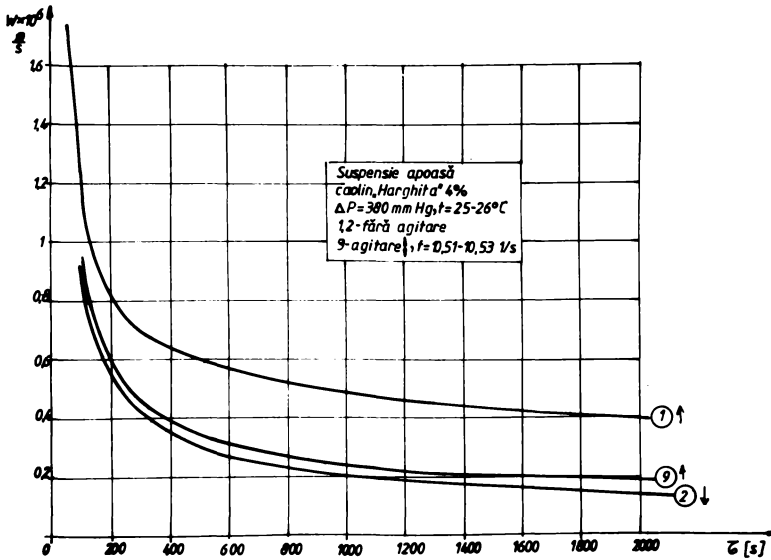


Fig. 2.34

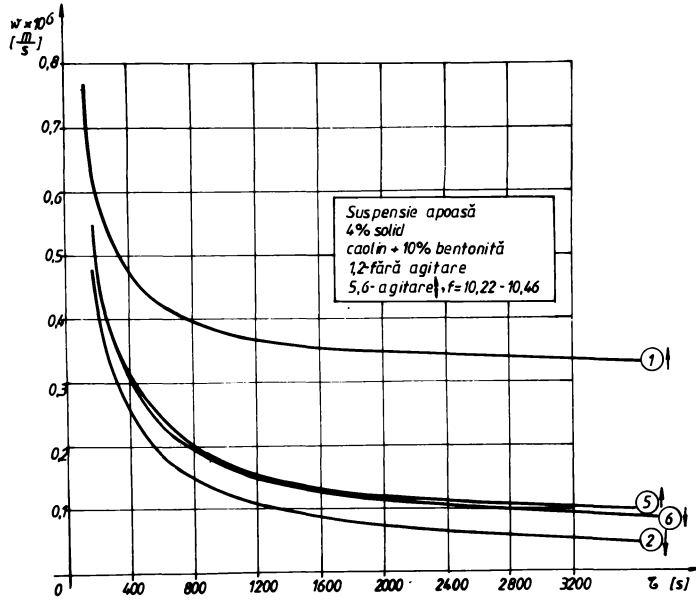


Fig. 2.35

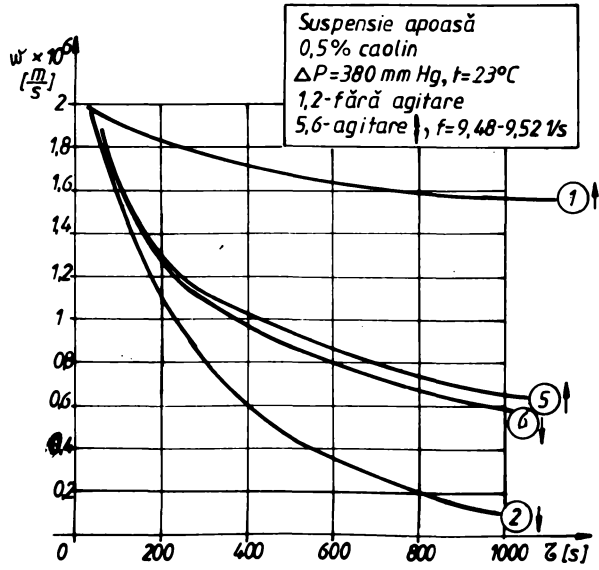


Fig. 2.36

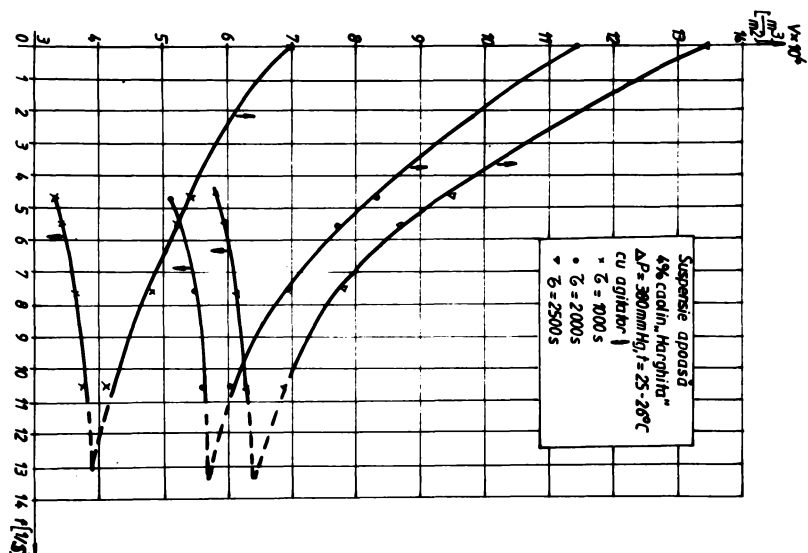


Fig. 2.37

anucit interval de timp, în funcție de frecvența grătarelor oscilante, redată în fig.2.37, se determină, prin extrapolare, frecvența de agitare la care filtrarea ar decurge identic pe cele două fețe ale capsulei filtrante.

Filtrarea suspensiei apoase 1,3 % de hidroxid de aluminiu (fig.2.38), preparată după metoda prezentată în [40] s-a efectuat în absența agitării, $f = 0$, (curbele 1,2), la frecvența 3,33 - 3,41 1/s (curbele 3,4) și la frecvența 4,98-5,03 1/s (curbele 5,6). Se constată că în absența agitării filtrarea decurge cu viteză mai mare prin membrana inferioară, în timp ce la frecvența $f = 3,33 - 3,41$ 1/s curbele de filtrare prin cele două membrane se suprapun, iar la frecvența $f = 4,98 - 5,03$ 1/s curbele respective de filtrare sînt diferite și și-au schimbat poziția relativă față de cazul cînd $f = 0$. În fig.2.39 se prezintă curbele $w(\tau)$, obținute din curbele $V(\tau)$; curbele 7, 8, 9, 10, 11, 12 corespund curbelor 1, 2, 3, 4, 5, 6, din fig.2.38.

În cazul filtrării suspensiilor cu 4 % talc, respectiv 4 % carbonat de calciu, redată prin curbele 2.40 și 2.41, filtrarea are loc cu viteză mai mare pe fața inferioară a capsulei iar mărirea frecvenței de oscilare a grătarelor are ca efect,

și în acest caz, apropierea curbilor de filtrare pe cele două fețe. S-a determinat, prin extrapolare din curbele $V(f)$, la $\tau = \text{const.}$ frecvența la care filtrarea decurge identic prin cele două membrane (fig.2.42).

S-au efectuat determinări de filtrare și a altor suspensii cu aceeași concentrație de fază solidă, având densitate diferită și anume: silicat de zirconiu, grafit, bioxid de mangan și PVC. Rezultatele se prezintă în fig.2-43. Aceste suspensii se caracterizează prin viteze mari de filtrare, chiar în absența agitării.

C. Stabilirea ecuației curbelor de filtrare.

Calculule de proiectare a filtrelor pentru separarea suspensiilor solid-lichid se bazează adesea pe ecuațiile caracteristice procesului de filtrare cu formarea unui precipitat necomprimibil, ecuații de forma relațiilor 2.48, 2.52, 2.63 și 2.73; prin reprezentarea grafică a dependenței $1/w$ (V) se pot obține [54] din pantă drepte, valoarea constantei K , iar din ordonate la origine valoarea constantei C din relația 2.63.

Relația 2.63 este cuprinsă în ecuația generală a filtrării (2-18), pentru $n=0$. Identitatea celor două expresii, precum și corespondența dintre mărimile care intervin în aceste relații rezultă din următoarele:

Expresia vitezei de filtrare se poate scrie, ținând cont de relația (2.63), sub formă

$$w = \frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V+C)} \quad (2.190)$$

deciarece
$$V = -C + \sqrt{C^2 + K\tau} \quad (2.191)$$

rezultă
$$w = \frac{K}{2\sqrt{C^2 + K\tau}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4C^2}{K^2} + \frac{4}{K} \cdot \tau}} \quad (2.192)$$

Din relațiile (2.37) sau (2.160), pentru $n = 0$, rezultă pentru viteza de filtrare expresia

$$w = \frac{w_0}{\sqrt{1 + \frac{2k\gamma}{\Delta P} \cdot w_0^2 \cdot \tau}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{w_0^2} + \frac{2k\gamma}{\Delta P} \cdot \tau}} \quad (2.193)$$

Relațiile (2.192) și (2.193) sînt similare; prin identificarea termenilor se obține

$$w_0 = \frac{k}{2c} \quad (2.194)$$

și

$$k = \frac{2\Delta P}{K_0 \eta} \quad (2.195)$$

În cazul suspensiilor apoase de caolin, caolin cu adăus de bentonită, hidroxid de aluminiu, filtrate în condițiile arătate se observă o abatere mare de la variația liniară după cum rezultă din fig. 2.44 în care se redau rezultatele obținute pentru suspensiile apoase de 4 % și 0,5 % caolin. Începând deci că aceste cazuri nu se încadrează în filtrarea cu formare de precipitat a cărui rezistență specifică rămâne constantă. Din reprezentările grafice $1/w$ (τ) redată în fig.2.44 pentru suspensiile menționate prin comparație cu fig.2.5 se poate spune că este vorba de mai multe tipuri de procese de filtrare și anume: cu formare de precipitat cu rezistență specifică crescândă ($0 < n < 1$), de tip intermediar ($n = 1$) și cu infundarea parțială sau totală a porilor membranei filtrante ($n = 1,5 - 2$). Pentru identificarea tipului procesului de filtrare și stabilirea ecuației corespunzătoare,

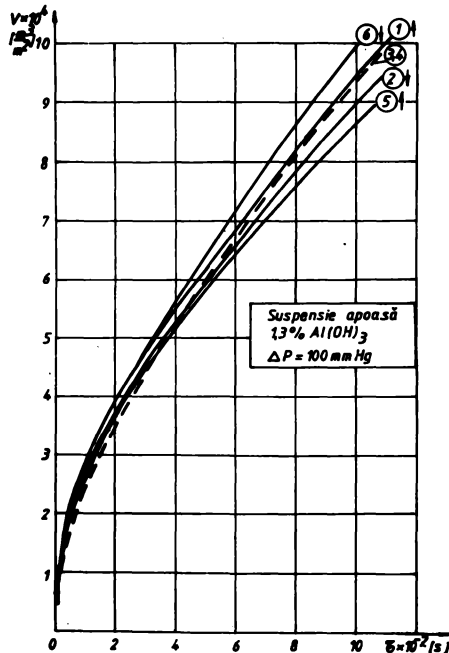


Fig. 2.38

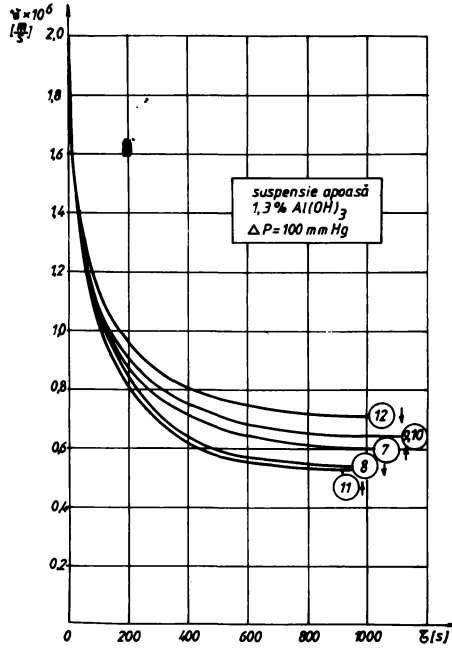


Fig. 2.39

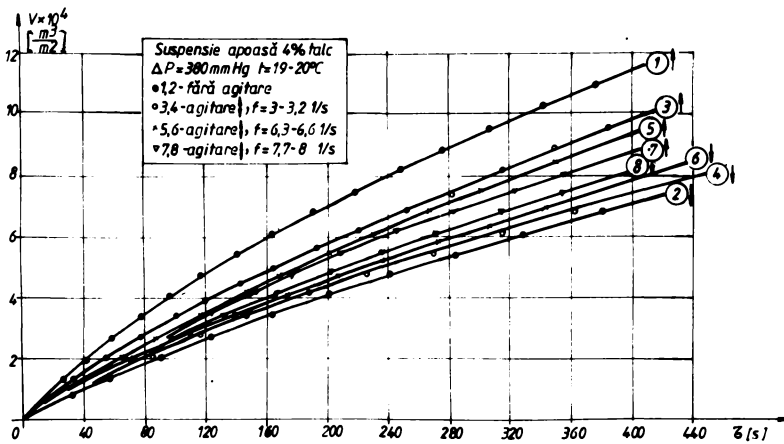


Fig. 2.40

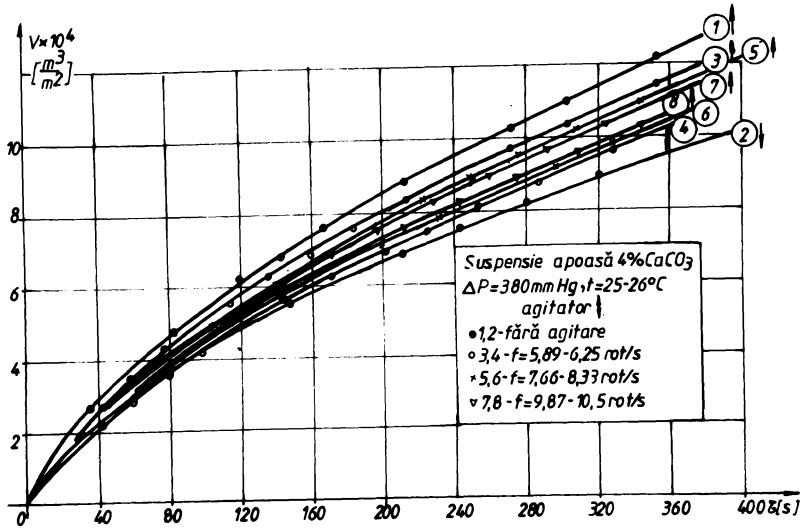


Fig. 2.41

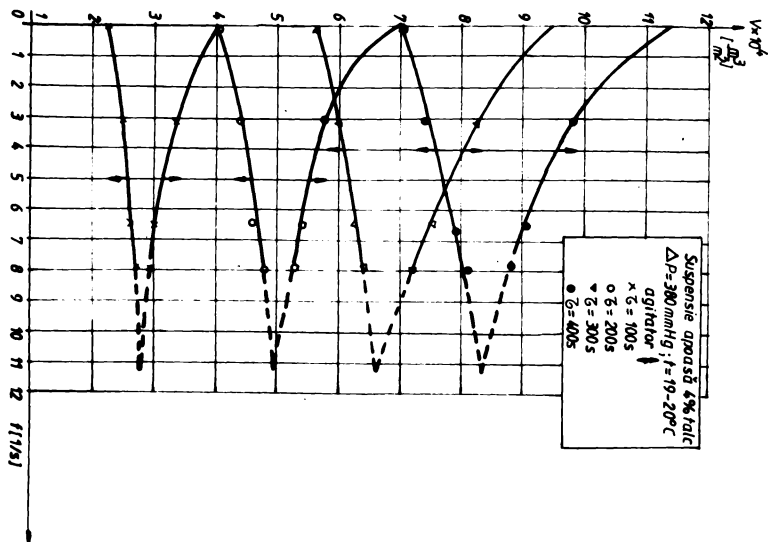


Fig. 2.42

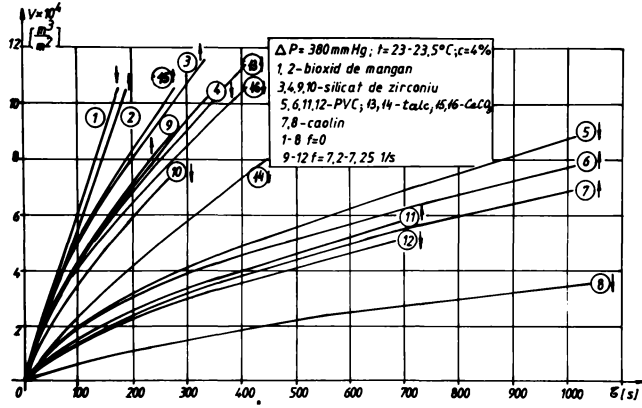


Fig. 2.43

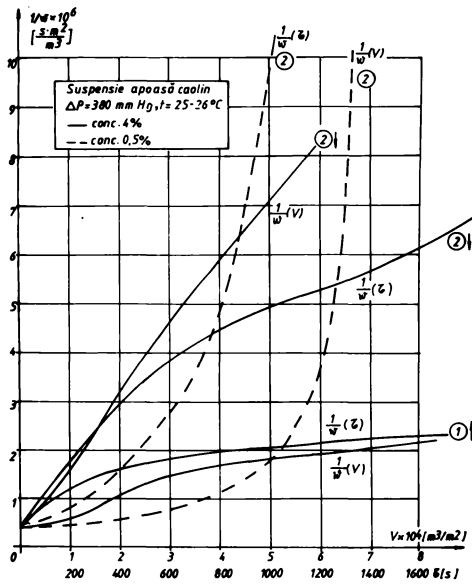


Fig. 2.44

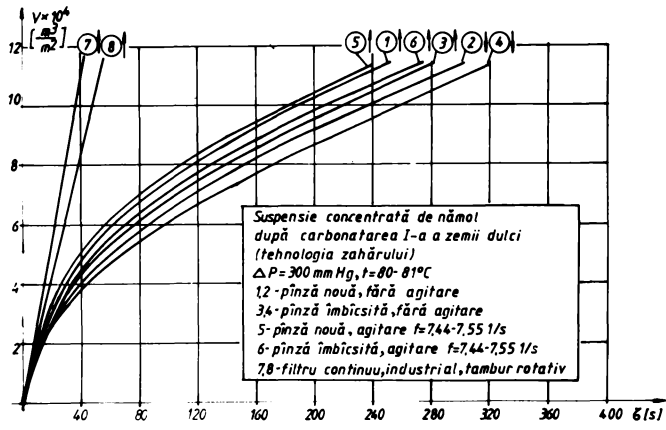


Fig. 2.45

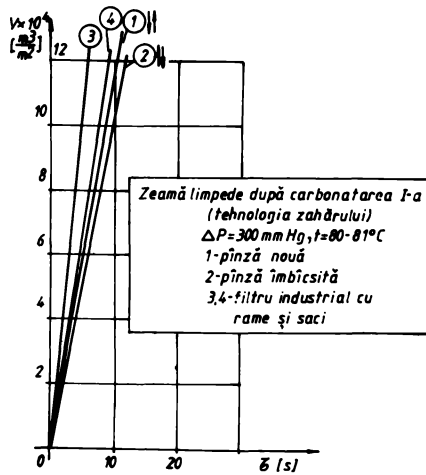


Fig. 2.46

s-a folosit metoda prezentată în paragraful 2.3.5 și s-au determinat coeficienții C_1 , C_2 , C_3 din ecuația 2-164 iar apoi exponentul "n" și parametrul "k" din ecuația generalizată a filtrării, relația 2.18. Se prezintă tabelul rezultatele mai semnificative, obținute în cazul suspensiilor apoase de caolin și hidroxid de aluminiu.

Suspensie apoasă cu 4 % caolin (fig.2.28; 2.34)

Curba (frecvența) [1/s]	Interval [s]	Parametrul				
		C_1	C_2	C_3	n	k
1↑ (f = 0)	200-400	$-1,64 \times 10^{-7}$	-1,54	-205	0,46	$6,24 \times 10^{11}$
	500-700	$-1,36 \times 10^{-9}$	-1,90	-402	0,10	$3,67 \times 10^{15}$
	800-1000	$-9,64 \times 10^{-15}$	-2,70	-102	-0,70	$5,88 \times 10^{26}$
	1800-2000	$-2,21 \times 10^{-17}$	-3,18	-3100	-1,18	$1,19 \times 10^{33}$
2↓ (f = 0)	200-400	$3,26 \times 10^{-6}$	-1,26	-40,8	0,74	$2,40 \times 10^7$
	500-700	$-5,57 \times 10^{-4}$	-0,95	-402	1,05	$7,87 \times 10^2$
	800-1000	$-5,75 \times 10^{-3}$	-0,84	-1601	1,16	$1,17 \times 10$
	1800-2000	$-1,59 \times 10^{-2}$	-0,76	-601	1,24	1,12
9↑ (10,5)	200-400	$-1,13 \times 10^{-6}$	-1,33	-2,63	0,67	$2,49 \times 10^8$
	500-700	$-1,87 \times 10^{-4}$	-1,05	-652	0,95	$1,22 \times 10^4$
	800-1000	$-3,17 \times 10^{-4}$	-1,02	-768	0,98	$4,35 \times 10^3$
	1800-2000	$-4,98 \times 10^{-4}$	-1	-601	1	$2,16 \times 10^3$

Suspensie apoasă cu 4 % solid: caolin + 10 % bentonită (fig.2.33; 2.35).

Curba (frecvența) [1/s]	Interval [s]	Parametrul				
		C_1	C_2	C_3	n	k
0	1	2	3	4	5	6
1↑ (f=0)	400-600	$-1,54 \cdot 10^{-6}$	-1,40	-752	0,60	$6,18 \times 10^8$
	1400-1600	$-1,66 \cdot 10^{-8}$	-1,78	-3500	0,22	$3,79 \times 10^{13}$
	3000-3200	$-7,71 \cdot 10^{-19}$	-3,37	-1900	-1,37	$3,31 \times 10^{36}$

0	1	2	3	4	5	6
2 ↓ (f=0)	400-600	$-3,31 \times 10^{-4}$	-0,94	-129	1,06	$1,14 \times 10^3$
	1400-1600	-0,66	-0,51	-1001	1,49	2,91
	3000-3200	-13,5	-0,35	-1900	1,65	$2,01 \times 10^{-6}$
5 ↑ (7,2- 7,25)	400-600	$-2,15 \times 10^{-4}$	-1,01	-336	0,99	$5,06 \times 10^3$
	1400-1600	$-6,03 \times 10^{-2}$	-0,65	-3500	1,35	$4,93 \times 10^{-2}$
	3000-3200	-8,05	-0,40	-1900	1,60	$6,79 \times 10^{-6}$

Suspensie apoasă cu 0,5 % caolin (fig.2.31; 2.36)

Curba (frecven- ța) [1/s]	Interval [s]	Parametrii				
		C_1	C_2	C_3	n	k
1 ↓ (f=0)	200-300	$-1,56 \times 10^{-22}$	-4,28	-376	-2,28	$4,06 \times 10^{46}$
	700-900	$-2,52 \times 10^{-29}$	-4,80	-668	-2,80	$2,45 \times 10^{53}$
2 ↓ (f=0)	200-300	-46,48	-0,24	-1000	1,76	$1,11 \times 10^{-7}$
	700-900	-350,2	-0,13	-1701	1,87	$3,81 \times 10^{-9}$
5 ↑ (9,48- 9,52)	200-300	$-2,54 \times 10^{-14}$	-1,208	-376	0,92	$1,52 \times 10^4$
	700-900	$-2,87 \times 10^{-4}$	-1,08	-432	0,92	$1,41 \times 10^4$

Suspensie apoasă cu 1,3% hidroxid de alumina (fig.2.38; 2.39)

Curba (frecven- ța)	Interval [s]	Parametrii			
		C_1	C_2	C_3	n
1 ↑ (f=0)	200-300	$-7,27 \times 10^{-4}$	0,94	-168	1,06
	800-900	$-2,13 \times 10^{-3}$	0,92	-400	1,07
2 ↓ (f=0)	200-300	$-1,19 \times 10^{-3}$	-0,90	-168	1,09
	800-900	$-5,70 \times 10^{-3}$	-0,85	-400	1,15

0	1	2	3	4	5
3,4 ↓↓ (3,33-3,41)	200-300 800-900	$-4,30 \times 10^{-4}$ $-1,09 \times 10^{-3}$	-0,98 -0,98	-168 -400	1,02 1,02

Din analiza valorilor obținute rezultă că în cazul filtrării suspensiilor de caolin, procesul de filtrare se caracterizează prin modificarea ecuației în funcție de frecvența de agitare și totodată la o frecvență dată, pe parcursul duratei operației. În cazul suspensiilor apoase de hidroxid de aluminiu, modificarea valorii exponentului "n" este relativ mică și deci practic nu se schimbă caracterul filtrării. Cu aproximație se poate considera că la nivelul tuturor curbelor prezentate, valoarea medie a exponentului este $n = 1$, care caracterizează procesul de filtrare de tip intermediar; pentru curba 3,4 (fig.2.38) ecuația procesului este $V = \frac{1}{1500} \ln(1+0,003Z)$ în care $k=1500$, ecuație care conduce la valori ale volumului specific de filtrat, pentru diferite momente, verificate de determinările experimentale. Cunoașterea parametrilor "n" și "k" permite determinarea, folosind relația 2.27, a rezistenței totale la filtrare în diferite momente.

D. Filtrarea unor suspensii din tehnologia săbăului

În urma operațiilor de purificare a semii de extracție rezultă o soluție de săbăr ce conține în suspensie carbonat de calciu și săruri de calciu ale unor acizi organici, pe care se adorb impuritățile existente. Separarea fazei solide din seama turbure după carbonatare se realizează prin decantare urmată de filtrare. Suspensia concentrată de nămol cusoasă 20-25 % substanță uscată se filtrează pe filtre cu tambur rotativ, având turația 0,5 rot/min, suprafața pinzei filtrante de 40 m², care lucrează la un vid de 0,4 bar, iar soluția limpede după carbonatarea l-a se filtrează pentru reținerea completă a particulelor solide, prin filtre cu rame cu saci, cu funcționare periodică, având suprafața filtrantă de 100 m². Pentru asigurarea unei viteze mari de filtrare, este necesară încălzirea la 80-81°C. Utilajul industrial asigură un debit de filtrat de 40-30 m³/h în cazul filtrării nămolului și de 83-50 m³/h în cazul filtrării

zemi limpei; valorile mai mari corespund situației când pînza filtrantă este nouă. În laborator cu utilajul prezentat în fig. 2.24 și 2.25 s-au ridicat curbele de filtrare ale căror rezultate sînt prezentate în fig. 2.45 și 2.46.

În analiza curbelor prezentate în fig. 2.45 rezultă că agitația suspensiei îmbunătățește relativ puțin performanțele filtrării, (curbele 5 și 6) în comparație cu situația filtrării fără agitare (curbele 1 și 3). Referitor la măsurătorile făcute cu pînă nouă și pînă îmbucată se evidențiază o scădere a performanțelor în cazul pînsei îmbucate, curbele 2, 3 respectiv 2, 4; această observație este valabilă și pentru performanțele utilajului de filtrare industrial, liniile 7, 8. Totodată se remarcă viteza de filtrare mai mare în cazul filtrării de jos în sus. Rezultatele obținute în laborator cu capsula filtrantă corespund celor realizate la nivelul instalației industriale doar în prima parte a procesului de filtrare; în continuare abaterile se explică prin diferența soluțiilor constructive și a modului de funcționare în sensul că, la utilajul industrial, turta de precipitat de pe suprafața pînsei se curăță continuu ceea ce reglează grosimea stratului de precipitat pînă la cea. 8-10 mm. În cazul determinărilor de laborator cu capsula filtrantă, curbele 1-6 sînt ridicate în condițiile creșterii continue a grosimii stratului depus, care la sfîrșitul operației a atins valoarea de cea. 80-100 mm. Se menționează că pe utilajul de laborator obținerea unei grosimi a turtei de 8-10 mm durează cea. 15-20 s.

Referitor la rezultatele prezentate în fig. 2.46 se constată o concordanță corespunzătoare între performanțele din laborator și cele din utilajul industrial; sînt evidente vitezele foarte mari de filtrare specifice în cazul zemi limpei.

Filtrarea suspensiilor solid-lichid reprezintă un proces complex, condiționat de mai mulți parametri, dintre care se evidențiază caracteristicile suspensiei și cele ale membranei filtrante.

3. INTENSIFICAREA OPERAȚIEI DE FILTRARE PRIN UTILIZAREA ENERGIEI ULTRASUNETELOR

3.1. Parametrii fundamentali și legile fizice ale vibrațiilor elastice cu frecvență ultrasonică

3.1.1. Sistemul oscilator ultrasonic

Sistemul oscilator ultrasonic este format din transducătorul T, coloana intermediară CI, concentratorul ultrasonic CU și mediul de lucru ML (fig.3.1). Sistemul oscilator reprezintă componenta principală a utilajelor folosite pentru filtrarea suspensiilor solid-lichid și servește la intensificarea operațiilor de filtrare.

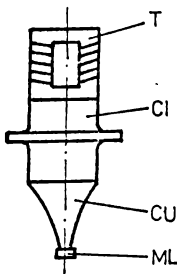


Fig. 3.1

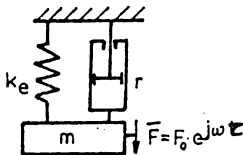


Fig. 3.2

în care $\{$ este deplasarea, iar k_e e constantă de proporționalitate, cunoscută ca și constantă elastică sau rigiditatea arcului.

Ecuația diferențială a sistemului mecanic oscilant, excitat cu o forță exterioară care variază după o lege armonică, se deduce din ecuația de echilibru a forțelor care acționează

sub acțiunea unei forțe excitatoare echivalentă forței create de transducător, de tip armonic, conform relației [3, 13, 17, 55]:

$$\bar{F} = F_0 e^{j\omega t} \quad (3.1)$$

Intervine de asemenea și frecarea viscoasă caracterizată de forța de frecare:

$$F_f = -rv \quad (3.2)$$

în care v este viteza de oscilație, iar r , un coeficient de proporționalitate. Proprietățile elastice ale sistemului mecanic oscilant sînt caracterizate prin forța elastică a resortului

$$F_e = -k_e \{ \quad (3.3)$$

să asupra sistemului:

$$m \frac{d^2 \xi}{d\tau^2} + r \frac{d\xi}{d\tau} + k_0 \xi = F_0 e^{j\omega\tau} \quad (3.4)$$

in care $\omega = 2\pi f$ este pulsația forței excitatoare cu amplitudinea F_0 , τ este timpul, f este frecvența, $j = \sqrt{-1}$, iar m este masa echivalentă a sistemului oscilant.

Din ecuația (3.4) se obține:

$$\frac{d^2 \xi}{d\tau^2} + \frac{r}{m} \frac{d\xi}{d\tau} + \frac{k_0}{m} \xi = \frac{F_0}{m} e^{j\omega\tau} \quad (3.5)$$

in care se introduc notațiile:

$$2\delta = \frac{r}{m} \quad (3.6)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k_0}{m} \quad (3.7)$$

in care δ este coeficientul de frecare, iar $\omega_0 = 2\pi f_0$ reprezintă frecvența circulară de oscilație proprie a sistemului.

Relația (3.5) devine:

$$\frac{d^2 \xi}{d\tau^2} + 2\delta \frac{d\xi}{d\tau} + \omega_0^2 \xi = \frac{F_0}{m} e^{j\omega\tau} \quad (3.8)$$

Soluția ecuației diferențiale (3.8) este de forma:

$$\xi = A \sin(\omega\tau + \varphi) \quad (3.9)$$

unde φ este diferența de fază dintre forța excitatoare și oscilația sistemului.

Mărimile amplitudinii oscilațiilor și a defazajului sînt:

$$A = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} \quad (3.10)$$

respectiv:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (3.11)$$

Din relațiile (3.10) și (3.11) rezultă că amplitudinea oscilațiilor este direct proporțională cu amplitudinea forței

excitatoare F_0 și invers proporțională cu masa echivalentă m a sistemului oscilator. Totodată mai intervin diferența dintre pulsația proprie ω_0 și pulsația forței excitatoare ω , cât și proprietățile de amortizare 2δ ale blocului ultrasonic. Dacă sistemul ar fi ideal, fără frecări, $\delta = 0$, rezonanța mecanică s-ar produce pentru $\omega_r = \omega_0$, iar amplitudinea ar deveni foarte mare. În practică, $\delta \neq 0$, iar rezonanța mecanică a sistemului oscilator real, amplitudinea oscilațiilor atinge un maxim A_r .

Apariția maximului amplitudinii oscilațiilor forțate reprezintă fenomenul de rezonanță. La aplicarea oscilațiilor în procese tehnologice fenomenul de rezonanță are o importanță mare deoarece determină un efect tehnologic maxim. Frecvența la care se realizează rezonanța satisface relația

$$\omega_r = 2\pi f_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2} \quad (3.12)$$

obținută prin anularea derivatei de ordinul întâi a expresiei (3.10) în raport cu ω , $\frac{dA}{d\omega} = 0$.

Din relațiile (3.10) și (3.11) rezultă amplitudinea maximă de rezonanță:

$$A_r = \frac{F_0}{2m\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \quad (3.13)$$

Se obișnuiește să se exprime amplitudinea oscilației și faza ei în mărimi adimensionale.

În relațiile (3.10) și (3.11) se introduce factorul de amortizare definit prin expresia:

$$\delta_n = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{r}{2\sqrt{mk_0}} \quad (3.14)$$

și se obține pentru amplitudine

$$A = \frac{F_0}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta_n^2\omega_0^2\omega^2}} = \frac{F_0}{\omega_0^2\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2})^2 + 4\delta_n^2\frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \quad (3.15)$$

Tinând seama de relația (3.7) rezultă

$$A = \frac{F_0}{k_0 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4\delta_a^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \quad (3.16)$$

respectiv pentru unghiul de defasaj φ

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\delta_a \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (3.17)$$

Pentru pulsația de rezonanță se obține

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta_a^2 \omega_0^2} = \omega_0 \sqrt{1 - 2\delta_a^2} \quad (3.18)$$

Amplitudinea de rezonanță este

$$A_r = \frac{F_0}{2\delta_a \omega_0 \sqrt{\omega_0^2 - \delta_a^2 \omega_0^2}} = \frac{F_0}{2\delta_a k_0 \sqrt{1 - \delta_a^2}} \quad (3.19)$$

Din relația (3.16) și fig. 3.3 se constată că efectul amortizării este mai pronunțat în zona de rezonanță.

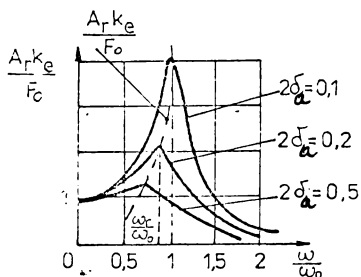


Fig. 3.3

Curbele $\frac{A_r k_0}{F_0} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$ pentru diverse valori ale factorului de amortizare δ_a , su maximul deplasat spre valori mai mici ale frecvenței cu creșterea valorilor factorului de amortizare. Lecul geometric al acestor maxime se situează pe curba $\frac{A_r k_0}{F_0} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)$. La amortizări neglijabile, $\delta_a \ll 1$, rezonanța în amplitudine apare la $\omega_r = \omega_0$.

Amplitudinea oscilației este defasată în urma forței excitatoare cu unghiul φ . Pentru $\omega = \omega_0$ (relația 3.17) se obține

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \text{ independent de valoarea factorului de amortizare } \delta_a.$$

Această situație definește rezonanța de fază caracterizată prin faptul că deplasarea și forța sînt în cuadratură, iar factorul de calitate Q , definit prin relația

$$Q = \frac{\omega_r m}{r} = \frac{\omega_r}{2\delta} = \frac{\pi f_r}{\delta} \quad (3.20)$$

devine

$$Q = \frac{\omega_r}{2\delta_s \omega_0} = \frac{1}{2\delta_s} \quad (3.21)$$

Din relația (3.20) rezultă că valoarea factorului de calitate, care caracterizează comportarea la rezonanță a unui sistem oscilatoriu, este cu atît mai ridicată cu cît factorul de amortizare este mai mic și ca urmare forma curbei de rezonanță este mai ascuțită. Factorul de calitate al sistemului oscilant mai poate fi exprimat și prin relația

$$Q = \frac{\omega_r}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad (3.22)$$

în care $\omega_1 < \omega_0 < \omega_2$, (fig.3.4). Diferența frecvențelor $f_2 - f_1$ reprezintă domeniul în care ordonata $\frac{A}{A_r} \in \left[\frac{1}{\sqrt{2}}, 1 \right]$. Un factor de calitate ridicat implică o valoare redusă pentru $(f_2 - f_1)$.

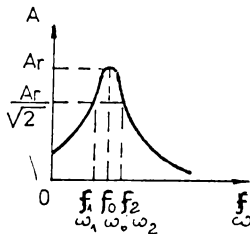


Fig.3.4

Energia disipată pe ciclu prin frecare viscoasă, în regia armonic, ținînd seama de relația (3.2), este:

$$E_F = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} F_r df = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} rA^2 \omega^2 \cos^2(\omega\tau + \varphi) d\tau = \pi r \omega A^2, \quad (3.23)$$

unde: $F_r = r \frac{df}{dt} = rA\omega \sin(\omega\tau + \varphi + \frac{\pi}{2})$ (3.24)

este forța de frecare proporțională cu viteza de oscilație.

Amplitudinea $\frac{A_r}{\sqrt{2}}$ (vezi fig.3.4) se numește amplitudinea punctelor de semiputere, deoarece din relația (3.23) rezultă că îi corespunde o pierdere de energie pe ciclu egală cu jumătate din energia de la rezonanță.

3.1.2. Câmpul ultrasonic. Unde ultrasonice. Mărimi caracteristice [5,17].

Propagarea undelor sonore și a ultrasunetelor ($f > 16$ kHz) într-un mediu se face printr-o succesiune de comprimări și destinderi corespunzătoare frecvenței vibrațiilor undei, amplitudinea unei comprimări fiind egală cu a unei destinderi. Presiunea suplimentară care apare în urma acestui fenomen se numește presiune sonică, respectiv ultrasonică. Dacă într-un lichid se propagă vibrații ultrasonice intense este posibilă, în corelare cu presiunea ultrasonică, prezența efectului de cavitație ultrasonică. Lichidele, deși transmit ușor comprimări foarte mari pe diverse direcții, sînt extrem de sensibile la eforturile de destindere. Perturbația provocată de un punct material în vibrație se propagă prin mediul elastic sub formă de compresii și destinderi. Ca urmare, propagarea unei unde ultrasonice se traduce printr-o variație a presiunii în timp și spațiu. Zona mediului elastic care se găsește în stare de vibrație, fiind sediul unor unde ultrasonice, reprezintă câmpul ultrasonic. Într-un punct situat în câmpul ultrasonic, presiunea acustică instantanee determină presiunea totală la un moment dat, atunci, de exemplu, dacă mediul elastic de propagare a undelor este atmosfera, presiunea totală în punctul respectiv variază sub, și peste valoarea presiunii atmosferice. Dacă mediul elastic de propagare a undelor este un lichid, presiunea totală în punctul respectiv variază sub, și peste presiunea hidrostatică. În funcție de intensitatea ultrasunetului, frecvența vibrațiilor și de natura lichidului, este posibil ca, într-un anumit punct, lichidul să se "rupă" în faza corespunzătoare unei destinderi, aceste microcavități denumite bule de cavitație sînt absorbite după o existență de scurtă durată, dezvoltîndu-se presiuni instantanee locale foarte mari care determină eroziuni mecanice ale unui corp solid din apropiere. La dispariția microcavităților din lichid, în anumite condiții, se constată de asemenea creșteri locale ale temperaturii și descărcări electrice.

Undele ultrasonice se consideră unde elastice și pot fi de diverse tipuri în raport cu traiectoria pe care o pot avea particulele oscilante ale mediului, cit și cu natura și dimensiunile mediului prin care se propagă. Dacă traiectoria este liniară și deplasarea particulelor se produce în direcția propagării undelor,

undele se numesc longitudinale. Astfel de unde se pot propaga prin orice mediu elastic: gaze, lichid sau solid.

In prezenta lucrare s-au avut in vedere numai undele longitudinale si folosirea lor.

La propagarea unei unde acustice se disting două fenomene: mișcarea oscilatorie a particulelor mediului, particule considerate puncte materiale și trecerea stării de agitație a mediului de la unele particule la altele. După trecerea undei, fiecare particulă se întoarce practic în poziția inițială.

Viteza de propagare a undelor longitudinale în medii solide nelimitate este dată de relația

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \sigma}{1 - \sigma - 2\sigma^2}} \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (3.25)$$

în care E este modulul de elasticitate longitudinal sau modulul lui Young $\left(\frac{N}{m^2}\right)$, ρ - densitatea $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$, σ - coeficientul lui Poisson.

În cazul propagării undelor longitudinale într-o bară ale căror dimensiuni transversale sînt neglijabile față de lungimea de undă pentru viteza de propagare se folosește relația

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.26)$$

Din relațiile (3.25) și (3.26) rezultă că viteza de propagare a undelor longitudinale într-un mediu solid nelimitat este mai mare decît în bare.

Viteza de propagare a undelor longitudinale în lichide este

$$c = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho \beta}} \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (3.27)$$

în care β este compresivitatea lichidului $\left(\frac{m^2}{N}\right)$.

Viteza de propagare a undelor în gaze este

$$c = \sqrt{\frac{p \cdot \chi}{\rho}} \quad (3.28)$$

în care p este presiunea gazului $\left(\frac{N}{m^2}\right)$, $\chi = \frac{c_p}{c_v}$, raportul căldurilor specifice la presiune constantă, respectiv la volum constant.

Viteza de propagare a ultrasunetelor sau viteza de fază, c , este legată de lungimea de undă, λ , și de frecvența vibra-

țrilor, f , prin relația:

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi}{k} \quad (\text{m}) \quad (3.29)$$

în care T este perioada (s), f este frecvența (s^{-1}), iar $k = \frac{\omega}{c}$ este numărul de undă (m^{-1}).

Intensitatea ultrasunetului reprezintă cantitatea de energie transportată de undă în unitatea de timp prin unitatea de suprafață perpendiculară pe direcția de propagare a undei. Ca urmare intensitatea reprezintă valoarea medie în timp a fluxului de energie care trece prin unitatea de suprafață

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T p w d\tau \quad \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (3.30)$$

în care p este valoarea instantanee a presiunii suplimentare ultrasunice, w - valoarea instantanee a componentei vectorului vitezei de vibrație care este perpendiculară pe unitatea de suprafață.

În cazul unei unde acustice plane care se propagă printr-un mediu elastic, omogen și izotrop, fără pierderi, după direcția axei x , ecuația diferențială a undei este

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial \tau^2} \quad (3.31)$$

în care ξ este deplasarea particulei mediului în jurul poziției sale de repaus, particula pusă în vibrație ca urmare a propagării undei. O relație analogă ecuației (3.31), ținând seama că presiunea acustică p variază și ea în timp și spațiu este

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \tau^2} \quad (3.32)$$

Soluția generală a ecuației diferențiale (3.32) are forma

$$p = \Psi_1(c.\tau - x) + \Psi_2(c.\tau + x) \quad (3.33)$$

în care $\Psi_1(c.\tau - x)$ și $\Psi_2(c.\tau + x)$ sînt funcții sinusoidale în cazul unei perturbații sinusoidale. Relația (3.33) devine

$$p = p_1 e^{jk(c.\tau - x)} + p_2 e^{jk(c.\tau + x)} \quad (3.34)$$

unde P_1 este amplitudinea presiunii corespunzătoare undei plane cu frecvența $f = \frac{\omega}{2\pi}$, care se propagă în sensul pozitiv al axei x cu viteza c ; P_2 - amplitudinea presiunii corespunzătoare undei plane cu aceeași frecvență $f = \frac{\omega}{2\pi}$, care se propagă în sensul negativ al axei x .

Din analiza relațiilor (3.33) și (3.34) rezultă soluția generală a ecuației unidimensionale a undei care reprezintă simultan două perturbații ce se propagă în același timp, cu aceeași viteză, însă în sensuri opuse. Dacă se admite că mediul este infinit, există numai unde progresive, directe, cel de-al doilea termen al soluțiilor (3.33) și (3.34) se anulează ca efect în punctul considerat.

Între presiunea acustică, p , viteza particulei, w , și deplasarea particulei, ξ , există relațiile

$$w = \frac{p}{\rho c} \quad (3.35) \quad \text{și} \quad \xi = \int w dt \quad (3.36)$$

unde produsul $\rho \cdot c$ reprezintă impedanța acustică specifică ($\frac{kg}{m^2 \cdot s}$).

În cazul unui proces vibratoriu armonic, valoarea efectivă a presiunii (p_{ef}) acustice comparativ cu amplitudinea presiunii acustice (P) satisface relația

$$P = \sqrt{2} p_{ef} \quad (3.37)$$

Sursa acustică transferă mediului înconjurător o anumită cantitate de energie, care se propagă odată cu propagarea undei.

Densitatea de energie acustică D în cazul undelor plane progresive reprezintă raportul dintre energia acustică E și volumul porțiunii mediului V , în care ea este conținută

$$D = \frac{E}{V} = \frac{p_{ef}^2}{\rho c^2} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 \left(\frac{V}{m} \right) \quad (3.38)$$

Expresia intensității acustice, pentru undele plane progresive este

$$I = c \cdot D = \frac{p_{ef}^2}{\rho \cdot c} = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2 \quad (3.39)$$

în care A este amplitudinea de oscilație armonică a punctului material.

Din relația (3.39) rezultă că valorile maxime ale amplitudinii oscilației A , vitezei de oscilației w_m și ale accelerației a_m ale particulelor mediului în care se propagă unda depind de intensitatea acustică și se determină cu relațiile

$$A = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} \quad (3.40); \quad w_m = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} \quad (3.41); \quad a_m = 2\pi f \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} \quad (3.42)$$

Din relațiile (3.37), (3.39) și (3.41) se obține

$$P = \sqrt{2I \rho c} = \rho c \cdot w_m \quad (3.43)$$

La propagarea undelor acustice într-un mediu elastic, unda pierde treptat din energia pe care o avea inițial, intervenind o atenuare, cu consecințe asupra legii de variație a intensității acustice, corespunzător relației

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (3.44)$$

în care I_0 este intensitatea acustică în punctul la nivelul sursei, $x = 0$, I_x - intensitatea acustică la distanța x de sursă, α - coeficientul de absorbție.

Din relațiile (3.39) și (3.44) se obține o expresie pentru atenuarea amplitudinii de oscilație

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} \quad (3.45)$$

Atenuarea intensității ultrasunetelor sinusoidale emise de o sursă la parcurgerea unui lichid este accentuată datorită neliniarității mediului și nu se mai păstrează forma sinusoidală, unde se descompune într-o oscilație fundamentală sinusoidală și o serie de armonici superioare care, avind frecvențe ridicate, suferă o atenuare mai mare decît oscilația fundamentală. Energia acustică repartizată pe fundamentală și pe armonici suferă în ansamblu o atenuare mai mare decît în cazul păstrării formei sinusoidale a undei. În practică, ultrasunetele cu intensități ridicate se identifică numai la distanțe relativ mici de emițător.

La limita de separație a două medii, avind impedanțele acustice specifice $\rho_1 c_1$, respectiv $\rho_2 c_2$, se definește factorul de reflexie acustică k_r , prin relația:

$$k_r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (3.46)$$

Intre presiunea undei reflectate și a celei incidente există relația

$$P_r = P_i k_r \quad (3.47)$$

Intensitatea undei reflectate I_r la limita de separație între cele două medii corespunde expresiei

$$I_r = I_i k_r^2 \quad (3.48)$$

în care I_i este intensitatea undei incidente.

În spații limitate de suprafețe reflectante și în cazul cînd în aceste spații se cuprinde un număr întreg n de semiperioade, $n \frac{\lambda}{2}$, este posibilă formarea undelor staționare care reprezintă un caz particular de interferență.

În urma reflexiei unei unde acustice incidente pe un plan de separare a două medii în contact, extinse la infinit, se formează o undă reflectată care se reîntoarce în primul mediu și interferează cu unda incidentă. Ca urmare, pe direcția de propagare a undelor în orice punct din primul mediu, vor trece la un moment dat două unde. Presiunea acustică într-un punct situat la distanța x de planul de separare a două medii în contact, va fi egală cu suma presiunilor undei incidente și reflectate. Din ecuația (3.34), aplicînd relațiile lui Euler, se trece de la forma exponențială la forma sinusoidală și se obține

$$p = P_i \sin(\omega t - k_1 x) + P_r \sin(\omega t + k_1 x) \quad (3.49)$$

în care P_i , P_r sînt amplitudinile presiunii corespunzătoare undei incidente, respectiv reflectate, k_1 este numărul de undă al mediului 1, care conține ambele unde. Analog se poate scrie ecuația vitezei în același punct

$$w = \frac{P_i}{\rho_1 c_1} \sin(\omega t - k_1 x) - \frac{P_r}{\rho_1 c_1} \sin(\omega t + k_1 x) \quad (3.50)$$

Considerînd că întreaga energie acustică se reflectă

$$P_i = P_r = P,$$

iar pentru impedanțele acustice specifice ale celor două medii $\rho_1 c_1 \ll \rho_2 c_2$, relațiile (3.49) și (3.50) devin

$$p = 2P \sin \omega \tau \cdot \cos k_1 x \quad (3.51)$$

$$w = - \frac{2P}{\rho_1 c_1} \cos \omega \tau \cdot \sin k_1 x \quad (3.52)$$

La suprafața de separație a celor două medii, $x=0$, sau în puncte aflate la distanțe egale cu $n \frac{\lambda}{2}$, presiunea acustică devine maximă (ventru de presiune), $2P \sin \omega \tau$, iar valoarea vitezei particulei este zero (nod de viteză). În puncte aflate la distanțe egale cu $(2n + 1) \frac{\lambda}{4}$, presiunea acustică devine zero (nod de presiune), iar viteza particulei trece printr-un maxim $\frac{2P}{\rho_1 c_1} \cos \omega \tau$, (ventru de viteză).

Distribuția vitezei și a presiunii în unda staționară arată că nodurile și ventrele vitezei sînt decalate cu $\frac{\lambda}{4}$ față de nodurile și ventrele presiunii.

Dacă unda se propagă într-un mediu mai dens, (solid sau lichid) fiind reflectată de un mediu mai puțin dens, (gas) $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$, în acest caz după reflexie intervine o schimbare de fază cu 180° pentru unda presiunii acustice și păstrarea fazei pentru viteza particulei. Relațiile (3.49) și (3.50) devin în acest caz

$$p = -2P \cos \omega \tau \sin k_1 x \quad (3.53)$$

$$w = \frac{2P}{\rho_1 c_1} \sin \omega \tau \cos k_1 x \quad (3.54)$$

La suprafața de separație a celor două medii, $x=0$, sau în puncte aflate la distanțe egale cu $n \frac{\lambda}{2}$, se obțin noduri de presiune și ventre de viteză, egale cu $\frac{2P}{\rho_1 c_1} \sin \omega \tau$.

În punctele depărtate de suprafața de reflexie cu un sfert de perioadă $(2n + 1) \frac{\lambda}{4}$ se obțin ventre de presiune, egale cu $2P \cos \omega \tau$ și noduri ale vitezei.

Prin interferarea unei unde incidente cu o undă reflectată în naștere un sistem de unde staționare, caracterizat prin o serie de noduri și ventre de presiune și de viteză ale particu-

lelor. Poziția nodurilor și ventrelor depinde de frecvența ultrasunetelor.

Dacă o porțiune a mediului de propagare a undei are limite fixe la ambele capete, atunci unda staționară va avea noduri la ambele limite, dacă porțiunea mediului cuprinde un număr întreg de semilungimi. În cazul când ambele limite sînt libere, pe ele se formează ventru; aceasta este cazul sistemelor de oscilație formate dintr-un transductor la care se conectează un concentrator acustic. Dacă o limită a porțiunii mediului este fixă, iar a doua liberă, atunci pe prima se formează nod, iar pe cealaltă, ventru.

3.2. Utilaje cu ultrasunete pentru filtrarea suspensiilor

În literatură sînt prezentate rezultatele unor cercetări recente privind intensificarea operațiilor de transfer de moment, de căldură și de masă, prin suprapunerea peste starea staționară a unui solid sau fluid sau peste curgerea normală a fluidelor, a unor mișcări oscilatorii care introduc în sistem energii suplimentare. Oscilațiile încluzînd folosirea pulsațiilor, a vibrațiilor mecanice, sonore cît și a ultrasunetelor [15,16,40,51,52]. Posibilitățile de aplicare a oscilațiilor (pulsații și vibrații) în scopul intensificării operațiilor de transfer, necesită cunoașterea mecanismului lor de intervenție și, în acest context, generalizarea elementelor teoretice, verificată apoi experimental. Elaburarea unei teorii generale unitare privind mecanismul de acțiune al oscilațiilor în intensificarea operațiilor de transfer este dificilă.

Parametrii de oscilare la care se raportează intensificarea operațiilor de transfer sînt variabilele singulare - amplitudinea și frecvența oscilațiilor - sau accelerația mișcării oscilatorii, viteza de oscilare și criteriul de oscilare, exprimat prin raportul dimensional dintre accelerația mișcării oscilatorii și accelerația gravitațională. În funcție de parametrii de oscilare se obțin curbe de variație care permit identificarea eficacității maxime, corelată cu apariția fenomenului de rezonanță. Domeniul frecvențelor de oscilație trebuie astfel ales încît să cuprindă frecvența de rezonanță, pentru care se obțin intensificări maxime cu un consum redus de energie. Intensificarea operațiilor de trans-

fer cu ajutorul oscilațiilor determină micșorarea dimensiunilor aparatelor, comparativ cu variantele convenționale, la aceeași productivitate și calitate a produsului sau are ca efect o creștere a productivității pentru aceleași dimensiuni ale aparatului. Estimarea globală a avantajelor determinate de folosirea oscilațiilor pentru intensificarea operațiilor de transfer trebuie să ia în considerare și cheltuielile suplimentare determinate de investiție, întreținere și consumul de energie [15,20].

Ultrasunetele sînt folosite pentru intensificarea operațiilor de transfer de masă și căldură în medii lichide și gazoase sub forma undelor longitudinale plane. Propagarea ultrasunetelor prin mediul fluid elastic sub formă de compresii și rarefieri determină o variație a presiunii mediului în timp și spațiu (vezi 3.1.2). Presiunea acustică a ultrasunetelor generate cu ajutorul unor surse corespunzător dimensionate poate depăși de multe ori valoarea presiunii statice a mediului în care se propagă.

Ultrasunetele se aplică la scară industrială pentru intensificarea operațiilor de transfer la realizarea unor operații mecanice: sedimentarea particulelor solide din gaze, filtrarea suspensiilor, formarea emulsiilor. Totodată, pentru intensificarea operației de filtrare s-a propus schimbarea periodică, cu frecvență relativ mică, a sensului de filtrare pentru autocurățirea membranei filtrante [34,35,61].

3.2.1. Elemente ale construcției și funcționării utilajelor cu ultrasunete pentru filtrarea suspensiilor lichid-solid.

În [38] se prezintă un utilaj la care se aplică intensificarea operației de filtrare folosind unde sonore. Tesătura metalică a mediului filtrant este supusă la oscilații create cu ajutorul unui vibrator electromagnetic, avînd frecvența de bază 100 Hz și frecvența unor armonici superioare în jur de 12 kHz. S-a experimentat funcționarea filtrului vehiculînd suspensia solid-lichid prin membrana filtrantă orizontală în sens invers acțiunii cîmpului gravitațional. Metoda este propusă în cazurile cînd intervin dificultăți legate de celătarea filtrului sau de desprinderea precipitatului de pe membrana filtrantă. Au fost propuse [21,22,25] filtre care folosească ultrasunete, dintre care unele la scară pilot sau industrială. La aceste utilaje, membrana filtrantă orizontală, prin intermediul unui concentrator acustic din oțel, este pusă în legătură cu transductorul magnetostriktiv

care reprezintă sursa de oscilații cu frecvență ultrasonică. Este necesar ca membrana filtrantă să aibă posibilitatea să oscileze în direcția axială a corpului cilindric al filtrului. În fig. 3.5 se prezintă o secțiune longitudinală printr-un astfel de filtru. Suspensia (1) se

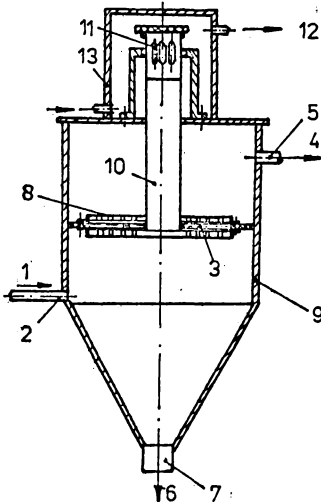


Fig. 3.5

aduce prin conducta (2) în partea inferioară a utilajului sub membrana filtrantă (3) și se ridică sub acțiunea diferenței de presiune create. Lichidul trece prin membrana filtrantă și filtratul (4) se evacuează prin conducta (5). Particulele solide se aglomerează sub membrana filtrantă și datorită vibrației acestea nu se pot fixa, iar precipitatul (6) cade sub acțiunea cimpului gravitațional și se colectează la partea inferioară, iar prin racordul (7) se poate evacua. Dispozitivul filtrant este format din două site metalice (8) rigide între care se fixează mediul filtrant (3). Acest dispozitiv poate oscila liber axial în corpul cilindric (9) al filtrului. Dispozitivul filtrant este cuplat mecanic rigid prin intermediul concentratorului acustic (10) de transducerul magnetostriktiv (11) care, la puteri peste 200 W se răcește cu apă (12), fiind încastrat în carcasa (13). Procesul de filtrare și de curățare a suprafeței filtrante se desfășoară simultan și continuu. Ca urmare se elimină unele dezavantaje ale filtrelor de tip nucă, funcționarea discontinuă datorită necesității îndepărtării precipitatului de pe filtru și celmatarea membranei filtrante cu particule solide foarte fine, cu dimensiuni sub $1 \mu\text{m}$. De plus, utilizarea ultrasunetelor evită flocularea unor coagulanți care depurifică precipitatul.

Da figura 3.6 se prezintă o secțiune longitudinală printr-un alt tip de filtru cu ultrasunete [25]. Prin gtuțul (1), suspensia (2) se introduce în rezervorul (3), trece prin țesătura filtrantă (4), sub acțiunea unei diferențe de presiune. Particulele solide reținute cad sub acțiunea cimpului gravitațional la partea inferioară, fiind eliminate prin racordul (5) sub formă

unei suspensii îngroșate (6). Tesătura filtrantă (4) se curăță

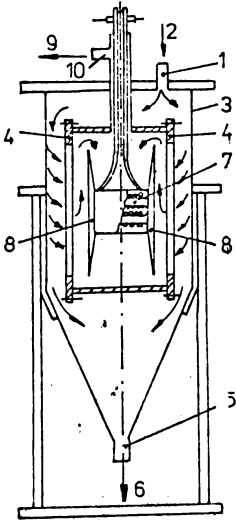


Fig. 3.6

continuu de particulele solide sub acțiunea oscilațiilor ultrasunice emise de către transductorul magnetostriktiv (7) prin cele două suprafețe de radiație sub formă de plăci pătrate subțiri (8). Filtratul (9) se evacuează pe la partea superioară prin conducta (10). Unele caracteristici tehnice ale acestui tip de filtru sînt: suprafața de filtrare $0,25 - 1 \text{ m}^2$; presiunea de lucru pînă la $0,2 \text{ MN/m}^2$; frecvența oscilațiilor create de transductorul magnetostriktiv $16 - 21 \text{ kHz}$; puterea consumată $1-5 \text{ kW}$; dimensiuni de gabarit $0,7 \times 0,4 \times 1,8 \text{ m}$.

Curățirea pinșelor filtrante la alte tipuri de filtre continue (filtru cu bandă, filtru cu tambur rotativ, etc.) poate fi intensificată cu ajutorul ultrasunetelor, ca urmare a trecerii pinșeri filtrante prin baia de spălare în care se introduce un cimp ultrasonic.

În [65] se prezintă performanțele unui filtru cu ultrasunete realizat în varianta constructivă la care oscilațiile membranei filtrante metalice sînt într-un plan perpendicular pe direcția de curgere a lichidului, cu aplicații la purificarea triacetatului de celuloză. Din fig. 3.7 rezultă produc-

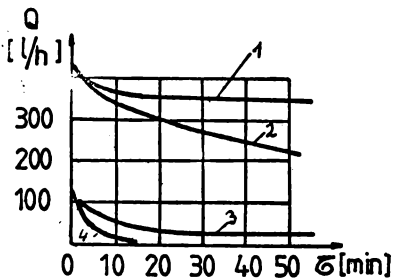


Fig. 3.7

tivitatea filtrului în mai multe variante de funcționare; curba 1 - cu vibrații și cu instalație de curățire periodică; curba 2 - cu vibrații, fără instalația de curățire; curba 3 - fără vibrații și cu instalația de curățire; curba 4 - fără vibrații și fără instalația de curățire. Productivitatea filtrului cu vibrații avînd conectată și instalația de curățire care asigură scutirea precipitatului de pe suprafața membranei filtrante se stabilizează practic în al cincilea minut de lucru, adică relativ repede, după care, debitul filtrului scade relativ puțin. Analizînd comparativ productivitățile date prin curbele 2 și 4 se vede în eviden-

șă numai aportul cimpului ultrasonic în intensificarea operației de filtrare, rezultând o creștere de 3 - 4 ori.

3.2.2. Dimensionarea transducerului ultrasonic magnetostriktiv

Transductoarele magnetostriective folosesc fenomenul de magnetostriețiune care este propriu materialelor feromagnetice și constă în modificarea dimensiunilor unui corp feromagnetic sub acțiunea unui cimp magnetic alternativ. Sînt posibile două tipuri de fenomene magnetostriective: magnetostriețiune liniară la care variația dimensiunilor geometrice ale transducerului se produce în direcția aplicării cimpului magnetic și magnetostriețiune volumică la care dimensiunile geometrice se modifică în toate direcțiile.

Magnetostriețiunea liniară se produce în cimpuri magnetice relativ slabe și corespunde porțiunii nesaturate a curbei de magnetizare.

Magnetostriețiunea volumică se produce la cimpuri magnetice mari și corespunde domeniului de saturație a curbei de magnetizare. În practică se întrebunțează transductoare cu magnetostriețiune liniară. Efectul magnetostriectiv este diferit la diverse metale și aliaje. Pentru producerea cimpului magnetic de

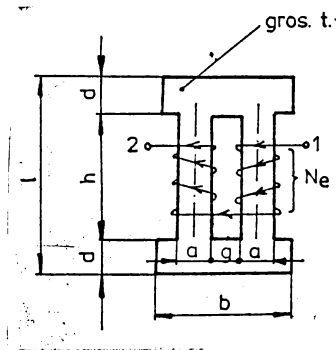


Fig. 3.8

înaltă frecvență, pe coloanele transducerului (fig. 3.8) se așează o înfășurare de excitație alimentată de la o sursă avînd tensiunea 20-25 V și frecvența reglabilă în domeniul 18-22 kHz. Pe fiecare coloană a transducerului este așezat același număr de spire. Obținerea unor fluxuri magnetice de același sens în cele două coloane se asigură din sensul de bobinare a înfășurărilor. Deoarece în lucrare, în determinările experimentale s-au folosit transductoare magnetostriective sub forma unor mieșuri din ferită, fabricate la I.C.E. București, în continuare se analizează numai această categorie de transductoare [80]. Efectul magnetostriectiv este un efect par, deoarece sensul deformației mieșului nu variază la schimbarea de sens a cimpului magnetic. Frecvența deformațiilor este de două ori mai mare decît frecvența cimpului mag-

netic alternativ care parcurge înfăgurarea de excitație a transducerului formată din două bobine cilindrice cu număr egal de

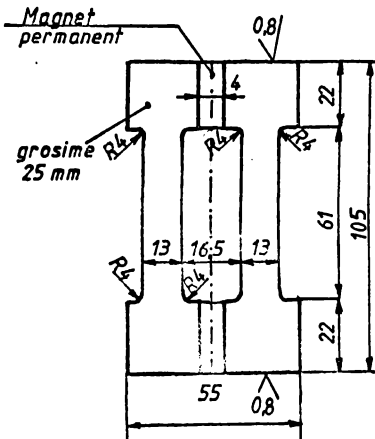


Fig. 3.9

spire, N_0 , pe cele două coloane, care în raport cu bornele de alimentare 1 - 2, (fig. 3.8) sînt legate în serie. În fig. 3.9 se prezintă geometria și dimensiunile în mm ale transducerului magnetostrictiv utilizat.

Dacă se folosește transducătoare polarizate, prin înfăgurarea de excitație a cărora, în afară de curentul alternativ, trece și un curent continuu de polarizare sau, într-o altă variantă, se înseriază în structura miezului de

ferită doi magneți permanenți (fig. 3.9), echivalenți curentului continuu de polarizare, atunci frecvența de deformare a transducerului este egală cu frecvența de excitație, iar amplitudinea deformației este mult mai mare la aceeași amplitudine a inducției magnetice de excitație. Valoarea cimpului continuu de magnetizare trebuie să fie superioară valorii cimpului magnetic variabil care excită transducerul. Amplitudinea maximă a vibrațiilor transducerului apare cînd frecvența proprie de rezonanță și acea a cîmpului coincide cu frecvența cîmpului magnetic alternativ.

În transducerul magnetostrictiv se produce o dublă transformare a energiei electrice absorbite de către înfăgurarea de excitație. Într-o primă etapă intervine o transformare electromecanică și în a doua etapă, o transformare mecanoacustică. Fiecare din aceste transformări este însoțită de pierderile de energie care se manifestă prin încălzirea transducerului. Este vorba de pierderi în înfăgurarea de excitație, pierderi în materialul transducerului prin curenți turbionari și prin histeresis, pierderi prin oscilațiile mecanice în fiecare element al sistemului oscilant care se compun din pierderile prin frecare internă, pierderi în elementele de fixare și pierderi datorită acordării imperfecte cu mediul de lucru. Randamentul total electroacustic al transducerului este

$$\eta_{ea} = \frac{P}{P_0} = \eta_{em} \cdot \eta_{ma} \quad (3.55)$$

in care P_a este puterea acustică radiată; P_e - puterea electrică absorbită de înfășurarea de excitație; η_{em} - randamentul electromeccanic, iar η_{ma} - randamentul meccanoacustic.

Randamentul de transformare electroacustică al miezurilor de ferită, pentru puterea de 100 W, utilizate la transducătoarele la frecvențe de 20 - 50 kHz, este de aproximativ 80%.

In cazul transductorului prezentat in fig.3.8, coloanele sînt elementele active in care iau naștere forțele magnetostrictive. Jugurile, de dimensiuni $d \times b \times t$, sînt elemente pasive care transmit vibrațiile elastice spre concentratorul acustic. Prin suprafața radiantă $S_x = b \times t$, vibrațiile elastice meccanice se transmit sub formă de unde elastice coloanei intermediare și concentratorului ultrasonic sau uneori direct mediului de lucru. Lățimea jugului transductorului satisface condiția $b < \frac{\lambda}{2}$, iar grosimea t a miezului de ferită se corelează cu puterea transductorului [17, 22].

Rezistența de undă a celor două coloane, $n_{col}=2$, este

$$W_{col} = \rho_{on_{col}} S_{col} = \rho_{on_{col}} at \quad (3.56)$$

iar pentru rezistența de undă a jugului se poate scrie

$$W_{jug} = \rho c S_x = \rho c b t \quad (3.57)$$

in care ρ este densitatea materialului transductorului, S_{col} -secțiunea transversală a unei coloane, n_{col} - numărul coloanelor, iar S_x - suprafața radiantă.

Condiția de rezonanță meccanică a transductorului este dată de relația [23]

$$\operatorname{tg}(kd) \cdot \operatorname{tg}\left(k \frac{h}{2}\right) = \frac{W_{col}}{W_{jug}} = \frac{2a}{b} = q \quad (3.58)$$

in care q este coeficientul de reducere a secțiunii transversale a coloanelor in raport cu suprafața radiantă.

Ecuația (3.58) se poate scrie și sub forma

$$\operatorname{tg}\left(\alpha \frac{\pi}{2}\right) \cdot \operatorname{tg}\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) = q \quad (3.59)$$

in care $\alpha = \frac{d}{\lambda}$, $\beta = \frac{h}{\lambda}$, iar numărul de undă (rel.3.29) este

$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ fiind lungimea de undă in materialul magne-

tostrictiv.

Relația (3.59) în care se pune în evidență frecvența f este o ecuație transcendentă care se rezolvă grafic sau cu ajutorul calculatorului electronic. La intersecția curbelor $y_1(f)$ și $y_2(f)$ definite prin relațiile

$$y_1 = \operatorname{tg} \frac{2\pi df}{\epsilon} \quad (3.60) ; \quad y_2 = \frac{q}{\operatorname{tg} \frac{\pi hf}{\epsilon}} \quad (3.61)$$

se obține frecvența de rezonanță f_0 .

Energia electrică absorbită de către înfășurarea de excitație a transductorului creează în miezul coloanelor, datorită efectului magnetostrictiv, tensiuni mecanice și, ca o consecință a deformației liniare. Forța magnetostrictivă este dată de produsul dintre tensiunea magnetostrictivă și secțiunea transversală a coloanelor. Numai dacă frecvența forței magnetostrictive excitatoare este egală cu frecvența de rezonanță mecanică a transductorului, identificată prin rezolvarea ecuației (3.59), în miezul acestuia se produc tensiuni mecanice maxime și deformații cu amplitudine maximă.

Pentru determinarea numărului de spire, N_0 , ale înfășurării de excitație de pe o coloană a miezului, se aplică relația [21]

$$2N_0 = \frac{U}{4,44 f S_{\text{col}} B_m} \quad (3.62)$$

în care s-a considerat (vezi fig.3.9) că înfășurările de excitație de pe cele două coloane sînt legate în serie și alimentate de la surse de tensiune U , cu frecvența f ; B este amplitudinea inducției magnetice variabile. În cazul miezurilor de ferită, valorile inducției magnetice B_m sînt 0,02 - 0,04 T [80].

3.2.3. Dimensionarea concentratoarelor ultrasonice cu secțiune transversală variabilă.

Concentratorul ultrasonic face legătura între transductorul magnetostrictiv și obiectul de transfer cu scopul de a mări amplitudinea de oscilație și de a asigura un acord de impedanță mecanică între transductor și sarcina din spațiul de lucru. Mărirea amplitudinii de oscilație la obiectul de transfer trebuie să se facă adepăgi valorile limită de rezistență mecanică la obo-

seală a materialului din care este confecționat concentratorul.

Ecuația diferențială a oscilațiilor concentratelelor ultrasonice cu secțiune transversală variabilă se stabilește [43,55] considerând că

- concentratorii sînt simetrici axiali, de obicei cu secțiune circulară ;

- în concentrator se propagă numai unde plane longitudinale, iar tensiunea mecanică este uniform distribuită pe secțiune;

- se pot neglija deformațiile transversale, deoarece dimensiunile transversale ale concentratelelor sînt mai mici decît jumătatea de lungime de undă a ultrasunetelor care se propagă;

- impedanța mecanică la ieșirea din concentratorul ultrasonic este nulă.

Se consideră un element de volum din concentratorul cu secțiune variabilă, fig.3.10. Atunci cînd prin concentrator se propagă o undă longitudinală, forța resultantă care acționează asupra elementului de volum este

$$F = F_1 - F_2 = \sigma S - \left(\sigma - \frac{\partial \sigma}{\partial x} \cdot dx \right) \left(S - \frac{\partial S}{\partial x} \cdot dx \right) \quad (3.63)$$

unde S este aria secțiunii transversale la nivelul coordonatei curente x , σ - efortul unitar normal sau tensiunea mecanică normală în secțiunea S .

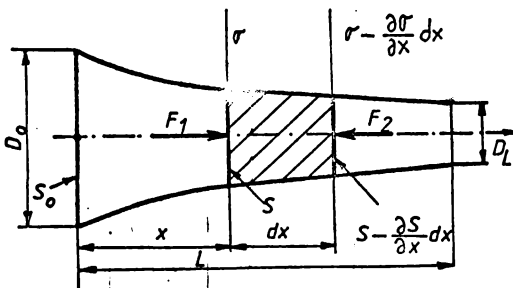


Fig.3.10

Ținînd seama de legea a doua a dinamicii, la nivelul elementului de masă rezultă

$$F = d(\sigma S) = m \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial \tau^2} \quad (3.64)$$

unde $f(x, \tau)$ este deplasarea elementului de volum al concentratorului în direcția coordonatei x de propagare a undei longitu-

dinale. Deoarece pierderile de energie mecanică în concentrator sînt proporționale cu viteza de oscilație, tensiunea mecanică se poate exprima prin legea lui Hooke completată cu un termen

$$\sigma = E \frac{\partial f}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial x} \quad (3.66)$$

unde E este modulul lui Young al materialului concentratorului, iar μ - coeficientul de frecare internă.

Din relația (3.66) prin derivare se obține

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = E \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^3 f}{\partial t \partial x^2} \quad (3.67)$$

Din relațiile (3.64), (3.65) și (3.67) rezultă

$$\begin{aligned} S E \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dx + S \mu \frac{\partial^3 f}{\partial t \partial x^2} + (E \frac{\partial f}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial x}) \frac{\partial S}{\partial x} dx = \\ = m \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (3.68)$$

Deoarece masa elementului de volum este $m = \rho S dx$, iar viteza undelor longitudinale în concentrator $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ (3.26), din relația (3.68) prin împărțire cu $E \cdot S \cdot dx$ se obține ecuația diferențială generală de vibrație a concentratoarelor ultrasonice cu secțiune transversală variabilă

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\mu}{E} \cdot \frac{\partial^3 f}{\partial t \partial x^2} + \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\mu}{E} \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial x} \right) \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}, \quad (3.69)$$

În cazul neglijării pierderilor de energie prin frecări interne ($\mu = 0$), relația (3.69) devine

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \quad (3.70)$$

Pentru oscilații armonice ale concentratorului și considerînd variația deplasării de oscilație $f(x)$ ca funcție numai de coordonate x și nu și de timp, relația (3.70) devine

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\omega^2}{c^2} f = 0 \quad (3.71)$$

unde $\omega = 2\pi f$ este pulsația oscilațiilor armonice cu frecvența f . Ținând seama de relația (3.29) care definește numărul de undă, ecuația diferențială (3.71) devine

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \xi = 0 \quad (3.72)$$

Ecuația (3.72) descrie variația amplitudinii de oscilație $\xi(x)$ în lungul concentratorului ultrasonic dacă prin el se transmit vibrații ultrasonice longitudinale. Rezolvarea acestei ecuații se face cunoscând legea de variație a diametrului secțiunii transversale a concentratorului, care poate fi exponențială, liniară, hiperbolică sau catenoidală.

În cazul unui concentrator de formă exponențială, variația secțiunii transversale este dată de relația

$$S(x) = S_0 e^{-\gamma x} \quad (3.73)$$

unde S_0 este aria secțiunii la intrarea în concentrator, adică la îmbinarea cu transductorul magnetostrictiv.

Din relația (3.73) se obține, prin logaritmare și derivare

$$\frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\ln S) = -\gamma \quad (3.74)$$

în care γ este o constantă care caracterizează variația secțiunii transversale de-a lungul concentratorului.

Dacă secțiunea transversală este circulară, variația diametrului secțiunii corespunde relației

$$D(x) = D_0 e^{-\frac{\gamma}{2} x} \quad (3.75)$$

din care, pentru $x = 0$ și $x=L$, (fig.3.10) se obțin diametrele D_0 , respectiv D_L . Diametrul inițial D_0 al concentratorului acustic se alege egal cu diagonala suprafeței radiante a transductorului magnetostrictiv pentru utilizarea completă a suprafeței radiante. În această sens, lipirea concentratorului de transductor necesită o atenție tehnologică deosebită, evitându-se golurile de aer sau porțiuni nelipite.

Pentru concentratorul acustic exponențial, ecuația diferențială (3.72) devine

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \gamma \frac{\partial f}{\partial x} + k^2 f = 0 \quad (3.76)$$

Soluția generală a ecuației diferențiale (3.70), ținând seama de ecuația (3.75) este

$$f(x, \tau) = f(x) \cdot e^{j\omega\tau} = e^{\frac{\gamma}{2}x} \cdot (Ae^{-\frac{j\omega}{c_v}x} + B e^{\frac{j\omega}{c_v}x}) \cdot e^{j\omega\tau} \quad (3.77)$$

$$\text{în care } c_v = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\gamma^2 c^2}{4\omega^2}}} \quad (3.78)$$

reprezintă viteza undelor longitudinale în concentratorul cu secțiune variabilă. Din relația (3.78) rezultă $c_v > c$. Pentru ca vibrațiile acustice să poată fi transmise de la transducer la obiectul de transfer, și deci, în mediul de lucru, prin intermediul concentratorului ultrasonic, din relația (3.78) rezultă că trebuie satisfăcută condiția

$$\frac{\gamma}{2} < \frac{\omega}{c} \quad (3.79)$$

Presiunea acustică și viteza particulelor în oscilație, considerată într-un punct, la distanța $x \in [0, L]$ se exprimă prin relațiile

$$p_x = -\rho \frac{\partial f}{\partial \tau} = -j\rho\omega e^{\frac{\gamma}{2}x} (Ae^{-j\frac{\omega}{c_v}x} + B e^{j\frac{\omega}{c_v}x}) e^{j\omega\tau} \quad (3.80)$$

și

$$v_x = \frac{\partial f}{\partial x} = e^{\frac{\gamma}{2}x} \left[A \left(\frac{\gamma}{2} - j\frac{\omega}{c_v} \right) e^{-\frac{j\omega}{c_v}x} + B \left(\frac{\gamma}{2} + j\frac{\omega}{c_v} \right) e^{j\frac{\omega}{c_v}x} \right] e^{j\omega\tau} \quad (3.81)$$

unde ρ este densitatea materialului din care este confecționat concentratorul.

Coefficientul de amplificare M a amplitudinii oscilației pentru concentratorul de secțiune circulară variabilă poate fi definit și ca raportul vitezelor v_1 și v_0 ale particulelor situate la distanța $x = L$, respectiv $x = 0$ (fig. 3.10) sub formă

$$M = \frac{\int_0^L v_1}{\int_0^L v_0} = \frac{v_1}{v_0} = \frac{D}{D_L} = \sqrt{\frac{S_0}{S_L}} > 1 \quad (3.82)$$

Dacă lungimea concentratorului de secțiune variabilă este un număr întreg, $n = 1, 2, 3, \dots$ de jumătăți de lungime de undă, se calculează lungimea de rezonanță a concentratorului ultrasonic

$$L = n \frac{\lambda_v}{2} = n \frac{c_v}{2f} = n \frac{c}{2f \sqrt{1 - \frac{\gamma^2 c^2}{4 \omega^2}}} \quad (3.83)$$

Din relația (3.75), pentru $x = L$, se obține

$$D_L = D_0 e^{-\frac{\gamma}{2} L} \quad (3.84)$$

iar prin logaritmare rezultă

$$\gamma = \frac{2}{L} \ln \frac{D_0}{D_L} = \frac{2}{L} \ln M \quad (3.85)$$

Relația (3.85) este importantă la proiectarea concentratorului acustic deoarece, în raport cu necesitatea tehnologică de amplificare a vitezei, $w_L > w_0$, și în raport cu lungimea barei, se poate determina constanta γ , necesară în relațiile (3.73) sau (3.75), pentru a caracteriza modul exponențial de scădere a secțiunii, respectiv a diametrului concentratorului.

Din relațiile (3.83) și (3.85) se obține

$$L = \frac{nc}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln M}{\pi n}\right)^2} \quad (3.86)$$

În cazul coloanelor cilindrice, $D_L = D_0$, $\ln M = 0$, iar din relația (3.86) se obține lungimea semiundică a coloanelor cilindrice utilizate ca piese de adaptare și de fixare

$$L = \frac{nc}{2f} = \frac{n\pi}{k} \quad (3.87)$$

Din expresia (3.81) rezultă că viteza particulelor variază în lungul concentratorului și se poate anula în dreptul anumitor secțiuni transversale ale barei identificate pentru anumite valori ale lui x . Punctele de viteză zero sînt puncte nodale a căror cunoaștere este necesară pentru stabilirea locului de fixare mecanică a concentratorului acustic în cadrul utilajului.

Punind condiția $w_x = 0$, din relația (3.81) rezultă

$$A\left(\frac{\gamma}{2} - j\frac{\omega}{c_v}\right) e^{-j\frac{\omega}{c_v}x} + B\left(\frac{\gamma}{2} + j\frac{\omega}{c_v}\right) e^{j\frac{\omega}{c_v}x} = 0 \quad (3.88)$$

Folosind relațiile lui Euler și considerind numai partea reală, expresia (3.88) devine

$$(A + B) \left[\frac{\gamma}{2} \cos\left(\frac{\omega}{c_v}x\right) - \frac{\omega}{c_v} \sin\left(\frac{\omega}{c_v}x\right) \right] = 0 \quad (3.89)$$

seu

$$\frac{\gamma}{2} - \frac{\omega}{c_v} \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{c_v}x\right) = 0 \quad (3.90)$$

de unde

$$x_{\text{nod}} = \frac{c_v}{\omega} \operatorname{arctg}\left(\frac{\gamma c_v}{2\omega} + s\pi\right) \quad (3.91)$$

în care $s=0,1,2,3,\dots$, un număr întreg, ce permite stabilirea primului punct nodal la $s=0$.

Ținând seama de relațiile (3.83), (3.85) și (3.91) se obține:

$$x_{\text{nod}} = \frac{L}{n\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{n} \ln M + s\pi\right) \quad (3.92)$$

Poziția nodului de viteză în cazul coloanelor cilindrice este dată de relația

$$x_{\text{nod}} = \frac{L}{2n} \quad (3.93)$$

Pentru $n = 1$ și $L = \frac{\lambda}{2}$ se obține $x_{\text{nod}} = \frac{\lambda}{4}$.

În fig.3.11 se prezintă variația amplitudinii deplasării de-a lungul axei ansamblului transducer T, coloană cilindrică intermediară CI, concentrator ultrasonic CU. Pentru o funcționare eficientă, lungimea fiecărui element trebuie să corespundă condiției de rezonanță, fiind un multiplu de jumătăți de lungime de undă $\frac{\lambda}{2}$.

Se face observația că frecvența reală de rezonanță a trans-

ductorului cuplat mecanic cu mediul de lucru prin intermediul

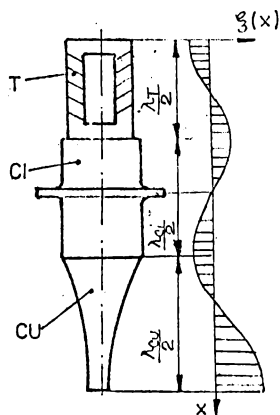


Fig.3.11

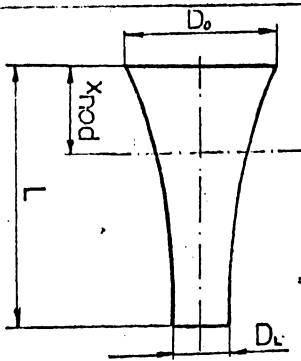
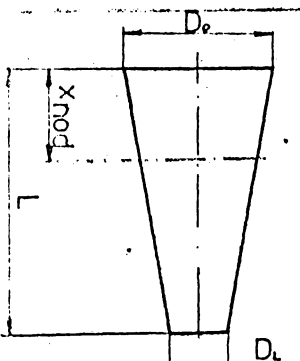
catenoidal, hiperbolic, cilindric în trepte, cilindric - exponențial. În tabelul 3.1 sînt prezentate relații de calcul, necesare la proiectarea concentratoarelor ultrasonice de tip exponențial, conic, cilindric cu două trepte și catenoidal (vezi și relațiile (3.94) - (3.111) [45, 55].

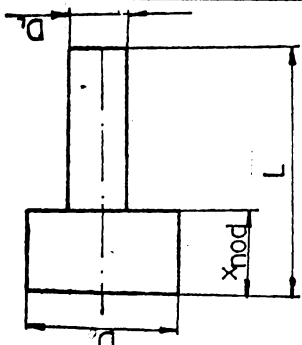
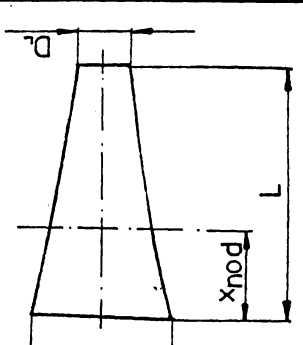
3.3. Elemente caracteristice ale filtrelor acustice avînd membrana filtrantă oscilantă într-un plan perpendicular pe direcția de curgere a filtratului.

În cazul undelor acustice folosite în diverse procese tehnologice pot apărea efecte neliniare care se dezvoltă în lichid, depînd de amplitudinea undei acustice și se numesc efecte de ordinul doi. Datorită acestor efecte se dezvoltă fenomene secundare care influențează într-un anumit sens procesele tehnologice care se desfășoară în câmpul acustic. În fig.3.12 se prezintă schema de legătură a efectelor de ordinul doi cu fenomenele însoțitoare [52].

Intensificarea procesului de filtrare prin acțiunea oscilațiilor acustice are în vedere îndepărtarea precipitatului de pe membrana filtrantă chiar în timpul operației de filtrare. La oscilarea mediului filtrant sînt posibile două regimuri de lucru: cu și fără formarea unui strat compact de fază solidă lângă mediul filtrant. Filtrele care lucrează în primul regim se numesc vibrofiltre, iar mediul filtrant oscilant acționează direct asu-

TABELUL 3.1. RELATII DE CALCUL PENTRU DIMENSIONAREA UIOR CONCENTRATORI ULTRASONICI

Nr.	TIPUL CONCENTRATORULUI	LEGEA DE VARIATIE A DIAMETRULUI	COEFICIENTUL DE AMPLIFICARE A AMPLITUDINII	LUNGIMEA CONCENTRATORULUI	COORDONATA PUNCTULUI NODAL
		a	d	e	f
1	EXPONENTIAL	 $D(x) = D_0 e^{-\frac{x}{c} x}; N = \frac{D_0}{D_1} > 1$ <p>rel.(3.75.)</p> $\frac{x}{2} = \frac{\ln N}{L} = \frac{\omega}{c} \cdot \frac{\ln N}{\sqrt{\pi^2 + (\ln N)^2}}$ <p>rel.(3.85.)</p>	$M = \frac{x}{3} \cdot \frac{2\pi x}{\omega} = \frac{D_0}{D_1} = N$ <p>rel.(3.82.)</p>	$L = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$ <p>rel.(3.86.)</p>	$x_{nod} = \frac{L}{\pi} \arctg \frac{\ln N}{\pi}$ <p>rel.(3.92.)</p>
2	CONIC	 $D(x) = D_0 (1 - \delta x); N = \frac{D_0}{D_1} > 1$ <p>rel.(3.94.)</p> $\delta = \frac{D_0 - D_1}{D_0 D_1}$ <p>rel.(3.95.)</p>	$M = \frac{x}{3} = N \cos(kl) + \frac{1-N}{kl} \sin(kl).$ <p>rel.(3.96.)</p>	$L = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{kl}{\pi}; k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ <p>rel.(3.97.)</p> <p>(kl) este solutia ecuatiei pentru conditia de rezonanță.</p> $\operatorname{tg}(kl) = \frac{kl}{1 + \frac{(kl)^2 \cdot N}{(1-N)^2}}$ <p>rel.(3.98.)</p>	$x_{nod} = \frac{1}{k} \arctg \frac{k}{\delta}$ <p>rel.(3.99.)</p>

a	b	c	d	e	f
3.	<p>CILINDRIC IN TREPTE</p> 	<p>$x \in [0, \frac{1}{2}] : D(x) = D_0$ $x \in [\frac{1}{2}, L] : D(x) = D_1$ $N = \frac{D_0}{D_1} > 1$</p>	<p>$M = \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^2 = N^2$ rel. (3.100.)</p>	<p>$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$ rel. (3.101.)</p>	<p>$x_{nod} = \frac{L}{2} = \frac{\lambda}{4}$ rel. (3.102.)</p>
4.	<p>CATENOIDAL</p> 	<p>$D(x) = D_0 \text{ch} \varepsilon(L-x)$ rel. (3.103.) $\varepsilon = \frac{1}{L} \text{argch} N$ rel. (3.104.) $N = \frac{D_0}{D_L} > 1$</p>	<p>$M = \frac{N}{\cos(k_V L)}$ rel. (3.105.) $k_V = \sqrt{k^2 - \varepsilon^2}$ rel. (3.106.) $k_V = \frac{\omega}{c_V}$ rel. (3.107.) $c_V = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon^2 c^2}{\omega^2}}}$ rel. (3.108.)</p>	<p>$L = \frac{\lambda}{2} \sqrt{(k_V L)^2 + \text{argch}^2 N}$ rel. (3.109.) ($k_V L$) este soluția ecuației $(k_V L) \text{tg}(k_V L) = \sqrt{N^2 - 1}$ $\text{argch} N$ rel. (3.110.)</p>	<p>$x_{nod} = \frac{1}{k_V} \text{arctg} \left(\frac{k_V}{\varepsilon} \text{cth} \varepsilon L \right)$ rel. (3.111.)</p>

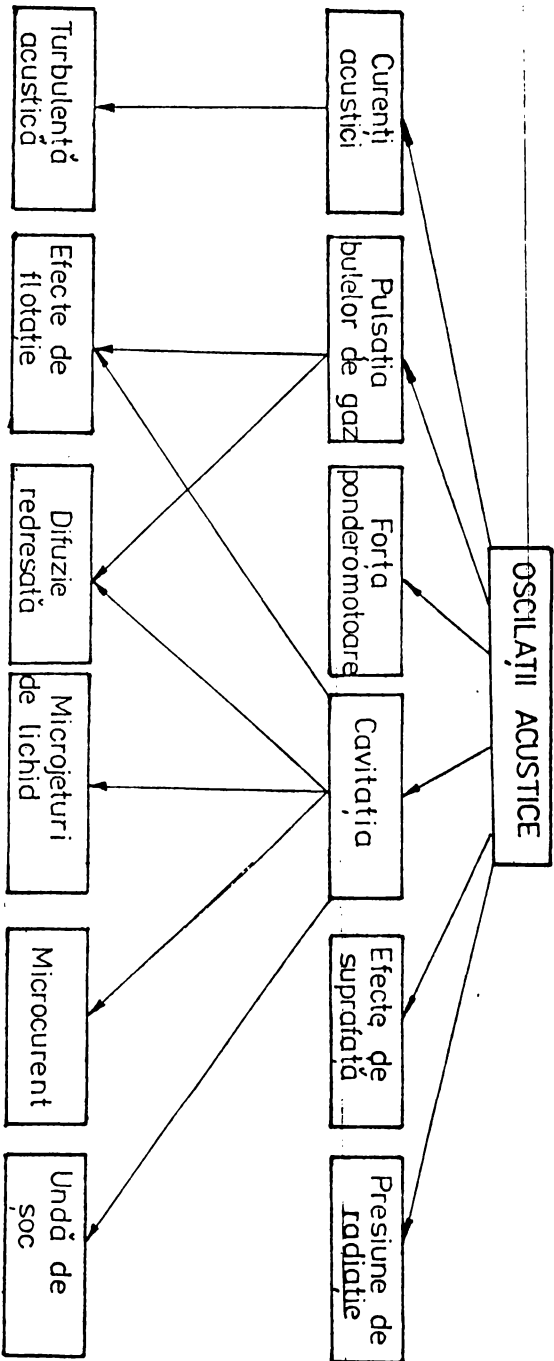


Fig. 3.12

pre precipitatului. In cazul celui de al doilea regim este vorba de filtre acustice, acțiunea mediului filtrant oscilant se transmite indirect precipitatului, prin mediul lichid. Pentru al doilea regim de lucru, se consideră interacțiunea lichidului conținând particule solide in suspensie, lichid care se mișcă orizontal cu membrana filtrantă care oscilează vertical.

Dacă oscilațiile mediului filtrant se caracterizează prin frecvență și amplitudine mică, curgera curenților de lichid spre mediul filtrant este laminară. Mișcarea lichidului in apropierea mediului filtrant este determinată de oscilațiile mediului filtrant și poate fi descrisă de ecuația lui Navier-Stokes, in formă vectorială, pentru cazul unui mediu necomprimibil, deci $\rho = \text{const.}$, $\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = 0$ și $\text{div. } \vec{w} = 0$.

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau} + (\vec{w} \cdot \nabla) \vec{w} = - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \vec{w} \quad (3.112)$$

in care w este viteza de mișcare a lichidului, τ - timpul, p - presiunea, ρ - densitatea lichidului, ν - coeficientul de vâscozitate cinematică a lichidului.

In ecuația (3.112), dedusă din ecuația generală a dinamicii

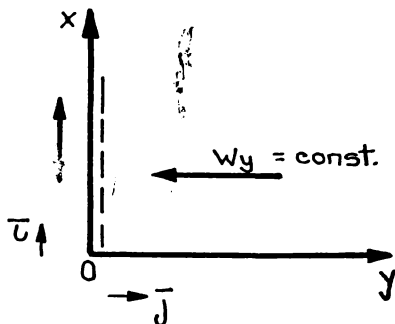


Fig. 3.13

fluidelor, s-au neglijat forțele gravitaționale. Mișcarea de bază a curenților de lichid este uniformă și are loc după axa y (fig. 3.13), deci $w_y = \text{const.}$ Datorită oscilațiilor mediului filtrant pe direcție perpendiculară pe direcția curenților de lichid, adică după axa Ox , lichidului i se imprimă o mișcare oscilatorie, caracterizată prin viteza w_x , a cărei amplitudine este funcție de distanța y , scăzând odată cu creșterea acesteia; de asemenea, este funcție și de timp. In acest caz, ecuația (3.112) devine

$$\frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \quad (3.113)$$

O condiție limită a ecuației (3.113) este condiția de aderență a lichidului la suprafața membranei, la $y=0$, care are forma

$$w_x(0, \tau) = A \cos \omega \tau \quad (3.114)$$

in care A este amplitudinea oscilației.

Soluția ecuației (3.113) este [47]

$$v_x(y, \tau) = A\omega \exp(-k_1 y) \cos(\omega\tau - \alpha y) \quad (3.115)$$

unde

$$k_1 = \frac{\sqrt{2}\omega}{(\sqrt{v_y^4 + 16})^2 \omega^2 - v_y^2)^{0,5}} + \frac{v_y}{2} \quad (3.116)$$

și

$$\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{2} \sqrt{v_y^4 + 16}^2 \omega^2 - v_y^2 \right]^{0,5} \quad (3.117)$$

Din câmpul de viteze obținut, se poate determina amplitudinea vitezei oscilației a lichidului la o distanță y de membrana filtrantă oscilantă.

Pentru cazul cînd se neglijează influența particulelor vecine, folosind ecuația de mișcare a particulelor solide aflate în curentul de lichid, pentru $1 < Re < 300$, se poate stabili expresia pentru determinarea deplasării relative, x_p , a particulelor solide în raport cu mediul lichid al suspensiei, în timp. Considerînd valorile cele mai probabile ale parametrilor de funcționare a filtrului se reprezintă graficul mișcării particulei solide în apropierea membranei filtrante oscilante, $x_p(y)$ (fig.3.14) [52].

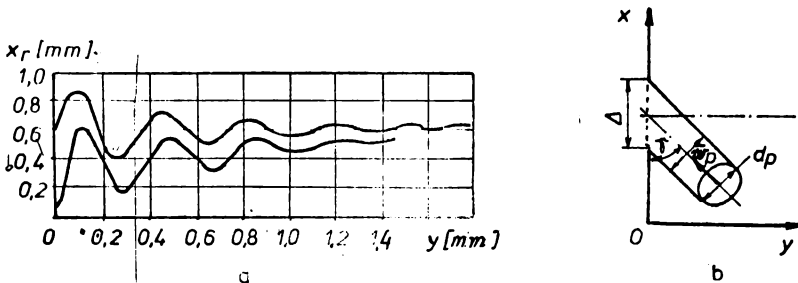


Fig.3.14

În fig.3.14,a se prezintă limitele traiectoriei de mișcare a unei particule din suspensie în apropierea membranei oscilante. În fig.3.14,b se redă schematic apropierea unei particule solide de membrana filtrantă oscilantă. Unghiul β dintre planul oscilațiilor membranei filtrante și direcția vectorului

viteșă a particulelor solide, \bar{w}_p , este

$$\gamma = \arctg \frac{w_{py}}{w_{px}} \quad (3.118)$$

Decrește $w_{py} = \text{const.}$, iar w_{px} se modifică în timp, unghiul γ va fi de asemenea funcție de timp. Particulele cu diametrul $d_p < d_a$ trec prin orificiile membranei filtrante, iar particulele cu dimensiuni mai mari se lovesc de membrana filtrantă, își schimbă direcția de mișcare și se îndepărtează de membrană.

Diametrul convențional d_a reprezintă dimensiunea aparentă a unui orificiu din membrana filtrantă și depinde de frecvența oscilațiilor membranei filtrante. Se determină cu relația

$$d_a = \Delta \sin \gamma = \Delta \frac{w_{py}}{\sqrt{w_{py}^2 + w_{px}^2}} \quad (3.119)$$

unde Δ este dimensiunea orificiului din membrana filtrantă. Diametrul convențional d_a corespunde diametrului maxim al particulelor solide care pot trece prin orificiile membranei filtrante.

Înlocuind în (3.119) valoarea w_{px} găsită din relația (3.115) pentru $y = \frac{a}{2}$, se obține expresia transcendentă care descrie modificarea diametrului maxim al particulelor care trec prin membrana filtrantă, în funcție de parametrii oscilațiilor

$$\cos \left(\omega t - \frac{1}{2} \alpha d_a \right) = \pm \frac{w_{py} \exp\left(\frac{1}{2} k_1 d_a\right)}{A \omega} \sqrt{\left(\frac{\Delta}{d_a}\right)^2 - 1} \quad (5.120)$$

Din analiza relației (5.120) rezultă că diametrul particulelor care trec prin orificiile mediului filtrant scade odată cu creșterea vitezei oscilației, apropiindu-se asimptotic de o mărime limită care este dependentă de dimensiunile orificiilor membranei filtrante, cit și de viteza suspensiei. La creșterea vitezei fluxului de suspensie, diametrul particulelor care trec prin membrana filtrantă crește și tinde spre dimensiunile orificiilor membranei filtrante.

Se determină timpul de trecere, τ_{trecere} , necesar unei particule pentru trecerea prin orificiul mediului filtrant cu dimensiunea aparentă d_a .

In intervalul $0 < \omega\tau < \Pi$, momentul inițial al începerii trecerii unei particule este

$$\tau_i' = \frac{1}{\omega} \left\{ \arccos \left[\frac{1}{\lambda\omega} W_{py} \exp\left(\frac{1}{2} k_1 d_a\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta}{d_a}\right)^2 - 1} \right] + \alpha \frac{d_a}{2} \right\} \quad (5.121)$$

In intervalul $\Pi < \omega\tau < 2\Pi$, momentul inițial al începerii trecerii este

$$\tau_i'' = \frac{1}{\omega} \left\{ \Pi - \arccos \left[\frac{1}{\lambda\omega} W_{py} \exp\left(\frac{1}{2} k_1 d_a\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta}{d_a}\right)^2 - 1} \right] + \alpha \frac{d_a}{2} \right\} \quad (5.122)$$

Momentul final al trecerii particulei prin membrana filtrantă, pentru cele două intervale este

$$\tau_f' = \frac{1}{\omega} \left\{ \Pi - \arccos \left[\frac{1}{\lambda\omega} W_{py} \exp\left(\frac{1}{2} k_1 d_a\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta}{d_a}\right)^2 - 1} \right] + \alpha \frac{d_a}{2} \right\} \quad (5.123)$$

respectiv

$$\tau_f'' = \frac{1}{\omega} \left\{ 2\Pi - \arccos \left[\frac{1}{\lambda\omega} W_{py} \exp\left(\frac{1}{2} k_1 d_a\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta}{d_a}\right)^2 - 1} \right] + \alpha \frac{d_a}{2} \right\} \quad (5.124)$$

Din relațiile (5.121), (5.122), (5.123), (5.124) se constată că durata trecerii particulei este egală în cele două intervale și are expresia

$$\begin{aligned} \tau_{trecere} = \tau_f' - \tau_i' = \tau_f'' - \tau_i'' = \frac{1}{\omega} \left\{ \Pi - 2 \arccos \left[\frac{1}{\lambda\omega} \right. \right. \\ \left. \left. \cdot W_{py} \exp\left(\frac{1}{2} k_1 d_a\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta}{d_a}\right)^2 - 1} \right] \right\} \end{aligned} \quad (5.125)$$

Probabilitatea trecerii particulelor, P_{Δ} , depinde atât de dimensiunea aparentă a orificiilor mediului filtrant, cât și de durata de trecere și se determină din relațiile următoare

$$P_{\Delta} = \frac{\omega\tau_{trecere}}{\Pi} \quad (5.126)$$

sau

$$P_{\Delta} = \frac{2}{\Pi} \arcsin \left[\frac{1}{\lambda\omega} W_{py} \exp\left(\frac{1}{2} k_1 d_a\right) \sqrt{\left(\frac{\Delta}{d_a}\right)^2 - 1} \right] \quad (5.127)$$

Probabilitatea trecerii unei particule prin orificiile membranei filtrante, în funcție de dimensiunea particulei d_p și de

raportul R dintre viteza fluxului de lichid și viteza oscilației a membranei filtrante, la dimensiune dată a orificiilor, $\Delta = 70 \mu\text{m}$, se prezintă în fig.3.15 a.

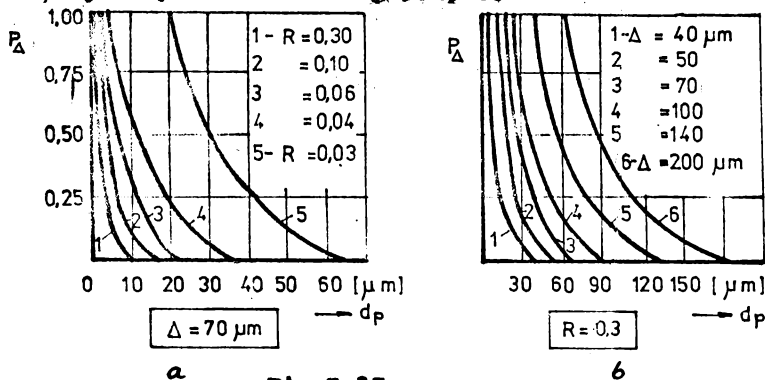


Fig.3.15

Probabilitatea trecerii unei particule prin membrana filtrantă în funcție de dimensiunea particulei și de dimensiunea orificiilor din membrana filtrantă, pentru raportul $R = 0,3$ (al vitezelor lichidului și al membranei filtrante), se prezintă în fig.3.15,b.

Probabilitatea trecerii particulelor solide din suspensie crește pentru valori mai mari ale raportului vitezelor și ale orificiilor din membrana filtrantă.

Definitivarea soluției funcționale a procesului de filtrare într-un câmp acustic se face prin tatonări experimentale pentru identificarea soluției optime, ținând seama de caracteristicile suspensiei.

3.4. Posibilitatea influențării umidității capilare a precipitatului prin intervenția oscilațiilor acustice.

Umiditatea precipitatului corespunde lichidului prezent în porii săi sub formă de umiditate peliculară capilară, legată de pori și nălegată de pori. Depășirea lichidului reținut în porii precipitatului are loc sub acțiunea forțelor capilare și a diferenței de presiune.

Sub acțiunea ultrasunetelor are loc modificarea nivelului lichidului în capilare, efect cunoscut sub numele de efect ultrasonic capilar. Pentru explicarea efectului ultrasonic capilar s-au efectuat sistematice măsurători experimentale care au arătat că, modificând raporturile dintre rezistențele hidrodinamice în orificiul capilare la intrarea și respectiv la ie-

girea lichidului, se poate dirija sensul deplasării lichidului în capilară, adică efectul ultrasonic capilar se bazează pe asimetria coeficientului de penetrabilitate a unei capilare la curgerea lichidului prin ea. Se pot obține relații de calcul care permit determinarea înălțimii, a sensului și a vitezei de penetrație a lichidului în capilară [29,33].

În fig.3.16, a,b,c,d,e,f se fac referiri la experimentele

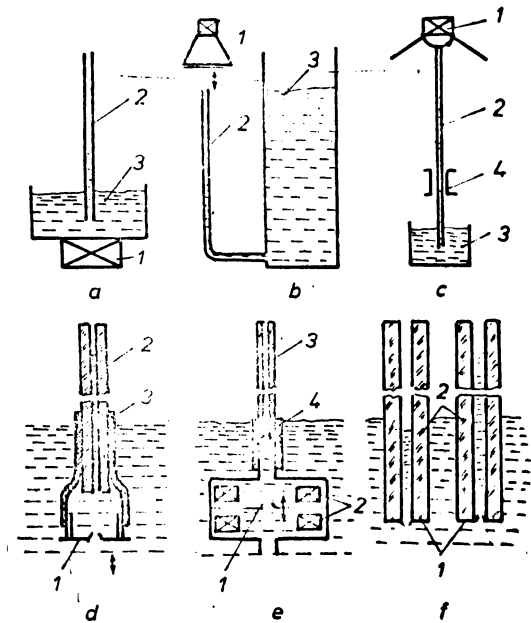


Fig.3.16

efectuate pentru a evidenția influența acțiunii ultrasunetelor asupra nivelului lichidelor în capilare, ținând seama și de asimetria rezistenței la curgerea lichidului în sau din capilară, utilizând tuburi capilare din sticlă și polietilenă, cu diametre $d = 0,3 - 5$ mm, introduse în recipientul 3 umplut cu apă, s-a constatat că se stabilește o anumită înălțime de ridicare capilară care, sub acțiunea undelor ultrasonice create cu ajutorul transducerului magnetostrictiv 1, poate fi modificată în sensul ridicării suplimentare a lichidului în capilară ($h > 0$), fig.3.16,a, dacă frecvența oscilațiilor $f = 20$ kHz și intensitatea acustică $I = 3$ W/cm², când se asigură un regim de cavitație în mediul lichid în cazul folosirii unor oscilații de frecvență mai redusă, $f = 0,1$ kHz, și modificând totodată amplitudinea A a oscilațiilor, s-a constatat că sînt două situații ale variației nivelului lichidului în capilară în sensul unei ridicări suplimentare la amplitudini mici, respectiv o coborîre a nivelului, față de înălțimea de ridicare capilară în absența ultrasunetelor, la amplitudini mai mari, $A > 0,5$ mm. Deoarece la $A > 0,5$ mm, s-a identificat prezența microbulelor de aer în lichidul din recipient și în apropierea cri-

efectuate pentru a evidenția influența acțiunii ultrasunetelor asupra nivelului lichidelor în capilare, ținând seama și de asimetria rezistenței la curgerea lichidului în sau din capilară, utilizând tuburi capilare din sticlă și polietilenă, cu diametre $d = 0,3 - 5$ mm, introduse în recipientul 3 umplut cu apă, s-a constatat că se stabilește o anumită înălțime de ridicare capilară

fieului capilarei, scăderea nivelului lichidului în capilară se corelează cu micșorarea densității lichidului cu aer din recipient.

Folosind o sirenă pneumatică 1, la care frecvența $f = 1 \text{ kHz}$, $I = 10^{-3} \text{ W/cm}^2$, s-a analizat influența ultrasunetelor asupra presiunii gazului din capilara 2 (fig.3.16,b). Tubul capilarei cu diametrul $d = 3 \text{ mm}$ comunică cu recipientul 3, umplut cu apă, printr-un furtun de cauciuc. Se constată, ca o consecință a influenței ultrasunetelor, scăderea nivelului lichidului în capilară cu 80 - 90 mm.

În fig.3.16,c se face referință la aplicarea mișcării oscilatorii asupra tubului capilar 2, trecut prin ghidajul 4, care este legat mecanic rigid cu un vibrator electrodinamic 1. Creșterea suplimentară a nivelului lichidului în capilară, h , s-a constatat că este influențată de f și A . Totodată valorile creșterii h depind și de forma orificiului de intrare în capilară. În fig.3.17 se prezintă dependența înălțimii de ridicare suplimentară, h , în funcție de viteză oscilatorie, $f \cdot A$, pentru o capilară cilindrică avind $d = 0,4 \text{ mm}$ și $l = 300 \text{ mm}$ (curba 1), respectiv pentru aceeași capilară, dar cu o îngustare treptată la capătul inferior pînă la $d = 0,2 \text{ mm}$ pe o lungime de 15 mm (curba 2). Din fig.3.17 rezultă concluzia că prin îngustarea conică a canalului capilarei s-a realizat o amplificare de 6-10 ori a valorii lui h . Se menționează că, în acest caz, experiențele s-au condus în absența cavității.

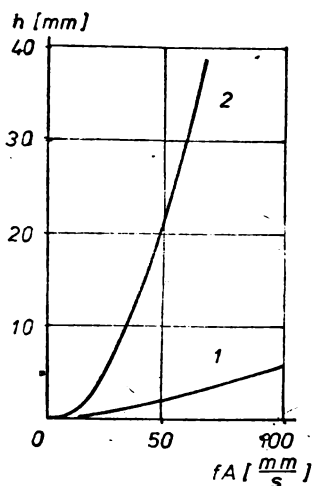


Fig.3.17

În fig.3.16,d, placa subțire de cupru 1, avind grosimea 0,1 mm, prezintă un orificiu cu diametrul de 0,3 mm, avind o bordură conică. Placa a fost atagată unei camere cilindrice cu diametrul de 3 mm și înălțimea 10 mm, legată de capilara 2, prin

tubul de cauciuc 3. Experimentele s-au realizat la $f=80$ kHz și $I = 3$ W/cm², asigurându-se în lichid regimul de cavitație. S-a observat ridicarea suplimentară a nivelului lichidului în capilară, $h > 0$, dacă bordura conică a fost îndreptată cu partea mai largă în jos și respectiv coborîrea față de nivelul capilar natural, $h < 0$, dacă bordura conică a fost orientată invers.

Alte încercări experimentale, fig.3.16,e cu introducerea oscilatorie asupra plăcii 1 avînd un orificiu tronconic cu înălțimea de 1 mm și diametrele la capete 0,5 mm, respectiv 1 mm, prin intermediul transductoarelor 2. Capilara 3 cu $d=0,4$ mm, este legată prin tubul de cauciuc 4 de capsula dispozitivului. Dispozitivul a fost încercat la frecvența de oscilație a plăcii $f = 0,84$ kHz și 1,25 kHz, rezultînd o creștere suplimentară, h , de 75 mm, respectiv 250 mm. În cazul așezării plăcii 1 cu orificiul tronconic avînd baza mare spre capilară, deci invers față de situația precedentă, la aceleași frecvențe de oscilație, s-a observat coborîrea nivelului lichidului din capilară, $h < 0$. În aceste experiențe, capilara a servit numai pentru măsurarea căderii de presiune care apare suplimentar în orificiul din placa 1 datorită mișcării ei oscilatorii.

În cazul fig.3.16,f se analizează poziția plăcii 1 cu orificiul tronconic, placă ce este lipită de baza capilarelor 2, puse în mișcare cu ajutorul unui vibrator electrodinamic. Dacă îngustarea orificiului tronconic din placa 1 a fost îndreptată în interiorul canalului capilarei, ridicarea suplimentară a nivelului, $h > 0$, a depășit de circa 2 ori valoarea nivelului din capilară fără placa de bază. Dacă orificiul tronconic a fost așezat cu îngustarea în exterior, s-a constatat coborîrea accentuată a nivelului în capilară, $h < 0$.

Din analiza experiențelor prezentate în fig.3.16,a-f, rezultă că apariția diferenței de presiune este legată de dependența rezistenței hidraulice de direcția de curgere a lichidului prin orificiul tronconic. La viteze oscilatorii foarte mici, curgerea este laminară și efectul asimetriei este neglijabil, $h = 0$. Dacă curgerea nu mai este laminară, rezistența hidraulică a canalului care se îngustează este mai mică decît atunci cînd se lărgește. Rolul cavitației în experiențele analizate constă în intensificarea asimetriei rezistenței hidraulice. Prin egalarea corespunzătoare a geometriei orificiului de intrare în capilară există

posibilitatea dirijării mărimii și sensului variației nivelului lichidului în capilară. Mărimea și sensul variației nivelului lichidului în capilară datorită influenței ultrasunetelor se pot calcula analitic în funcție de parametrii mișcării oscilatorii.

Se consideră că debitul de lichid în capilară este proporțional cu diferența de presiune la orificiile capilarei și corespunde curgerii viscoase a lichidului, forțele de inerție fiind neglijabile, ceea ce nu contrazice legea lui Poiseuille și legea lui Darcy pentru un mediu statistic isotrop. Diferența de presiune la orificiile capilarei este creată de presiunea $\Delta p \cdot \sin \omega \tau$, presiune creată în lichid de unda acustică plană și de presiunea coloanei de lichid din capilară. Coeficientul de proporționalitate este mărimea, a cărei componentă variabilă $\Delta k_2 \cdot \sin \omega \tau$ coincide prin fază cu faza undei acustice. Astfel, ecuația care descrie variația coloanei de lichid, h , în capilară are forma [29]

$$S \frac{dh}{d\tau} = \frac{1}{\eta} (k_2 + \Delta k_2 \cdot \sin \omega \tau) (\Delta p \cdot \sin \omega \tau - \rho g h) \quad (3.128)$$

în care S este aria secțiunii transversale a capilarei; η și ρ viscositatea dinamică și densitatea lichidului; Δp și ω amplitudinea și pulsația undei acustice, τ - timpul; g - accelerația gravitațională.

Soluția generală a ecuației (3.128) care satisface condiția inițială $h(0) = 0$, se prezintă sub forma:

$$\begin{aligned} h(\tau) = & L \frac{\Delta p}{\rho g} \exp \left[-L \left(\tau - \frac{\Delta k_2}{k_2} \frac{\cos \omega \tau}{\omega} \right) \right] \cdot \\ & \cdot \int_0^\tau \exp \left[L \left(\xi - \frac{\Delta k_2}{k_2} \frac{\cos \omega \xi}{\omega} \right) \right] \cdot \\ & \cdot \left(1 + \frac{\Delta k_2}{k_2} \sin \omega \xi \right) \cdot \sin \omega \xi \, d\xi \end{aligned} \quad (3.129)$$

în care s-a introdus notația $L = \frac{k_2 \rho g}{S \cdot \eta}$.

În continuare se examinează posibilitatea existenței unui nivel ovasistationar al lichidului în capilară. Pentru

aceasta se găsește $\lim_{n \rightarrow \infty} h(\tau_n)$, unde $\tau_n = (\frac{2\pi}{\omega})_n$, $n=1,2,3,\dots$

Înlocuind integralele din formula (3.129) pe intervalul $[0, (2\pi/\omega)_n]$ prin suma integralelor pe intervalele parțiale $[(2\pi/\omega)(i-1), (2\pi/\omega)i]$ ($i=1,2,\dots,n$) se obține

$$\begin{aligned}
 h(\tau_n) &= L \frac{\Delta p}{\rho g} \exp \left[-L \left(\frac{2\pi}{\omega} \right)_n - \frac{\Delta k_2}{k_2} \cdot \frac{1}{\omega} \right] \cdot \\
 &\cdot \sum_{i=1}^n \int_{\frac{2\pi(i-1)}{\omega}}^{\frac{2\pi i}{\omega}} \exp \left[L \left(\xi - \frac{\Delta k_2}{k_2} \cdot \frac{\cos \omega \xi}{\xi} \right) \right] \left(1 + \frac{\Delta k_2}{k_2} \sin \omega \xi \right) \cdot \\
 &\cdot \sin \omega \xi \, d\xi \quad (3.130)
 \end{aligned}$$

Făcînd schimbarea de variabilă

$$\xi = (2\pi/\omega)(i-1) + \mu \quad (3.131)$$

formula (3.130) poate fi scrisă sub forma

$$\begin{aligned}
 h(\tau_n) &= L \frac{\Delta p}{\rho g} \exp \left[-L \left(\frac{2\pi}{\omega} \right)_n - \frac{\Delta k_2}{k_2} \cdot \frac{1}{\omega} \right] \cdot \\
 &\cdot \sum_{i=1}^n \exp L \frac{2\pi}{\omega} (i-1) \int_0^{2\pi/\omega} \exp \left[L \left(\mu - \frac{\Delta k_2}{k_2} \cdot \frac{\cos \omega \mu}{\omega} \right) \right] \cdot \\
 &\cdot \left(1 + \frac{\Delta k_2}{k_2} \sin \omega \mu \right) \sin \omega \mu \, d\mu \quad (3.132)
 \end{aligned}$$

Admițînd în ultima integrală $\omega \mu = \tau^*$ și considerînd că suma în formula (3.132) este suma a n membri ai progresiei geometrice cu rația $q = \exp L(2\pi/\omega)$, relația (3.132) devine

$$\begin{aligned}
 h(\tau_n) &= L \frac{\Delta p}{\rho g} \exp \left(L \frac{\Delta k_2}{k_2} \cdot \frac{1}{\omega} \right) \frac{1 - \exp(-L \frac{2\pi}{\omega})_n}{\exp(L \frac{2\pi}{\omega}) - 1} \cdot \\
 &\cdot J \left(\omega, \frac{\Delta k_2}{k_2}, L \right) \quad (3.133)
 \end{aligned}$$

unde

$$\begin{aligned}
 J \left(\omega, \frac{\Delta k_2}{k_2}, L \right) &= \frac{1}{\omega} \int_0^{2\pi} \exp \left[L \left(\frac{\tau^*}{\omega} - \frac{\Delta k_2}{k_2} \cdot \frac{\cos \tau^*}{\omega} \right) \right] \left(1 + \frac{\Delta k_2}{k_2} \sin \tau^* \right) \sin \tau^* \, d\tau^* \\
 &\quad (3.134)
 \end{aligned}$$

Din relațiile (3.133) și (3.134) rezultă

$$h(\tau_n) = L \frac{\Delta p}{\rho g} \cdot \frac{\exp(L \frac{\Delta k_2}{k_2} \cdot \frac{1}{\omega})}{\exp(L \frac{2\pi}{\omega}) - 1} \cdot J(\omega, \frac{\Delta k_2}{k_2}, L) \quad (3.135)$$

ceea ce reprezintă nivelul cvasistacionar al lichidului în capilară, care este dependent de frecvența undei acustice. Trecînd la limită partea dreaptă a relației (3.135), $\omega \rightarrow \infty$, se ajunge la următoarea expresie pentru modificarea nivelului lichidului în capilare sub acțiunea ultrasunetelor

$$\lim_{\tau, \omega \rightarrow \infty} h(\tau_n) = \frac{\Delta p}{2 \rho g} \cdot \frac{\Delta k_2}{k_2} \quad (3.136)$$

Din relația (3.136) rezultă că efectul ultrasonic capilar observat în medii lichide și gazoase este condiționat de asimetria coeficientului de proporționalitate din relația (3.128) în diferite sensuri de curgere ale lichidului în capilare. În legea lui Darcy, acest coeficient se numește coeficient de permeabilitate.

Dacă $\Delta k_2 > 0$, aceasta înseamnă că permeabilitatea la intrarea lichidului în capilară este mai mare decît la ieșirea lichidului din capilară; atunci $h > 0$. În caz contrar, $h < 0$ și se observă scăderea nivelului lichidului în capilară, care este mai redus decît nivelul lichidului ^{în} recipient.

În experimentările prezentate anterior s-a realizat

$\Delta p \gg \rho g h$. Din această cauză se poate considera că lichidul intră (urcă) în capilară cînd $\sin \omega \tau > 0$ și respectiv lichidul iese (se scurge) din capilară cînd $\sin \omega \tau < 0$.

Astfel, valoarea și semnul lui h , modificarea nivelului lichidului în capilară datorită ultrasunetelor, sînt determinate de un singur parametru al undei acustice, și anume Δp , de densitatea lichidului ρ și de geometria capilarei exprimată prin

$$\frac{\Delta k_2}{k_2}. \text{ Considerînd } \frac{\Delta k_2}{k_2} = 0,1, \Delta p = 10^5 \text{ N/m}^2 \text{ și } \rho = 10^3 \text{ kg/m}^3,$$

se obține $h = 0,5$ m, ceea ce s-a verificat experimental.

Relația (3.133) permite calcularea timpului de pătrundere a lichidului în capilară prin expresia de formă

$$\frac{h(\tau_n)}{h(\infty)} = 1 - \exp(-L \tau_n) \quad (3.137)$$

Considerind $L = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ și $\frac{h(\tau_n)}{h(\infty)} = 0,5$ se obține $\tau_n \approx 70 \text{ s}$, ceea ce înseamnă că, după acest timp, lichidul umple jumătate din volumul cvasistacionar al capilarului.

Influența oscilațiilor asupra efectului capilar se manifestă începând de la frecvențe $f > 10^2 \text{ Hz}$. În domeniul frecvențelor joase sînt necesare radiatoare de putere mai mare pentru emiterarea undelor acustice care să permită observarea efectului amintit.

4. CONTRIBUTII PRIVIND DIMENSIONAREA SI REALIZAREA STANDULUI DE LABORATOR

4.1. Elemente ale soluției constructive ale utilajului de filtrare acustică.

La utilajele de filtrare în câmp ultrasonic, problemele complexe de natură electromecanică care trebuie rezolvate sînt: a) identificarea și controlul frecvenței de rezonanță a blocului oscilator; b) asigurarea unui coeficient corespunzător de amplificare al concentratorului acustic; c) stabilirea prin calcul, cu confirmare experimentală, a poziției planului nodal la nivelul căruia blocul oscilator se fixează în corpul filtrului pentru a elimina pierderile de energie prin energia transferată acestuia; d) folosirea unor transductoare la care randamentul total electroacustic să fie maxim. Numai prin asigurarea acestor patru condiții energia suplimentară introdusă prin câmpul ultrasonic în procesul de filtrare devine neglijabilă și deci se realizează un proces de înaltă eficiență.

Standul de laborator realizat în cadrul laboratorului de Fenomene de transfer și utilaje în industrie chimică de la Facultatea de Tehnologie Chimică din Timișoara, prezentat în fig.4.1, se compune din următoarele elemente principale: rezervorul deschis (5) cu suspensia de filtrat, prevăzut cu agitatorul mecanic (1), filtrul acustic (7), vasul gradat de colectare a filtratului (11), generatorul de ultrasunete (12), frecvențometrul electronic (13), osciloscopul (14) și vacuumetrul (15) [66,67,68].

Filtrul a fost executat în două variante, prezentate în fig.4.2, respectiv 4.3, 4.4 și ambele avînd corpul cilindric din oțel, cu diametrul interior 100 mm (fig.4.2), fixat prin intermediul celierului (8) de un stativ, respectiv cu corpul cilindric din sticlă, cu diametrul interior 90 mm, care se fixează pe stativul (18), cu posibilitatea de rotire. Suspensia se introduce în utilaj prin racordul (9) situat sub planul membranei filtrante care este fixată între flanșele (16) ale corpului cilindric al filtrului metalic (fig.4.2), respectiv între colierele metalice (19) ale filtrului de sticlă (fig.4.3). Filtratul

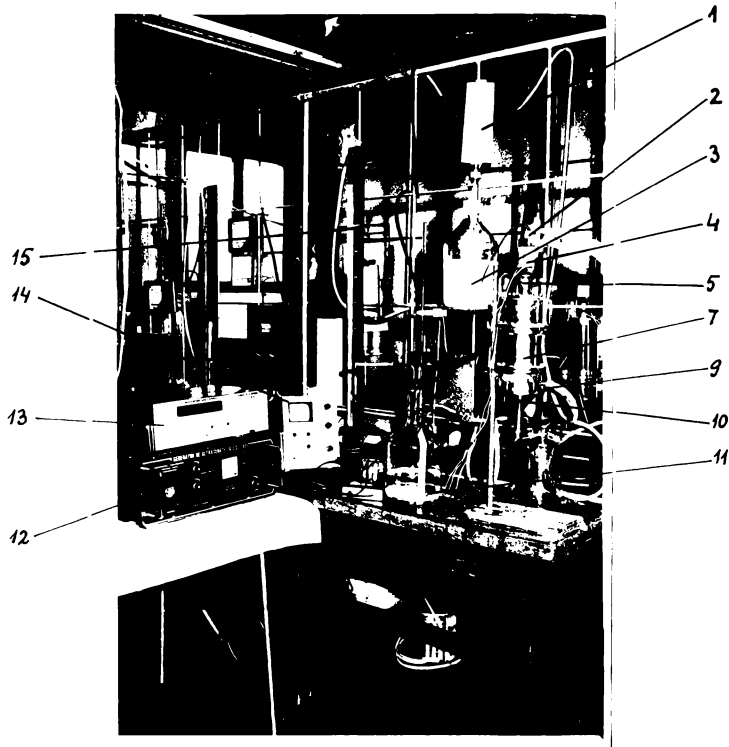


Fig. 4.1

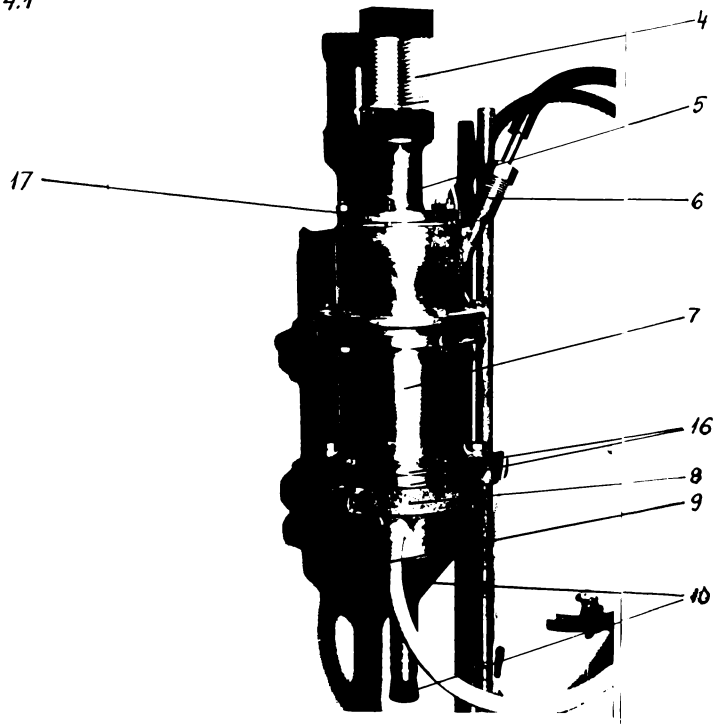


Fig. 4.2

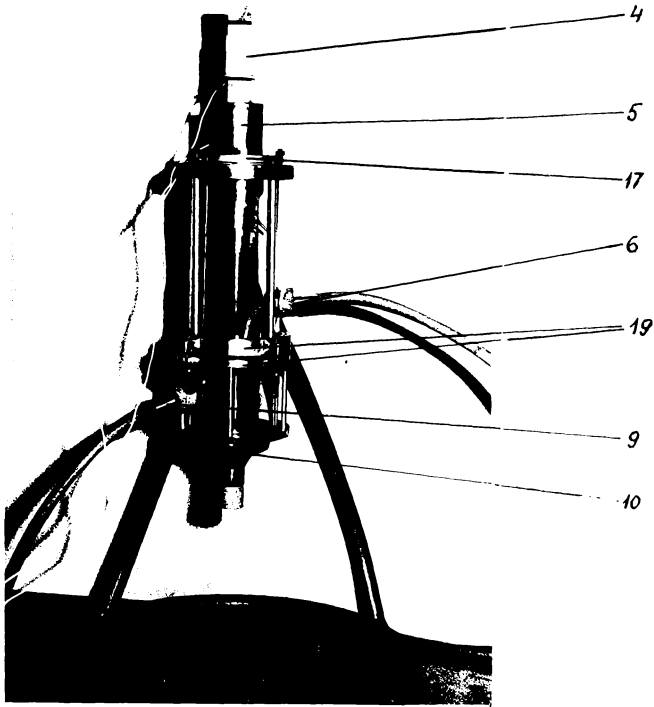


Fig. 4.3

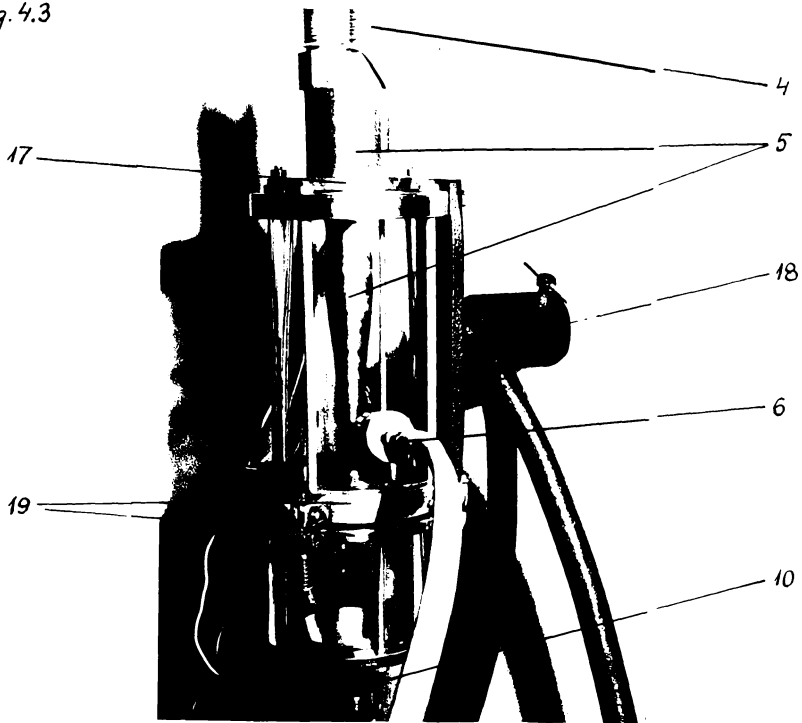


Fig. 4.4

se evacuează prin recordul (6). Rezervorul de colectare a filtratului este legat prin intermediul unui vas tampon de volum mare la o pompă de vid ; diferența de presiune dintre rezervorul cu suspensie (3) și cel de colectare a filtratului (11) se măsoară cu vacuumetrul cu mercur (15). Faza solidă din suspensie se acumulează în rezervorul (10), de unde se evacuează periodic printr-un record așezat în partea inferioară.

Coaxial cu axa de simetrie a corpului cilindric al filtrului este subansamblul (fig.4.5, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4) transductor magnetostrictiv (4), concentrator acustic (5), membrană filtrantă (20) din sită metalică așezată între două grătare metalice (21) care rigidizează membrana filtrantă față de virful concentratorului. Concentratorul (5) se fixează mecanic în partea superioară a filtrului prin intermediul umărului (22) (fig.4.5) prin stringerea guruburilor capacului (17) (fig.4.2, 4.4). Concentratorul, confecționat din OLC 45, face legătura mecanică între transductorul magnetostrictiv și membrana filtrantă. Transductorul magnetostrictiv (4) (fig.4.5) realizat din miez de ferită, fabricat la I.C.E. București [80], are pe cele două coloane, spirele înfășurării de excitație care se alimentează de la generatorul de ultrasunete (12) (fig.4.1) tip G.U.S.-200, fabricat la Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara [81]. Concentratorul este de formă exponențială, iar umărul de fixare (22) se află într-un nod al undei, pentru ca energia de oscilație să nu se transfere corpului cilindric al utilajului. Membrana filtrantă metalică este din sită confecționată din sîrmă de cupru, avînd 15.900 ochiuri/cm², diametrul firului 39 μm, iar dimensiunea orificiului 27 μm. Membrana filtrantă este fixată rigid de virful concentratorului ultrasonice prin intermediul grătarelor metalice așezate de o parte și de alta a sitei, iar în raport cu corpul cilindric al utilajului se fixează între flanșele (16) (fig.4.2), respectiv colierele (19) (fig.4.4), prin intermediul a două garnituri de cauciuc. Grătarele metalice (fig.4.6), confecționate din tablă de oțel de 1 mm grosime, au diametrul de 96 mm, avînd 280 orificii cu diametrul 3,5 mm.

În fig.4.7 se evidențiază soluția pentru evacuarea prin aspirație a filtratului, distanța de la planul membranei la orificiul de aspirație fiind de cea.3 mm. Totodată se evidențiază soluția de îmbinare demontabilă cu clemele (23) a celor două părți ale corpului cilindric al filtrului, asigurînd accesul la membrana filtrantă.

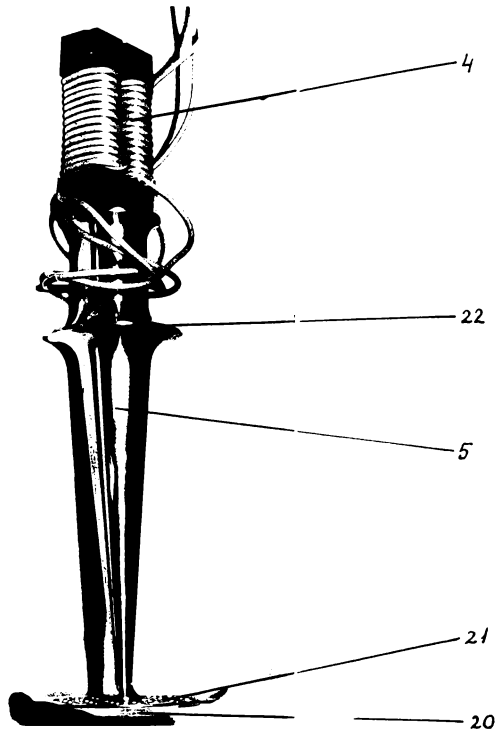


Fig. 4.5

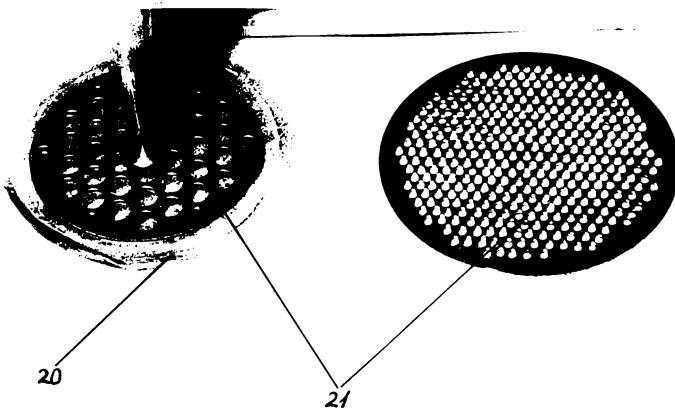


Fig. 4.6

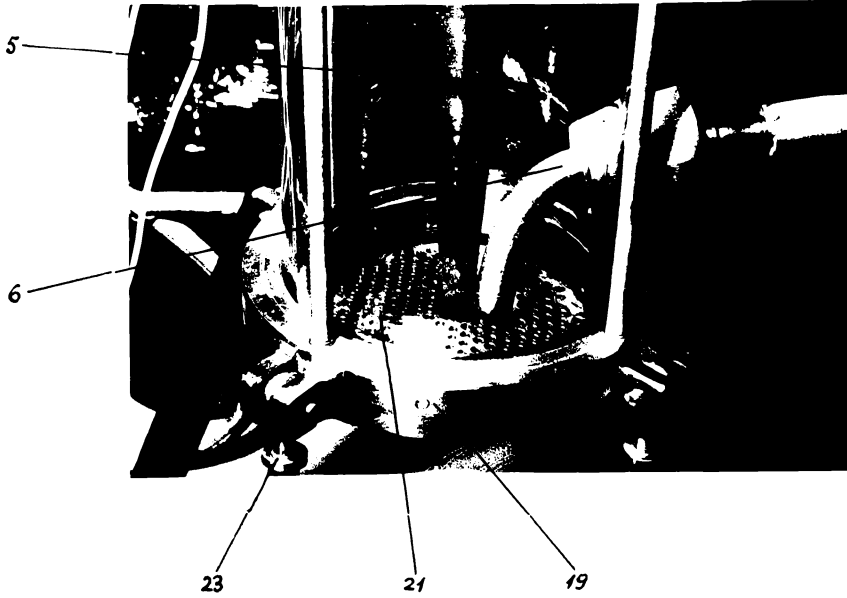


Fig. 4.7

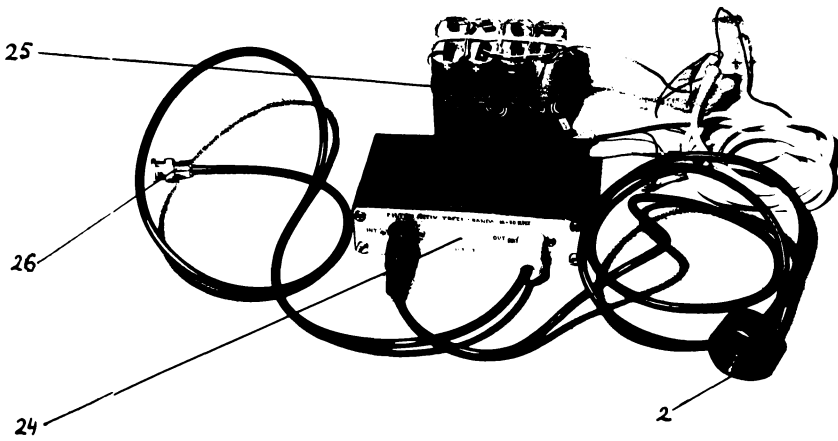


Fig. 4.8

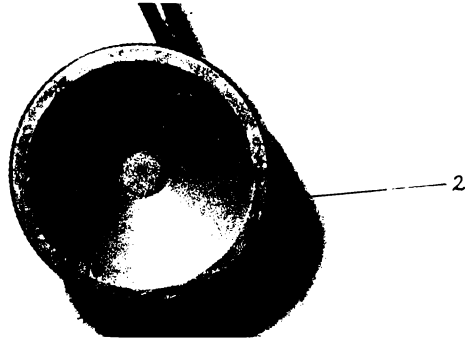


Fig. 4.9

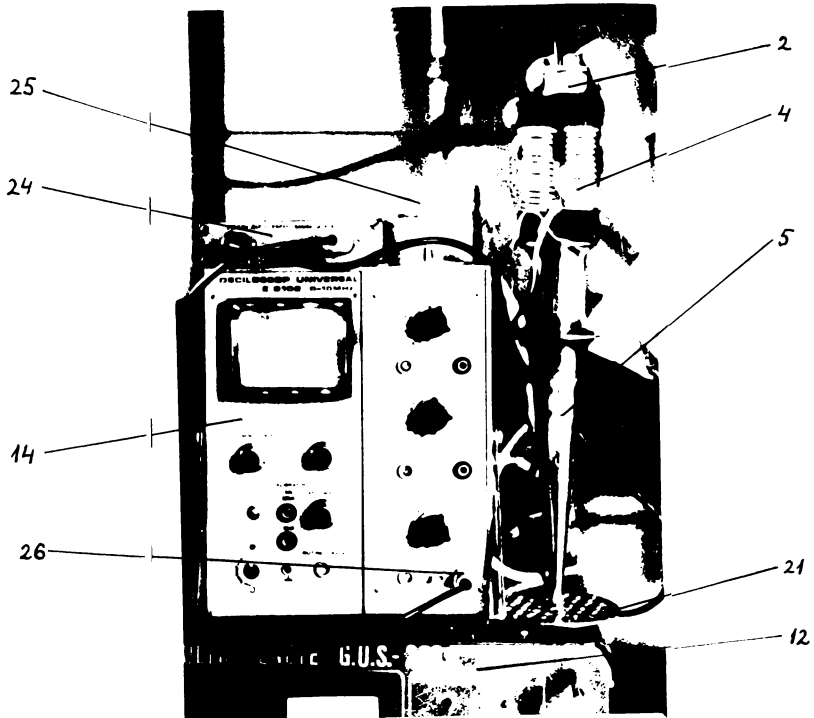


Fig. 4.10

Pentru identificarea regimului de rezonanță electromecanică, necesar în vederea funcționării instalației de filtrare la parametri nominali, s-a utilizat un traductor electronic cu cristal piezoelectric, prezentat în fig.4.8 [46]. Părțile componente ale traductorului sunt capsula metalică (3) (fig.4.9) cu cristal piezoelectric și filtrul electric activ tip trece-bandă (24) pentru gama de frecvențe 18-30 kHz. Alimentarea filtrului electric se face de la o sursă de curent continuu (25) de ± 9 V, creată cu ajutorul a 4 baterii tip 5 R12, fabricate la Întreprinderea Electrebanat Timișoara. Capsula (2) se așază cu mina pe jugul miezului transductorului (fig.4.1, 4.10), semnalul mecanic variabil generat de miezul transductorului este convertit într-un semnal electric prin intermediul cristalului piezoelectric conținut în capsulă. Acest semnal electric se introduce în filtrul electric tip trece-bandă, de la care se aduce prin intermediul mufei (26) la osciloscopul electronic (12) tip E O102, 0-10 MHz. Forma semnalului electric care apare pe ecranul osciloscopului este sinusoidală și se poate citi amplitudinea și perioada. Regimul de rezonanță necesar se identifică pentru semnalul de amplitudine maximă și totodată în acest caz, măsurându-se perioada, se calculează frecvența de rezonanță a sistemului electromecanic oscilator. Această frecvență se poate controla direct cu ajutorul frecvențimetrului electronic (13) (fig.4.1), tip Numărător universal E-0202-A. Regimul de rezonanță trebuie controlat și menținut pe durata de funcționare a utilajului.

4.2. Dimensionarea transductorului magnetostriktiv și a concentratorului ultrasonic folosit. Program de calcul.

A. Transductorul magnetostriktiv se dimensionează pe baza elementelor prezentate în paragraful 3.2.2. În fig.3.9 sînt prezentate geometria și dimensiunile în mm ale unui tip de transductor magnetostriktiv din miez de ferită utilizat în cadrul standului de laborator realizat.

Pentru miezul de ferită considerat, cu notațiile din fig. 3.8 se dau următoarele caracteristici: $a=13$ mm; $b=55$ mm; $g=16,5$ mm; $t=25$ mm; $h=61$ mm; $d=22$ mm; $l=105$ mm; $S_{col}=13 \times 25=325$ mm²; $S_p=55 \times 35=1575$ mm²; $\rho=5200$ kg/m³; masa transductorului 0,52 kg; modulul lui Young $E=1,745 \times 10^{11}$ N/m².

Prin calcul, ținînd seama de relațiile (3.5b) și (3.59) se obțin: $\alpha=0,3234$; $\beta=0,4484$; $q=0,4727$; $c=\sqrt{\frac{E}{\rho}}=5790$ m/s.

Prin aplicarea relațiilor (3.60) și (3.61) se determină frecvența de rezonanță a miezului $f_0 = 21,31$ kHz. Cunoașterea acestei mărimi este necesară pentru a folosi rațional miezul în operația de filtrare, în corelare cu posibilitățile de reglaj oferite de generatorul electric de înaltă frecvență. Sursele electrice de înaltă frecvență folosite în cadrul experimentărilor permite obținerea unor tensiuni și frecvențe reglabile în domeniile $U = 15-20$ V, respectiv $f = 16-25$ kHz, iar puterea activă care poate fi debitată pe un transductor de ferită este maxim 100 W [81].

Prin aplicarea relației (3.62) se determină numărul de spire N_0 ale înfășurării de excitație de pe o coloană a miezului. Admițând pentru frecvența și tensiunea de lucru valorile $f = 20$ kHz și $U = 20$ V, iar pentru inducția magnetică din miezul transductorului de ferită valoarea $B = 0,025$ T, cu secțiunea coloanei $S_{col} = 3,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, se obține pentru numărul de spire valoarea $N_0 = 15$ spire. Valoarea efectivă a curentului cu care s-a alimentat înfășurarea de excitație a fost 4 A.

B. Concentratorul ultrasonic utilizat este cu secțiune transversală variabilă. Pe baza elementelor prezentate în paragraful 3.2.3. s-a dimensionat un concentrator de formă exponențială confecționat din OLC 45 la care variația secțiunii transversale este dată de relația (3.75). S-a ales un profil exponențial deoarece asigură factorul de amplificare necesar, în condițiile unei mase mai reduse a concentratorului în raport cu varianta conică. Masa concentratorului împreună cu masa transductorului intervin în determinarea frecvenței de rezonanță a subsistemului transductor-concentrator, frecvență care scade odată cu creșterea masei. În cazul funcționării filtrului experimentat, frecvența de rezonanță s-a identificat la valoarea de 19,5 kHz, măsurată cu frecvențimetrul electronic și indirect cu osciloscopul electronic.

Deoarece secțiunea transversală a concentratorului de formă exponențială este circulară, variația diametrului secțiunii este precisată prin relația (3.75). Utilizând relațiile (3.75), (3.82), (3.85), (3.86) și (3.102), prezentate în tabelul 3.1, se determină legea de variație a diametrului concentratorului exponențial, $D(x)$, coeficientul de amplificare a

amplitudinii oscilațiilor, M , lungimea concentratorului, L , și coordonata punctului nodal, x_{nod} , în dreptul căruia viteza de oscilație a particulelor este nulă, și, ca urmare, se determină poziția umărului de fixare a concentratorului pe corpul cilindric al filtrului [68, 71].

Concentratorul acustic prezintă o parte cilindrică, cu diametrul $D_0 = 40$ mm, între transductorul magnetostrictiv și umărul de fixare, lungimea acestui trenson corespunzând coordonatei punctului nodal, $x_{\text{nod}} = 65$ mm. În continuare, spre membrana filtrantă, concentratorul ultrasonic are o parte cilindrică cu diametrul $D_0 = 40$ mm, pe o lungime de 20 mm, după care urmează profilul exponențial calculat cu relația (3.75), care se termină cu o secțiune circulară având diametrul $D_L = 12$ mm. Cu aceste valori ale mărimilor $D_0 = 40$ mm, $D_L = 12$ mm și ale coeficientului de amplificare a amplitudinii $M = N = \frac{D_0}{D_L} = 3,33$ rezultă cu $c = 4900$ m/s lungimea părții exponențiale D_L $L = 134$ mm, de-a lungul căreia se trasează profilul exponențial. Pentru rezolvarea acestei probleme, s-a elaborat un program de calcul în limbaj BASIC, pentru calculatorul TIM-S. Cuosegterea profilului exponențial al concentratorului este necesară pentru întocmirea desenului de execuție al acestuia, în vederea realizării concentratorului prin strunjire de precizie.

În cadrul laboratorului de Electronică al Facultății de Electrotehnică din Timișoara, s-a măsurat amplitudinea longitudinală a oscilațiilor subansamblului transductor-concentrator experimentat, în aer, obținându-se valoarea de $18 \mu\text{m}$, la frecvența de rezonanță de 20,1 kHz a subansamblului.

C. Program de calcul pentru trasarea profilului exponențial al concentratorului ultrasonic.

Folosind limbajul BASIC, pe baza relației (3.75) s-a elaborat un program pentru calculatorul TIM-S, care a fost cuplat cu o imprimantă matricială-grafică Rem Control Data București, tip RCD 9335-1. În continuare se prezintă programul listat și graficul funcției (fig.4.11).

```
1 PRINT AT 10,1;"Va rog sa asteptati, lucreaza"
2 DIM S(136)
3 DIM J(136)
4 LET D0=40
5 LET A=0.009
6 DIM D(136)
7 FOR X=0 TO 135
8 LET D(X+1)=D0*EXP (-A*X)
11 LET S(X+1)=D0/2+D(X+1)/2
13 LET J(X+1)=D0/2-D(X+1)/2
15 NEXT X
17 CLS
22 PRINT AT 6,1;"D=D0*EXP (-A*X) pt X(0,135)"
24 PRINT "si pt D0=40mm si A=0.009/mm"
25 PRINT
26 PRINT
30 PRINT "Pentru tabelul cu valorile functiei tastati 1"
40 PRINT
50 PRINT "Pt reprezentare grafica tastati 2"
53 PRINT
54 PRINT
55 PRINT "La terminare tastati 0"
60 INPUT R#
65 IF R#="0" THEN GO TO 5000
70 IF R#="1" THEN GO TO 1000
75 IF R#="2" THEN GO TO 2000
80 CLS
85 GO TO 22
1000 CLS
1005 OPEN #2,"b"
1010 LET I=5
1020 FOR X=1 TO 136 STEP 5
1030 PRINT " ";X=" ";X-1;"
D= ";D(X)
1040 LET I=I+1
1050 NEXT X
1055 CLOSE #2
1060 INPUT "Tastati AENTERt ",W#
1065 CLS
1070 GO TO 22
2000 CLS
2005 LET k=255/135
2010 PLOT 0,175
2020 DRAW 0,-175
2030 DRAW 255,0
2042 FOR X=1 TO 136
2044 PLOT k*(X-1),k*J(X)
2046 PLOT k*(X-1),k*S(X)
2048 NEXT X
2049 COPY
2050 PRINT AT 1,5;"Tastati AENTE
Rt "
2055 INPUT Q#
2060 CLS
2070 GO TO 22
5000 STOP
```

X= 0	D= 40
X= 5	D= 33.239399
X= 10	D= 36.557247
X= 15	D= 34.948636
X= 20	D= 33.410808
X= 25	D= 31.940649
X= 30	D= 30.53518
X= 35	D= 29.191555
X= 40	D= 27.907053
X= 45	D= 26.679072
X= 50	D= 25.505126
X= 55	D= 24.382836
X= 60	D= 23.30993
X= 65	D= 22.284234
X= 70	D= 21.303672
X= 75	D= 20.366257
X= 80	D= 19.47009
X= 85	D= 18.613357
X= 90	D= 17.794323
X= 95	D= 17.011328
X= 100	D= 16.262786
X= 105	D= 15.547183
X= 110	D= 14.863068
X= 115	D= 14.209055
X= 120	D= 13.583821
X= 125	D= 12.986099
X= 130	D= 12.414678
X= 135	D= 11.868401

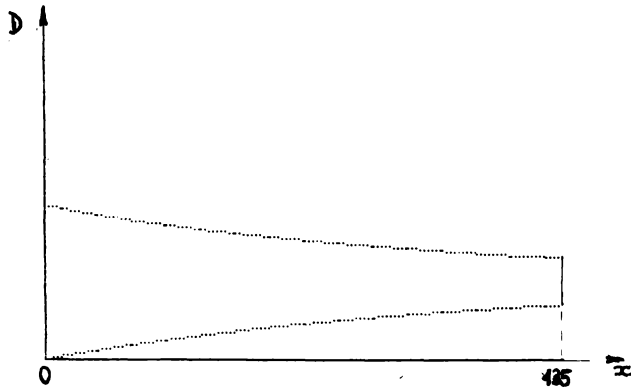


Fig. 4.11

9. CONTRIBUTII PRIVIND STABILIREA MODELULUI MATEMATIC AL FILTRARII IN CIMP ULTRASONIC PENTRU CLASA DE UTILAJE LA CARE MEMBRANA FILTRANTA OSCILEAZA IN DIRECTIA DE CURGERE A FILTRATULUI.

5.1. Determinări experimentale pe utilajul de laborator realizat.

5.1.1. Curbele de filtrare pentru aceleași suspensii în prezența și în absența cimpului ultrasonic.

În experimentările efectuate s-a urmărit productivitatea utilajului realizat, în condițiile filtrării acelorăși suspensii în prezența, respectiv în absența cimpului ultrasonic. Pentru a exclude influența multiplilor parametri legați de suspensie, s-au filtrat suspensii model, ale căror proprietăți se mențin constante în timp. În acest sens s-au utilizat suspensii apoase de talc și calcită, de diferite concentrații. În toate cazurile, s-a menținut constantă diferența de presiune. Drept membrană filtrantă s-a utilizat o sită metalică cu 15.900 ochiuri/cm², respectiv două sau trei asemenea site suprapuse, sau o sită metalică cu 15.900 ochiuri/cm² împreună cu o hirtie de filtru cu pori mari. Pe durata filtrării, frecvența de rezonanță a blocului electromecanic oscilator se modifică între 19,6 kHz, la $\tau = 0$ și 19,35 kHz la $\tau = 40$ min, ceea ce permite considerarea ei constantă, la nivelul mediu de 19,5 kHz. Considerând un randament electroacustic al subansamblului transductor-concentrator acustic de 70 % rezultă o valoare medie a intensității cimpului acustic în suspensie de 0,5 W/cm².

Rezultatele experimentărilor [67,69] sînt redată sub forma curbelor 1-6 (fig.5.1), 13,14 (fig.5.5), 17-20 (fig.5.6) și 25,26 (fig.5.7) în care s-a redat dependența volumului specific de filtrat $V \left(\frac{m^3}{m^2} \right)$, în funcție de timp, τ (min). Din aceste curbe se remarcă creșterea volumelor filtrate în aceiași timp, în prezența cimpului ultrasonic, ceea ce evidențiază intensificarea apreciabilă a operației de filtrare. În fig.5.6 se prezintă rezultatele experimentărilor făcute în două variante, cu aceeași suspensie și membrană filtrantă. Inițial s-a pornit filtrarea fără ultrasunete (curba 17), după care în continuare la $\tau = 22$ min, s-a introdus cimpul ultrasonic, obți-

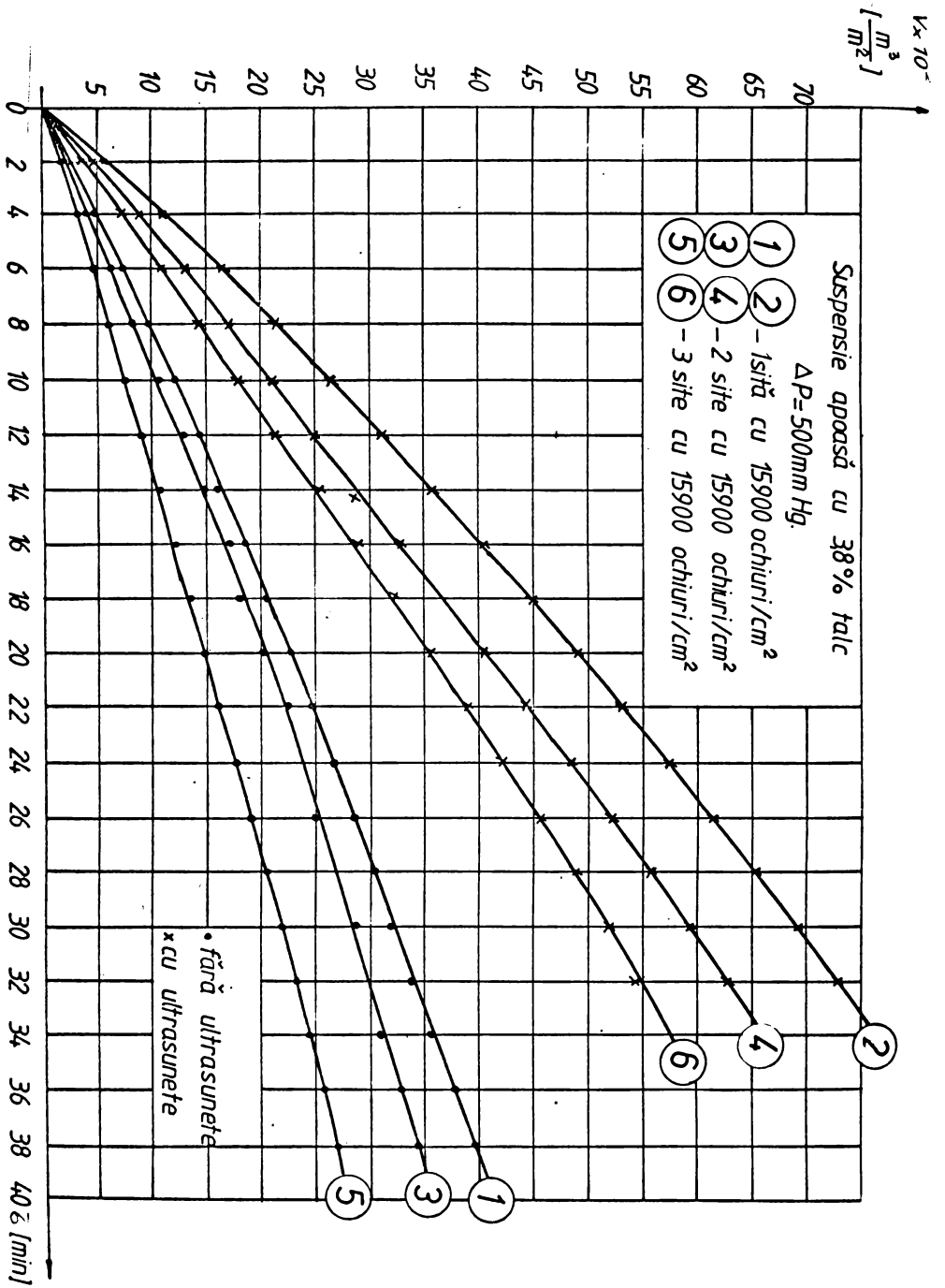


Fig. 5.1

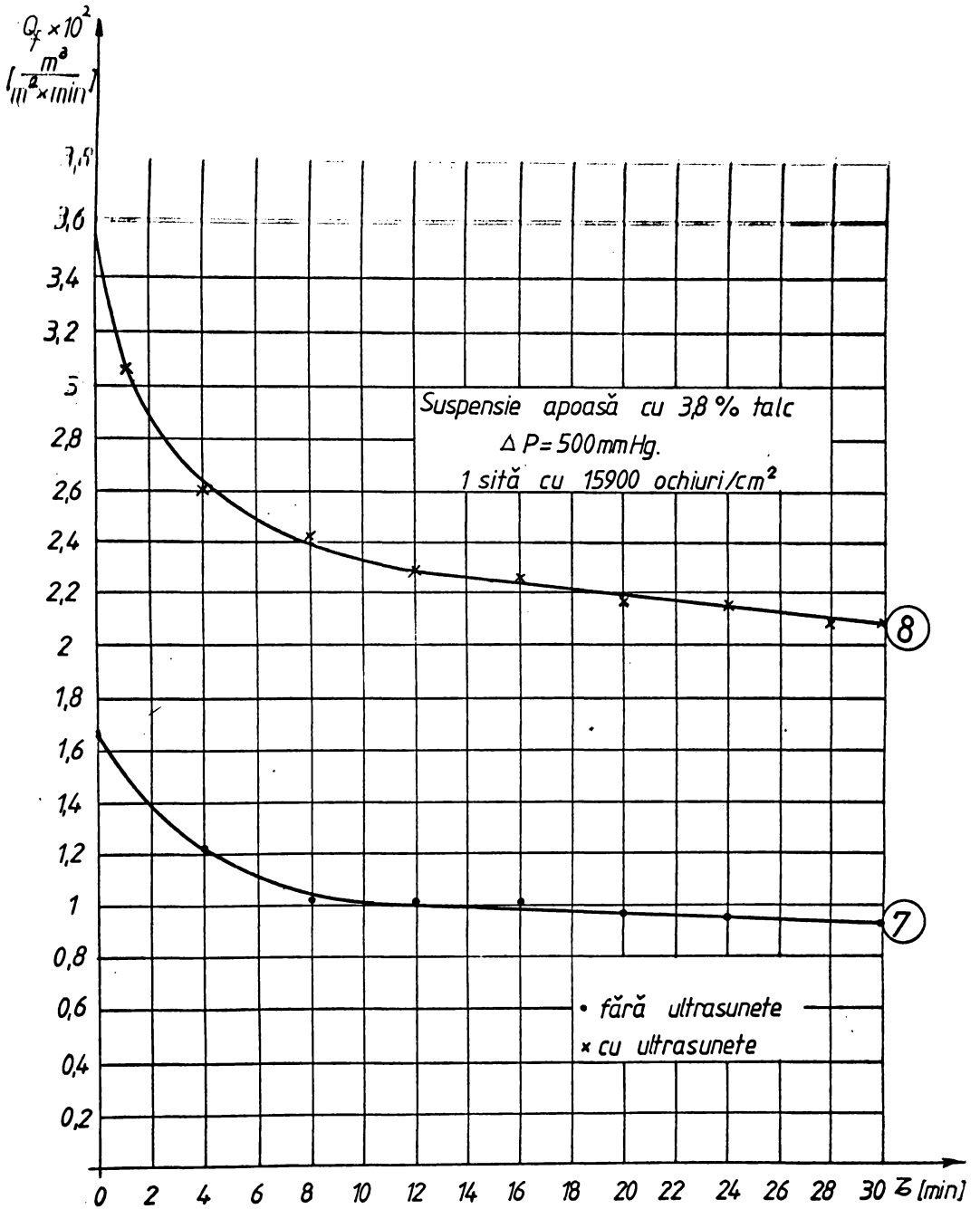


Fig. 5.2

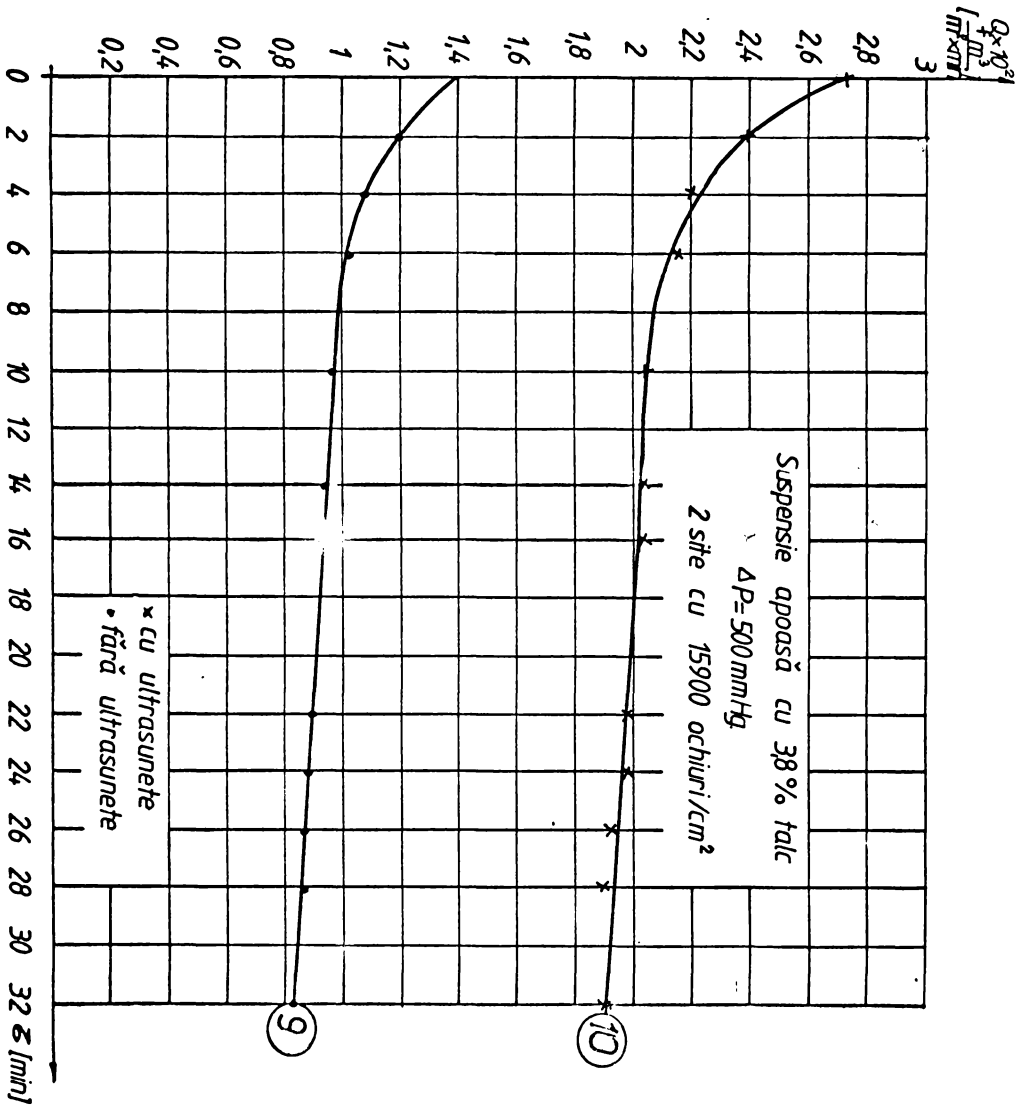


Fig. 5.3

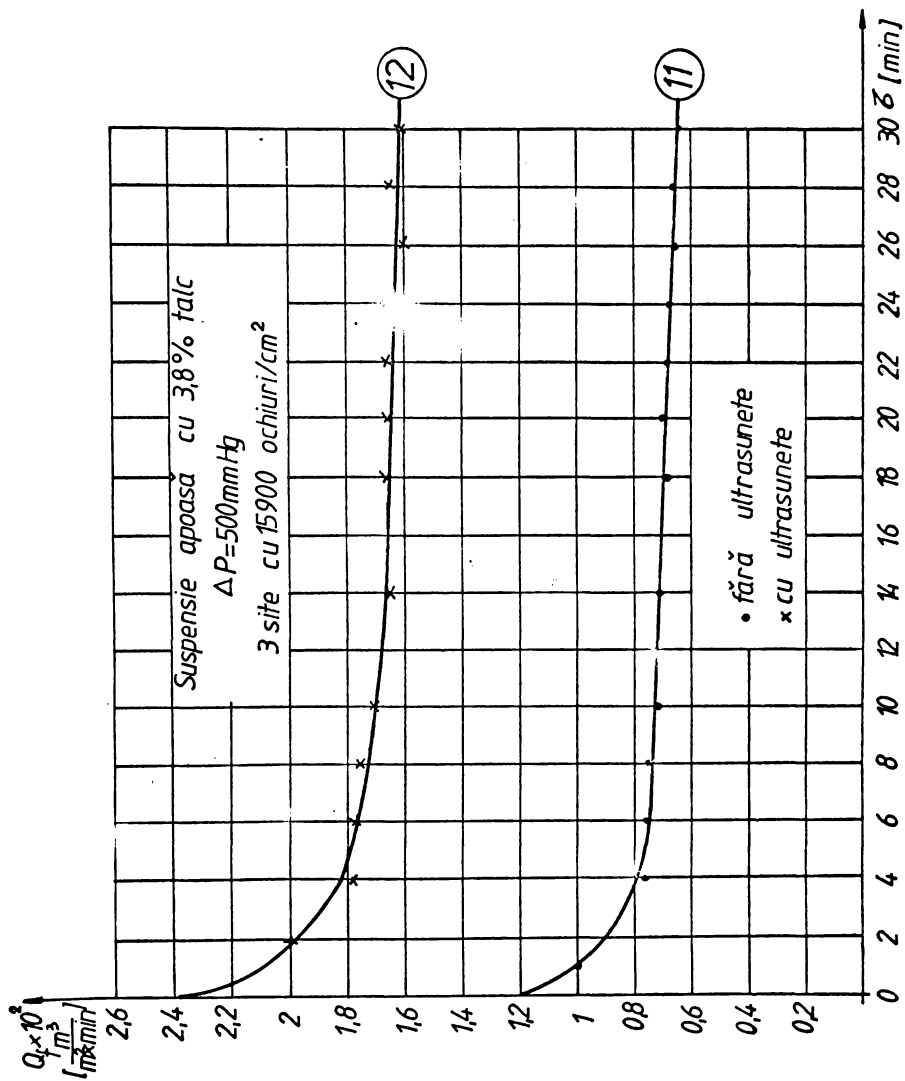
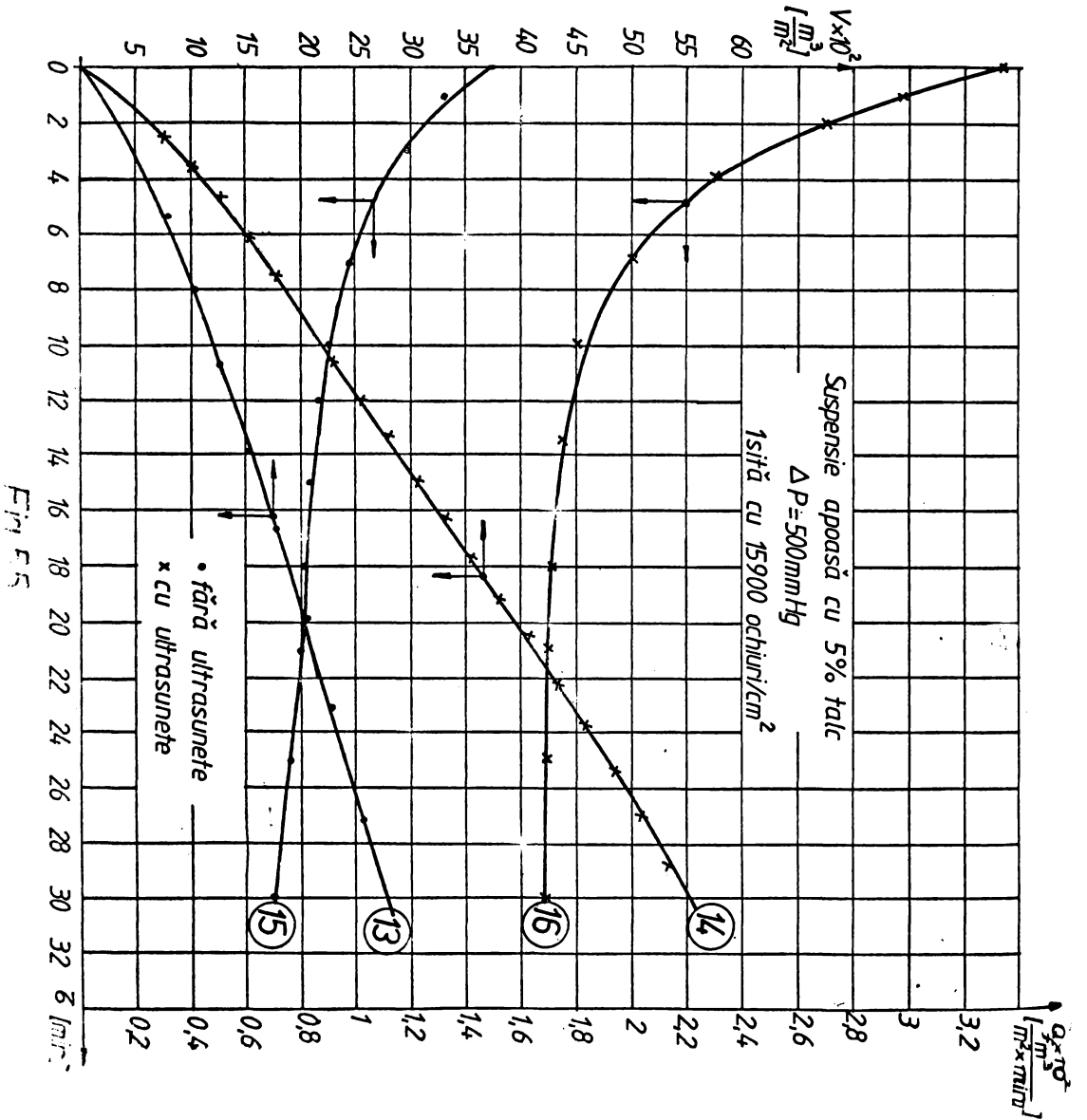


Fig. 5.4



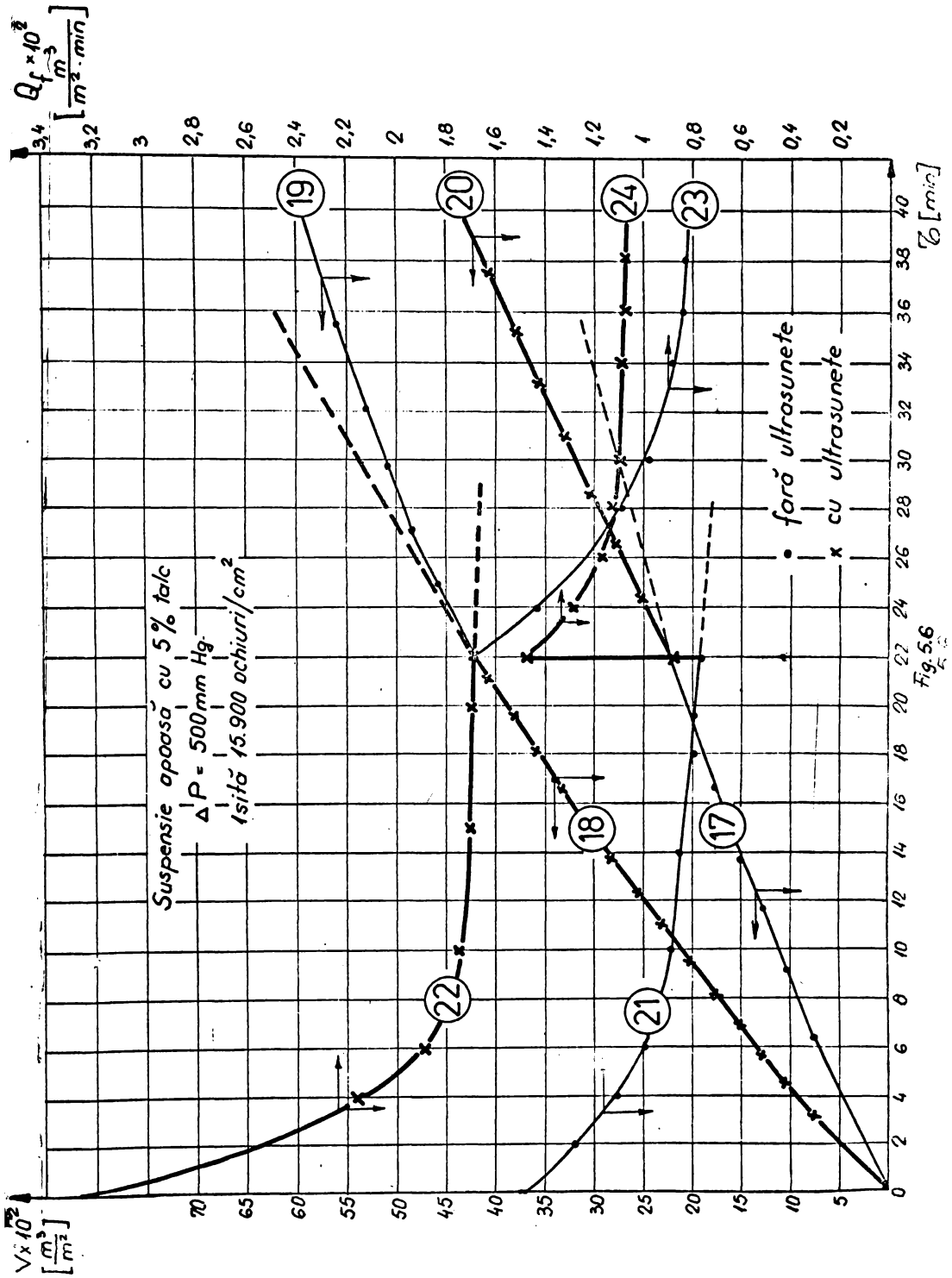


Fig. 5.6

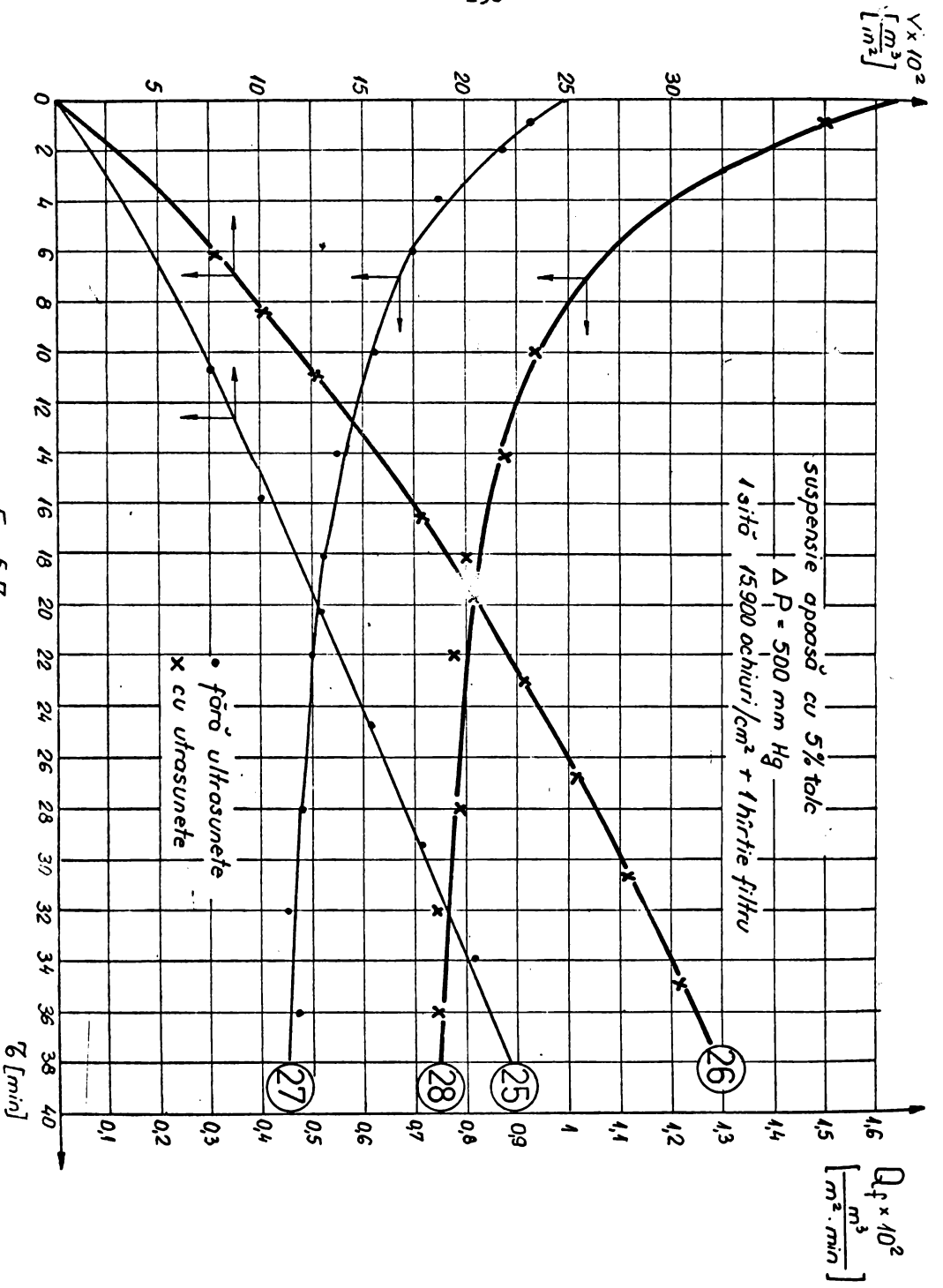


Fig. 5.7

nfindu-se un salt in curba $V(\tau)$ (20). In a doua varianta, s-a inceput filtrarea aceleiasi suspensii in prezenta ultrasunetelor (curba 18) iar la momentul $\tau = 22$ min s-a suspendat cimpul ultrasonic, inregistrindu-se o scadere a volumelor filtrate (curba 19).

5.1.2. Productivitatea filtrului in prezenta si in absenta cimpului ultrasonic

Pentru a evidenta mai clar influenta cimpului ultrasonic asupra operatiei de filtrare, din dependentele primare $V(\tau)$, s-a calculat si reprezentat grafic variatia productivitatii utilajului, $Q_f(m^3/m^2 \cdot min)$ in timp. S-au obtinut astfel curbele 7, 8 (fig.5.2), 9,10 (fig.5.3), 11, 12 (fig.5.4), 15, 16 (fig.5.5), 21-24 (fig.5.6) si 27, 28 (fig.5.7) [64,67].

Din dependentele $Q_{fus}(\tau)$ si $Q_f(\tau)$, pentru perechile de curbe - in prezenta si in absenta cimpului ultrasonic - se constata aceeași alura, dar in cazul prezentei cimpului ultrasonic se realizează, in medie, o productivitate dubla. In continuare, se prezinta pentru exemplificare, valorile calculate ale raportului productivitatii filtrului, Q_{fus}/Q_f , la momentul $\tau = 0$, respectiv $\tau = 30$ min.

Curbele	$\tau = 0$	$\tau = 30$ min
7 - 8	2,08	2,2
9 - 10	1,96	2,28
11 - 12	1,98	2,46
15 - 16	2,23	2,4

In practica interesează productivitatea utilajului in zona de regim. Considerind valorile raportelor in momentul $\tau = 30$ min, rezultă creșteri cu 220-246%. In vederea corelării curbelor experimentale cu modelul

propus, s-a trecut la reprezentarea lor in mărimi raportate și

$$\text{anume: } q_f(t) = \frac{Q_f(\tau)}{Q_f(0)}, \text{ respectiv } q_{f,us}(t) = \frac{Q_{f,us}(\tau)}{Q_f(0)} \text{ unde}$$

$t = \frac{\tau}{\tau_r}$, τ_r fiind un timp de referință ales in zona valorilor de palier ale debitelor. Perechile de curbe astfel obtinute sint 29-30 (fig.5.6), 31-32 (fig.5.9), 33-34 (fig.5.10), 35-36 (fig. 5.11).

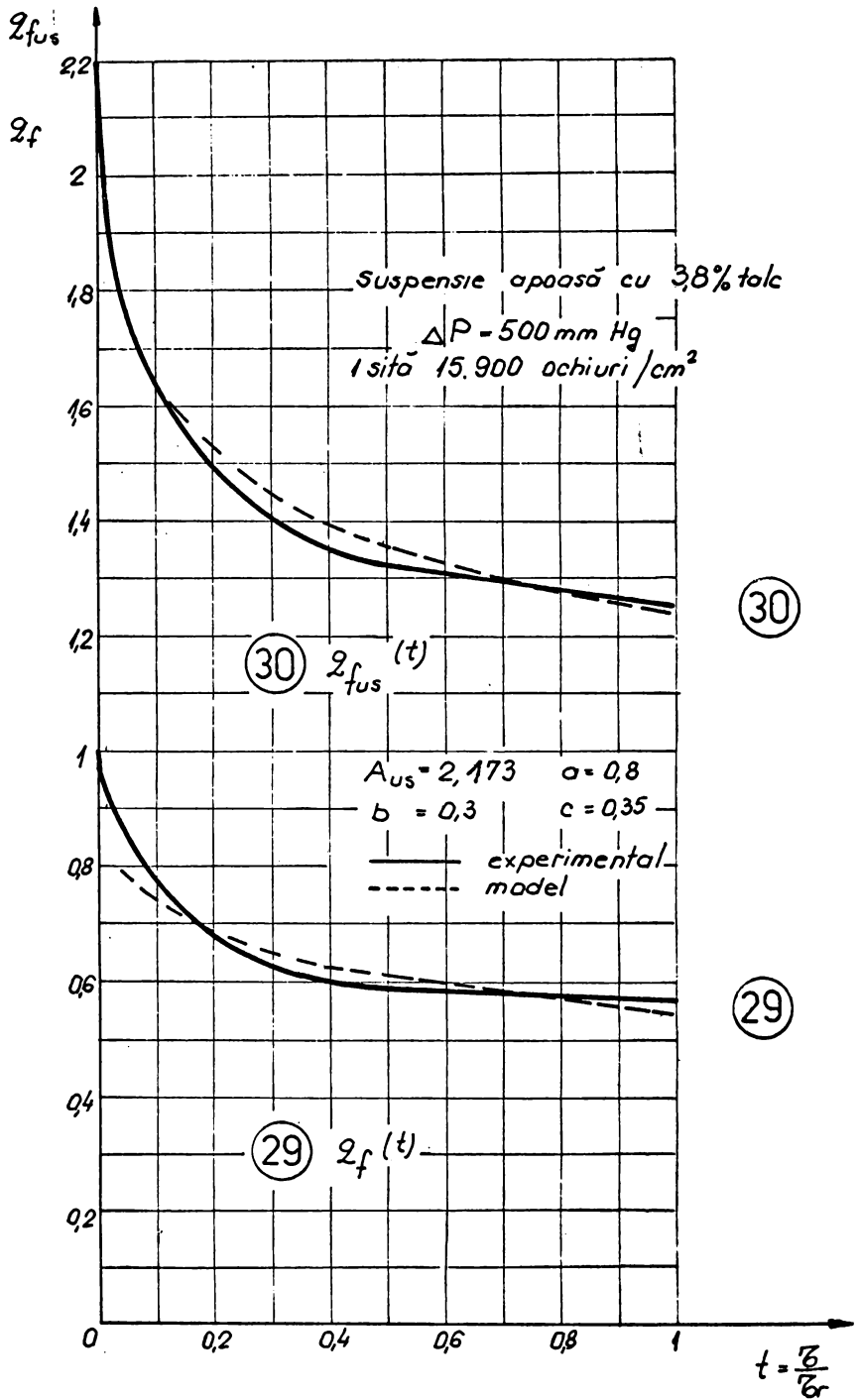


Fig. 5.8

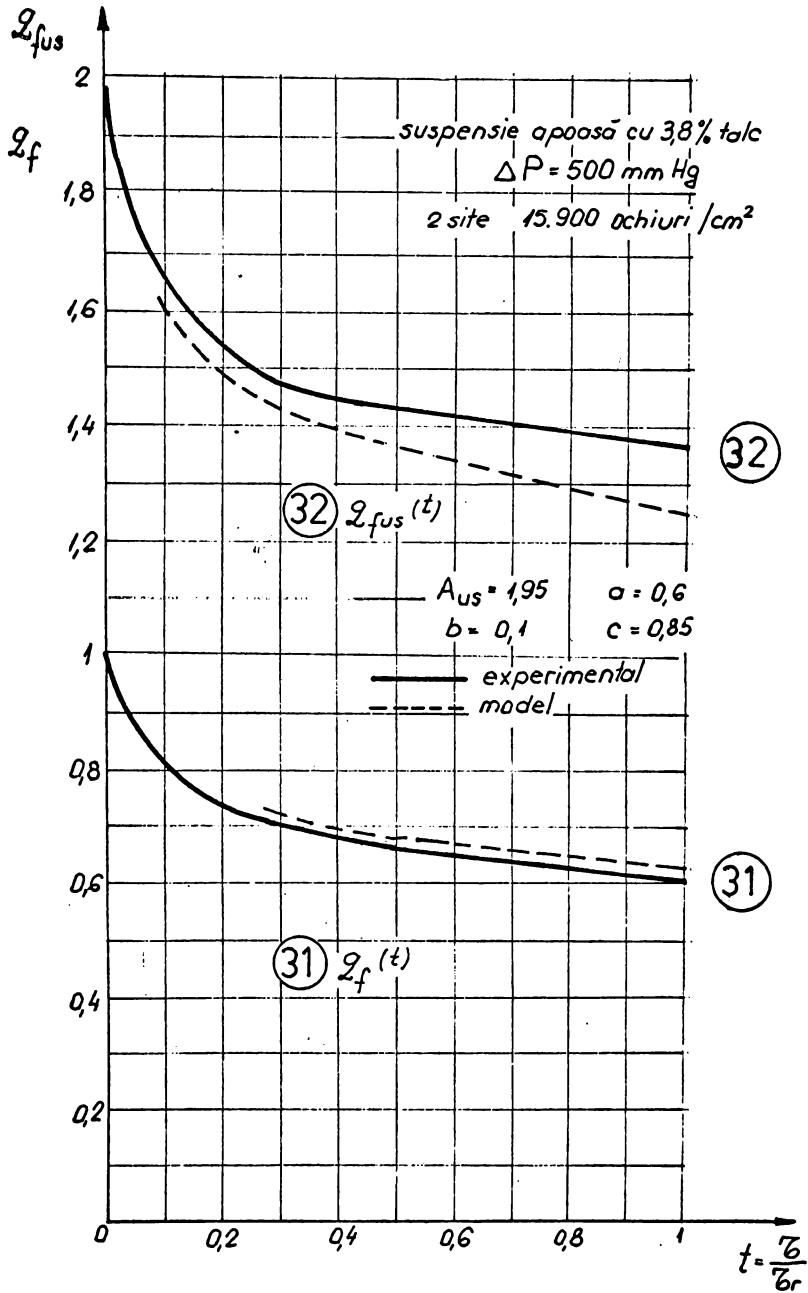


Fig. 5.9.

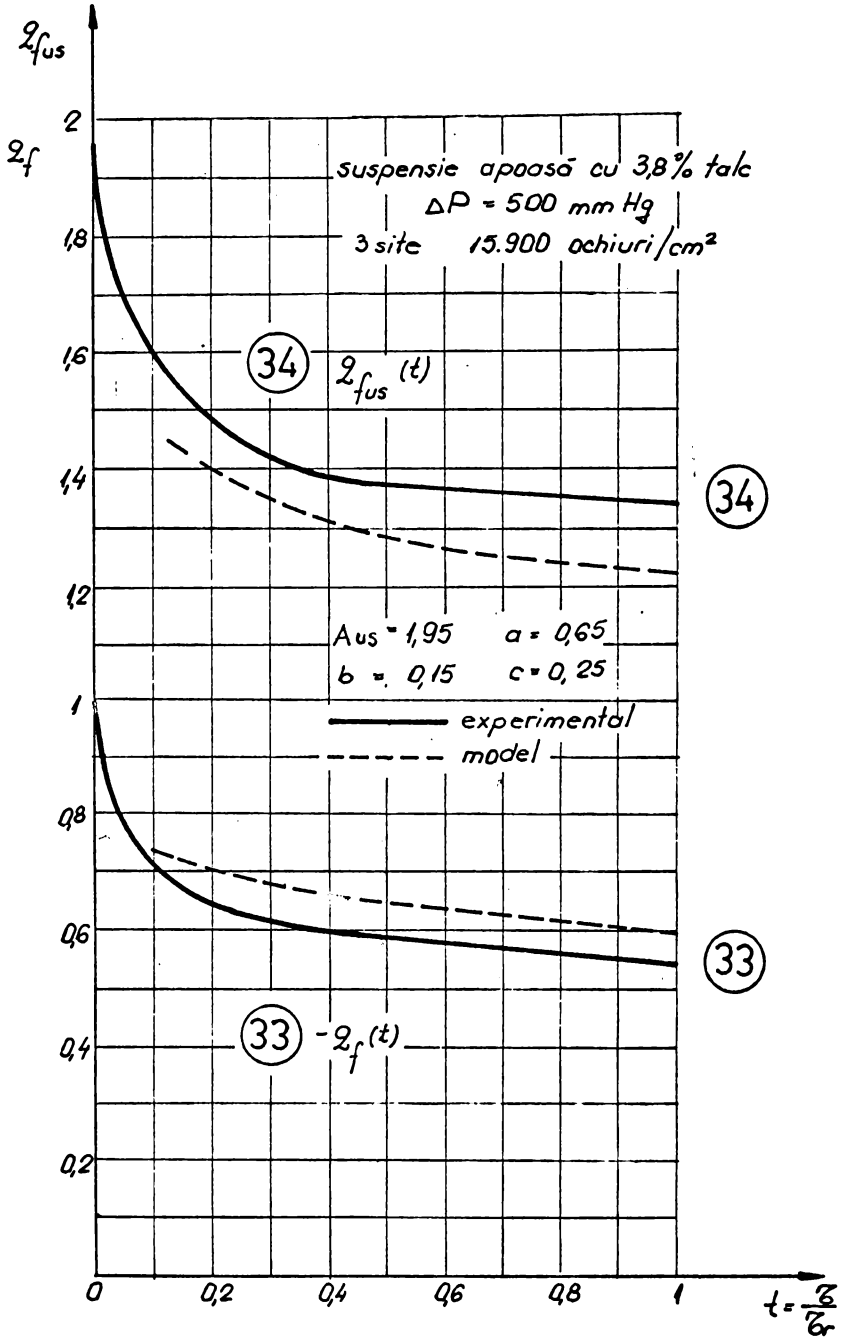


fig. 5.10.

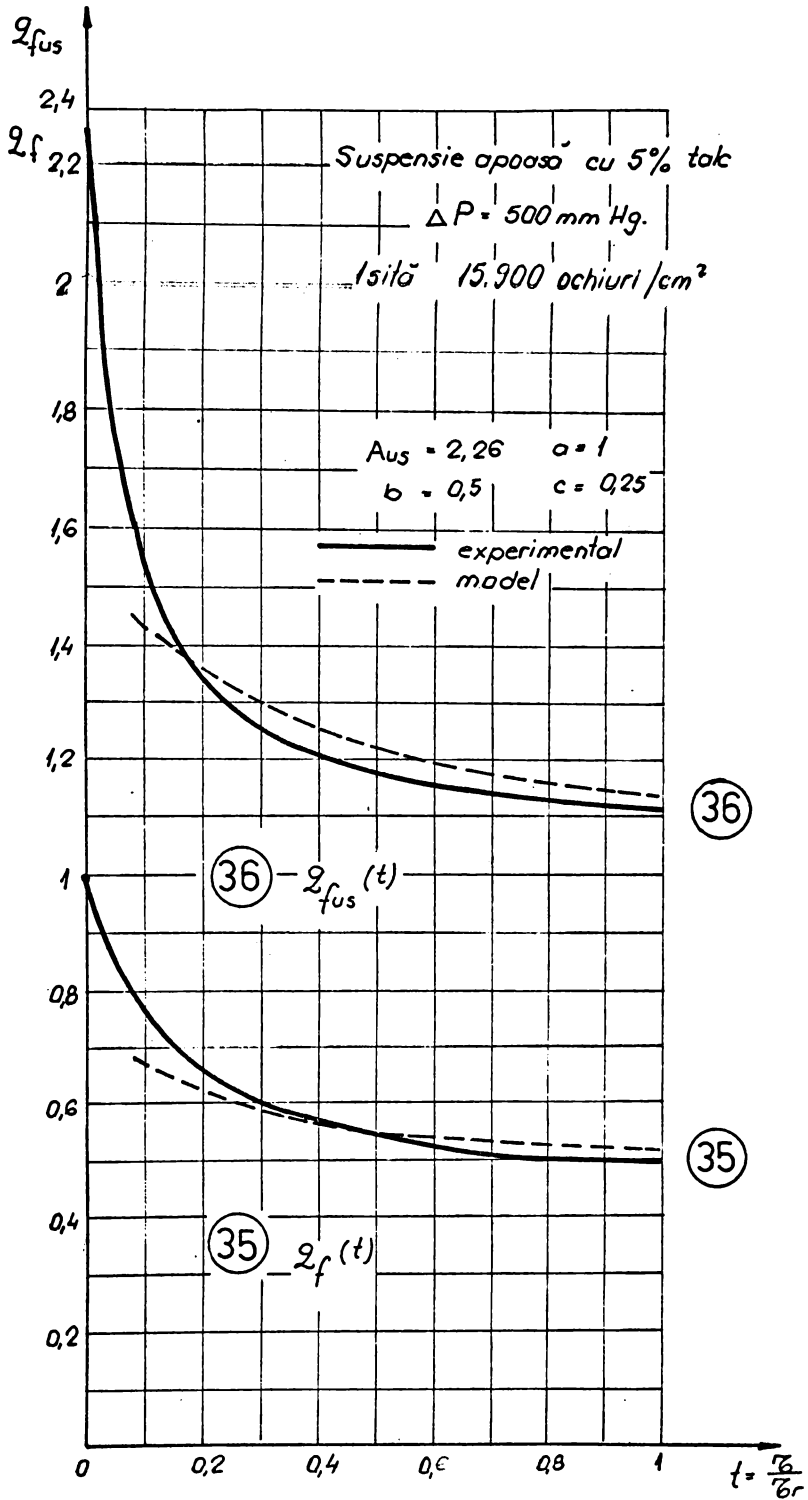


Fig. 5.11

5.2. Explicarea fenomenologică a filtrării în câmp ultrasonic în utilajele având membrana filtrantă oscilantă în direcția de curgere a filtratului.

Filtrarea în câmp ultrasonic se caracterizează prin unde acustice de amplitudine și frecvență relativ reduse. În literatură [52, 63], sînt analizate unele aspecte teoretice ale filtrelor acustice în care membrana filtrantă oscilează perpendicular pe direcția curentului suspensiei. La utilajul realizat și analizat în prezenta lucrare sub aspectul soluției constructive, oscilațiile membranei filtrante au loc după direcția de curgere a suspensiei. Din această cauză, la varianta aparativă realizată se evidențiază trei fenomene care însoțesc undele acustice cu amplitudine și frecvență mică și sînt:

- propagarea undei acustice sub formă de unde elastice ;
- efecte de strat limită în vecinătatea membranei metalice filtrante ;
- propagarea oscilațiilor membranei metalice filtrante prin suspensia viscoasă.

Ca o consecință a prezenței simultane a celor trei fenomene are loc distrugerea aglomerării particulelor solide sub membrana filtrantă și omogenizarea volumică a suspensiei din spațiul de sub membrana filtrantă oscilantă. Ca urmare, se justifică creșterea debitului de filtrat, respectiv realizarea unei productivități mărite.

A. Propagarea undelor acustice

Propagarea undei acustice într-un mediu trebuie înțeleasă în corelare cu tot tabloul modificărilor stării de agitație a mediului respectiv în timp. La propagarea unei unde trebuie diferențiate două fenomene diferite: mișcarea particulelor de mediu în undă și propagarea undelor elastice în mediu. Primul fenomen corespunde mișcării particulelor considerate ca puncte matematice; cel de-al doilea se manifestă prin trecerea stării de agitație a mediului de la unele particule la altele. Deplasările și viteza particulelor depind de forța de perturbație acustică. Aceste deplasări sînt relativ mici, iar după trecerea undei, fiecare particulă se întoarce practic în poziția inițială. Viteza propagării undei este mult mai mare decît viteza de mișcare a

particulelor și nu depinde de forța de perturbare acustică, ci de proprietățile mediului (elasticitate, densitate). Aceste aspecte calitative justifică și permit simplificarea substanțială a ecuațiilor generale prin neglijarea efectelor inerțiale și viscoase în raport cu cele de undă. De asemenea, în fenomenul de propagare a undelor sonice (elastice) va trebui să se ia în considerare compresibilitatea mediului, a lichidului în acest caz.

Se consideră ecuația fundamentală a curgerii, Navier-Stokes:

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} + (\bar{w} \cdot \nabla) \bar{w} = \bar{g} - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \bar{w} \quad (5.1)$$

Deoarece în utilaj, curgerea lichidului are loc după direcția verticală, forțele de cimp gravitațional pot fi incluse în presiune prin intermediul presiunii hidrostatice, presiunea variind numai după direcția axei z. Se notează astfel:

$$p^H = p + \rho g z \quad (5.2)$$

Ecuația (5.1) devine astfel:

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} + (\bar{w} \cdot \nabla) \bar{w} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^H + \nu \Delta \bar{w} \quad (5.3)$$

Neglijând forțele inerțiale $(\bar{w} \cdot \nabla) \bar{w}$ și forțele de viscozitate, $\nu \Delta \bar{w}$, deoarece în unda acustică deplasările particulelor de lichid sînt mici în raport cu distanțele la care aceste deplasări se schimbă vizibil și propagarea undelor se realizează prin compresibilitate, ecuația (5.3) devine:

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial \tau} = -\frac{1}{\rho} \nabla p^H \quad (5.4)$$

Ținînd cont de ecuația de continuitate

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \bar{w}) = 0 \text{ sau } \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \nabla \cdot \bar{w} = 0 \quad (5.5)$$

și de ecuația compresibilității lichidelor, caracteristică propagării undelor elastice:

$$\frac{dp}{\rho} = \frac{1}{k} dp^{\#} \quad (5.6)$$

care se transcrie sub forma:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial \tau} = \frac{1}{k} \frac{\partial p^{\#}}{\partial \tau} \quad (5.7)$$

in care $k = \rho c^2$ este modulul de elasticitate, iar c - viteza de propagare a undei, se poate scrie:

$$\frac{\rho}{k} \cdot \frac{\partial p^{\#}}{\partial \tau} + \rho \nabla \bar{w} = 0 \quad (5.8)$$

sau

$$\frac{1}{k} \cdot \frac{\partial p^{\#}}{\partial \tau} + \nabla \bar{w} = 0 \quad (5.9)$$

respectiv

$$\frac{1}{\rho c^2} \cdot \frac{\partial p^{\#}}{\partial \tau} + \nabla \bar{w} = 0 \quad (5.10)$$

Derivind in raport cu τ și aplicind operatorul Δ in ecuațiile (5.4) și (5.10) se obțin pe rând ecuațiile [70]

$$\Delta p^{\#} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p^{\#}}{\partial \tau^2} = 0 \quad (5.11)$$

$$\Delta \bar{w} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial \tau^2} = 0 \quad (5.12)$$

adică atât presiunea, cât și viteza satisfac ecuația undelor (a coardei vibrante). Datorită acestui fenomen al propagării undelor acustice in mediul fluid, se menține o stare de vibrație in suspensie care împiedică aglomerarea particulelor solide in prezența cimpului ultrasonic. Se realizează in același timp o așezare structurală favorabilă a particulelor in suspensie ceea ce conduce la reducerea pierderilor de energie la filtrare.

B. Efectele de strat limită

Efectele de strat limită determină desprinderea periodică a stratului limită ce se formează in jurul firelor metalice cilindrice din care este confecționată sita filtrantă. Datorită acestui fapt, se generează curenți acustici in vecinătatea membranei

care împiedică depunerea particulelor solide și infundarea ochiurilor. În fig.5.12 se prezintă o schiță explicativă pentru desprinderea stratului limită laminar, evidențindu-se vorteurile de lichid formate în avalul cilindrului. Datorită oscilațiilor membranei filtrante (în ambele sensuri ale direcției de curgere), desprinderea stratului limită și formarea vorteurilor se realizează succesiv pe ambele fețe ale membranei, în ritmul frecvenței de oscilație.

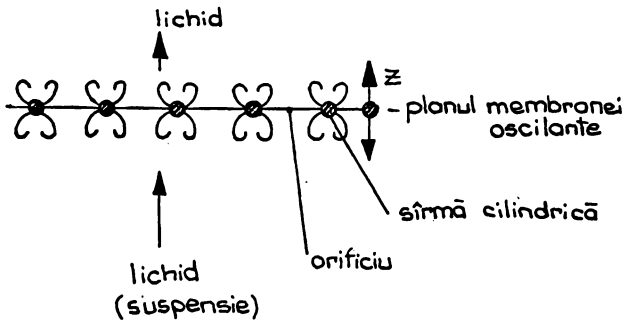


Fig.5.12

Pentru evidențierea teoretică a acestui aspect, din ecuația Navier-Stokes (5.1) pe baza ipotezelor lui Prandtl, se deduce ecuația stratului limită: [30,53]

$$\frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial s} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \quad (5.13)$$

la care se asociază ecuația de continuitate pentru lichide incompresibile

$$\nabla \bar{w} = 0 \quad \text{sau} \quad \frac{\partial w_x}{\partial s} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \quad (5.14)$$

În cazul unei mișcări periodice a membranei filtrante, viteza sîrmei cilindrice oscilante este dată de expresia:

$$w(s, \tau) = w_0(s) \cos \omega \tau \quad (5.15)$$

în care $\omega = 2\pi f$ este pulsația oscilațiilor, cu condițiile limită (fig.5.13).

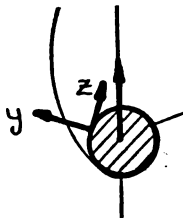


Fig.5.13

$$\begin{cases} y = 0 \\ w_s = 0 \end{cases} \text{ și } \begin{cases} y = \infty \\ w_s = w(s, \tau) \end{cases} \quad \text{adică } y \gg \delta$$

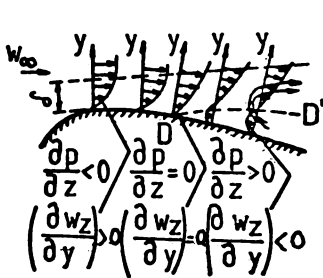
δ fiind grosimea stratului limită.

Soluția ecuației stratului limită (5.15), în primă aproximație, dată de Schlichting [62]

$$w_x(x, y, \tau) = w_0(x) \left[\cos \omega \tau - e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y} \cdot \cos(\omega \tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y) \right] \quad (5.16)$$

reprezintă distribuția vitezelor în stratul limită.

Din teoria stratului limită se știe că desprinderea așezuții are loc acolo unde (fig.5.14) [30,55]



$$\left. \frac{\partial w_x}{\partial y} \right|_{y=0} = 0 \quad (5.17)$$

Linia DD' unește punctele de viteză nulă, iar în zona de sub curba DD' apar vorteurile de lichid.

În baza acestei condiții,

din relația (5.15) rezultă [70]

Fig.5.14

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_x}{\partial y} = w_0(x) \left[\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y} \cdot \cos(\omega \tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y) - \right. \\ \left. - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y} \cdot \sin(\omega \tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y) \right] \Big|_{y=0} = 0 \quad (5.18) \end{aligned}$$

ceea ce implică

$$\cos(\omega \tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y) = \sin(\omega \tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} y) \quad (5.19)$$

respectiv

$$\omega \tau = \frac{\pi}{4} + 2k\pi \quad (5.20)$$

Din relația (5.20) rezultă momentele la care are loc desprinderea stratului limită de pe suprafața cîrmelor cilindrice ale membranei filtrante oscilante

$$\tau = \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{4} + 2k\pi \right) \quad (5.21)$$

La frecvența de 19,5 kHz, în cazul utilajului experimentat, se obține șirul momentelor de desprindere a stratului lini-

tă: $6,4 \times 10^{-6}$ s, $57,7 \times 10^{-6}$ s, 109×10^{-6} s, ... obținute din relația (5.21) pentru $k = 0, 1, 2, \dots$

C. Propagarea oscilațiilor membranei filtrante prin suspensia viscoasă

În cazul filtrării suspensiilor solid-lichid, datorită creșterii concentrației particulelor solide în spațiul de sub membrana filtrantă din corpul filtrului (fig. 5.17) viscozitatea suspensiei se mărește în timp [75].

C.1. Cazul suspensiilor diluate

La filtrarea suspensiilor foarte diluate, dacă concentrația finală a suspensiei din spațiul de sub membrana filtrantă nu depășește 3% volume, viscozitatea suspensiei poate fi considerată constantă și egală cu viscozitatea mediului lichid.

Din ecuația Navier-Stokes, considerând forma linearizată și neglijând forțele de inerție, de presiune și gravitaționale, rezultă:

$$\frac{\partial w_z}{\partial \tau} = \nu \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \quad (5.22)$$

Aceste simplificări sînt posibile deoarece în fenomenul analizat sînt predominante efectele viscoase prin care se realizează antrenarea în mișcare a lichidului în straturile vecine sitei oscilante.

Soluția ecuației (5.22) este de forma:

$$w_z(\tau) = w_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} z} \cdot \cos(\omega\tau - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} z) \quad (5.23)$$

Deoarece membrana filtrantă se caracterizează printr-un parametru constructiv

$$\gamma = \frac{S_m}{S} < 1 \quad (5.24)$$

în care S_m este aria suprafeței metalice pline a membranei filtrante, iar S este aria suprafeței ei totale, care include și orificiile membranei, soluția (5.23) se corectează cu factorul γ simulînd astfel faptul că numai părțile solide determină deplasarea lichidului [70,72]

$$w_z(z) = \gamma w_0 e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} z} \cdot \cos(\omega z - \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} z) \quad (5.25)$$

Din această relație rezultă că oscilațiile membranei filtrante se transmit lichidului, oscilațiile acestuia caracterizându-se printr-o amplitudine care scade odată cu îndepărtarea, z , de membrana filtrantă oscilantă și totodată se defazează în urmă cu mărimea $\varphi = \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} z$ (fig.5.15). Curbele a și b (fig.5.15) se referă la cazul $\gamma < 1$ și ilustrează procesul de atenuare și defazare a oscilațiilor în mediul lichid. Pentru a mări amplitudinea vitezei oscilației sînt necesare valori mai mari ale parametrului γ , adică site metalice mai dese, la o valoare dată a viscozității cinematice a lichidului.

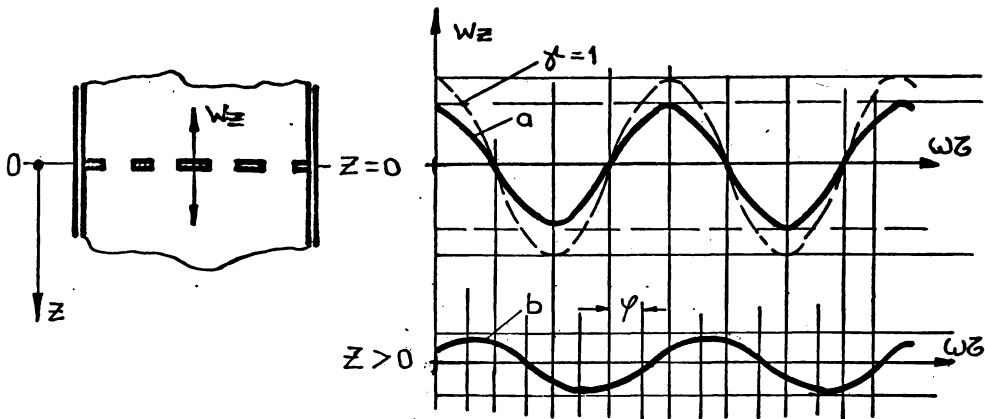


Fig.5.15

Pe de altă parte, la o valoare dată a parametrului γ , creșterea viscozității cinematice a lichidului determină o atenuare mai redusă a amplitudinii vitezei, menținându-se starea de vibrație în lichid la distanțe mult mai mari față de planul membranei filtrante oscilante.

În cazul sitei utilizate, avînd 15.900 ochiuri/cm² parametrul constructiv γ , calculat cu relația (5.24) este $\gamma = 0,782$.

Pentru a ilustra influența viscozității lichidului asupra procesului de amortisare a oscilațiilor s-au considerat trei lichide, calculîndu-se în unități raportate, la diferite distanțe de membrana filtrantă, amplitudinea vitezei de oscila-

ție. Rezultatele calculelor se prezintă sintetic:

Natura lichidului	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	$\nu \times 10^6$ ($\frac{m^2}{s}$)	$\gamma_w = \frac{-\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} s}{l_w}$				
			l_w				
			$z=0$	$z=1 \mu m$	$z=10 \mu m$	$z=100 \mu m$	$z=200 \mu m$
apă, 20°C	1000	1	1	0,761	0,0842	$1,79 \times 10^{-11}$	$3,21 \times 10^{-22}$
etilengli- col 20°C	1114	20,65	1	0,947	0,580	0,0043	$1,9 \times 10^{-5}$
glicerină 60°C	1256	80,775	1	0,973	0,759	0,0637	0,00406

C.2. Cazul suspensiilor concentrate

Viscozitatea suspensiilor concentrate depinde de concentrația în fază solidă; pentru concentrații sub 30% volum fază solidă, viscozitatea dinamică a suspensiei η_s se poate exprima prin relația [79]

$$\eta_s = \eta \frac{0,59}{(0,77-c)^2} \quad (5.26)$$

în care η este viscozitatea dinamică a lichidului; c - concentrația volumică a fazei solide în suspensie.

În ecuația (5.22) intervine viscozitatea cinematică a suspensiei, ν_s , a cărei expresie ca funcție de timp rezultă din relația (5.26) sub forma

$$\nu_s(\tau) = \nu \frac{\rho}{\rho_s(\tau)} \cdot \frac{0,59}{[0,77-c(\tau)]^2} \quad (5.27)$$

unde ν și ρ reprezintă viscozitatea cinematică, respectiv densitatea lichidului, iar ρ_s - densitatea suspensiei. Se face precizarea că în cadrul acestui paragraf mărimile referitoare la suspensie sînt notate numai cu indicele "s" în loc de indicele "susp" folosit în capitolul 2 ceea ce facilitează forma de scriere a ecuațiilor utilizate în continuare. S-a ținut seamă de faptul că în procesul de filtrare, în spațiul de sub membrană

filtrantă, concentrația suspensiei, cât și densitatea sînt funcții de timp.

In continuare se prezintă o rezolvare a problemei intr-o variantă generalizată. Deoarece concentrația suspensiei se modifică în timp, crește, se modifică în mod corespunzător și viscozitatea cinematică $\nu_s = \nu_s(\tau)$. In acest caz, ecuația (5.22) este

$$\frac{\partial w(s, \tau)}{\partial \tau} = \nu_s(\tau) \frac{\partial^2 w(s, \tau)}{\partial s^2} \quad (5.28)$$

Membrana filtrantă efectuează oscilații cu viteza

$$w(s, \tau) \Big|_{s=0} = w_0 \cos \omega \tau \quad (5.29)$$

Soluția ecuației (5.28) se caută sub forma

$$w(s, \tau) = \sqrt{\frac{\nu_s(\tau)}{\nu_{s0}}} \cdot w_0 \vartheta_0(\psi) e^{j\omega \tau} \quad (5.30)$$

in care $\vartheta_0(\psi)$ este o funcție nedeterminată de ψ , iar $\psi = s \sqrt{\frac{\omega}{\nu_{s0}}}$; ν_{s0} - viscozitatea cinematică a suspensiei în momentul inițial, $j = \sqrt{-1}$; In corelare cu aspectele fizice ale filtrării în cîmp ultrasonic, particulele solide nu aderă la membrana filtrantă oscilantă și ca urmare se admite

$$\nu_s(\tau) = \begin{cases} \nu_{s0} & \text{pentru } s=0 \text{ și } \tau \gg 0 \\ \nu_s(\tau) & \text{pentru } s \neq 0 \end{cases}$$

Pentru determinarea funcției $\vartheta_0(\psi)$ se înlocuiește (5.30) în (5.28), pentru care se calculează derivatele $\frac{\partial w}{\partial \tau}$ și $\frac{\partial^2 w}{\partial s^2}$.

$$\frac{\partial w}{\partial \tau} = \sqrt{\frac{\nu_s(\tau)}{\nu_{s0}}} \cdot w_0 \vartheta_0(\psi) \cdot j\omega e^{j\omega \tau} + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu_s(\tau)}{\nu_{s0}}} \cdot \frac{\nu_s'(\tau)}{\nu_s(\tau)} \cdot w_0 \vartheta_0(\psi) \cdot e^{j\omega \tau} \quad (5.31)$$

respectiv

$$\frac{\partial w}{\partial s} = \sqrt{\frac{\nu_s(\tau)}{\nu_{s0}}} \cdot w_0 \vartheta_0'(\psi) \sqrt{\frac{\omega}{\nu_{s0}}} \cdot e^{j\omega \tau}$$

iar

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \sqrt{\frac{v_s(\tau)}{v_{s0}}} \cdot \frac{\omega}{v_{s0}} \cdot w_0 \cdot \vartheta_0''(\psi) \cdot e^{j\omega\tau} \quad (5.32)$$

Folosind expresiile (5.31) și (5.32) se obține:

$$\begin{aligned} j\vartheta_0'(\psi) w_0 \sqrt{\frac{v_s(\tau)}{v_{s0}}} \cdot e^{j\omega\tau} \left[\omega - \frac{j}{2} \cdot \frac{v_s'(\tau)}{v_s(\tau)} \right] = \\ = v_s(\tau) \sqrt{\frac{v_s(\tau)}{v_{s0}}} \cdot \frac{\omega}{v_{s0}} \cdot w_0 \vartheta_0''(\psi) \cdot e^{j\omega\tau} \end{aligned} \quad (5.33)$$

sau

$$j\mu\vartheta_0'(\psi) - \vartheta_0''(\psi) = 0 \quad (5.34)$$

$$\text{in care } \mu = \frac{v_{s0}}{v_s(\tau)} - \frac{j}{2\omega} \cdot \frac{v_s'(\tau)}{v_s(\tau)} \cdot \frac{v_{s0}}{v_s(\tau)} \quad (5.35)$$

Soluția ecuației (5.34) este de formă:

$$\vartheta_0(\psi) = e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \psi \mu} \quad (5.36)$$

Pentru verificare, se calculează derivatele ϑ_0' și ϑ_0'' :

$$\vartheta_0'(\psi) = -\frac{1+j}{\sqrt{2}} \mu \cdot e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \psi \mu}$$

și

$$\vartheta_0''(\psi) = \left(\frac{1+j}{\sqrt{2}}\right)^2 \mu \cdot e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \psi \mu} = j\mu \cdot e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \psi \mu}$$

Înlocuind în (5.34) se obține

$$j\mu \cdot e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \psi \mu} - j\mu \cdot e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \psi \mu} = 0$$

Din relațiile (5.30) și (5.36) rezultă

$$w(z, \tau) = \sqrt{\frac{v_s(\tau)}{v_{s0}}} w_0 \cdot e^{-\frac{1+j}{\sqrt{2}} \psi \mu} \cdot e^{j\omega\tau} \quad (5.37)$$

Viteza este dată numai de partea reală a expresiei (5.37). Relația (5.35) se scrie sub forma:

$$\mu = \alpha - j\beta \quad (5.38)$$

in care

$$\alpha = \frac{v_{s0}}{v_s(\tau)}, \text{ iar } \beta = \frac{1}{2\omega} \cdot \frac{v_s'(\tau)}{v_s(\tau)} \cdot \frac{v_{s0}}{v_s(\tau)}$$

Expresia $-\frac{1+j}{\sqrt{2}}\psi\mu$ devine

$$-\frac{1+j}{\sqrt{2}}\psi\mu = -\frac{\psi}{\sqrt{2}}(1+j)(\alpha - j\beta) = -\frac{\psi}{\sqrt{2}}[\alpha + \beta + j(\alpha - \beta)]$$

iar produsul

$$\begin{aligned} & -\frac{1+j}{\sqrt{2}}\psi\mu \cdot e^{j\omega\tau} = -\frac{\psi}{\sqrt{2}}(\alpha + \beta) + j\left[\omega\tau - \frac{\psi}{\sqrt{2}}(\alpha - \beta)\right] \\ & \cdot \cdot \cdot = \cdot \cdot \cdot \\ & \cdot \cdot \cdot -\frac{\psi}{\sqrt{2}}(\alpha + \beta) \left\{ \cos\left[\omega\tau - \frac{\psi}{\sqrt{2}}(\alpha - \beta)\right] + j \sin\left[\omega\tau - \frac{\psi}{\sqrt{2}}(\alpha - \beta)\right] \right\} \end{aligned}$$

Partea reală a expresiei (5.37) este

$$w(z, \tau) = w_0 \sqrt{\frac{v_s(\tau)}{v_{s0}}} \cdot e^{-\frac{\psi}{\sqrt{2}}(\alpha + \beta)} \cdot \cos\left[\omega\tau - \frac{\psi}{\sqrt{2}}(\alpha - \beta)\right] \quad (5.39)$$

sau ținind cont că $\psi = z \sqrt{\frac{\omega}{v_{s0}}}$

$$w(z, \tau) = w_0 \sqrt{\frac{v_s(\tau)}{v_{s0}}} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2v_{s0}}}(\alpha + \beta)} \cdot \cos\left[\omega\tau - z \sqrt{\frac{\omega}{2v_{s0}}}(\alpha - \beta)\right] \quad (5.40)$$

Deoarece membrana filtrantă se caracterizează prin parametrul constructiv $\gamma < 1$, definit prin relația (5.24), expresia (5.40) devine

$$w(z, \tau) = \gamma w_0 \sqrt{\frac{v_s(\tau)}{v_{s0}}} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2\gamma v_{s0}}}(\alpha + \beta)} \cdot \cos\left[\omega\tau - z \sqrt{\frac{\omega}{2\gamma v_{s0}}}(\alpha - \beta)\right] \quad (5.41)$$

sau

$$w(z, \tau) = \frac{\gamma}{\sqrt{\alpha}} w_0 \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2\gamma v_{s0}}}(\alpha + \beta)} \cdot \cos\left[\omega\tau - z \sqrt{\frac{\omega}{2\gamma v_{s0}}}(\alpha - \beta)\right] \quad (5.42)$$

Relațiile (5.41) și (5.42) reprezintă distribuția vitezelor în cazul propagării oscilațiilor membranei filtrante prin suspensie

viscoasă cu viscozitate variabilă în timp. Se evidențiază caracterul general de rezolvare a problemei și utilitatea rezultatului obținut. Pentru cazul particular al unor lichide cu viscozitate constantă $\nu_s(\tau) = \nu_{s0} = \text{const.}$, rezultă $\nu'_s(\tau) = 0$

iar

$$\alpha = \frac{\nu_{s0}}{\nu_s(\tau)} = 1 \quad \text{și} \quad \beta = \frac{1}{2\omega} \cdot \frac{\nu'_s(\tau)}{\nu_s(\tau)} \cdot \frac{\nu_{s0}}{\nu_s(\tau)} = 0$$

Relația (5.41) devine

$$w(z, \tau) = \gamma w_0 e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2\nu_{s0}}}} \cdot \cos(\omega\tau - z \sqrt{\frac{\omega}{2\nu_{s0}}}) \quad (5.43)$$

rezultat analog cu cel dat de relația (5.25).

Exemplu de calcul. Se consideră cazul filtrării suspensiei apoase cu 5% (masă) talc (fig.5.5). Pe baza bilanțului substanței solide care se acumulează în spațiul de sub membrana filtrantă, cu volumul $0,7 \text{ dm}^3$, ținând cont de curba de filtrare (14), (fig.5.5), s-au calculat curbele de variație în timp a concentrației, a densității și a viscozității cinematice a suspensiei.

În fig.5.16 s-a trasat prin punctele calculate dependența $\nu_s(\tau)$ care reprezintă o variație liniară, a cărei ecuație este

$$\nu_s(\tau) = 10^{-10} \cdot \tau + 1,0134 \cdot 10^{-6} \quad (5.44)$$

Pentru a ilustra efectul creșterii viscozității cinematice a suspensiei pe durata filtrării asupra procesului de amortizare a oscilațiilor în suspensie s-au considerat trei situații ($\tau = 100 \text{ s}$, 1000 s și 1800 s), calculându-se în unități raportate la diferite distanțe de membrana filtrantă, amplitudinea vitezei de oscilație. Pentru frecvență de $19,5 \text{ kHz}$, la $\tau = 100 \text{ s}$, cu $\nu_s = 1,0234 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu'_s = 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}^2$, $\nu_{s0} = 1,0134 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ rezultă $\beta = 3,953 \cdot 10^{-10}$.

Decorece cu creșterea timpului valoarea lui β scade, re-

sultă că întotdeauna $\beta \ll \alpha$ și deci se poate neglija.

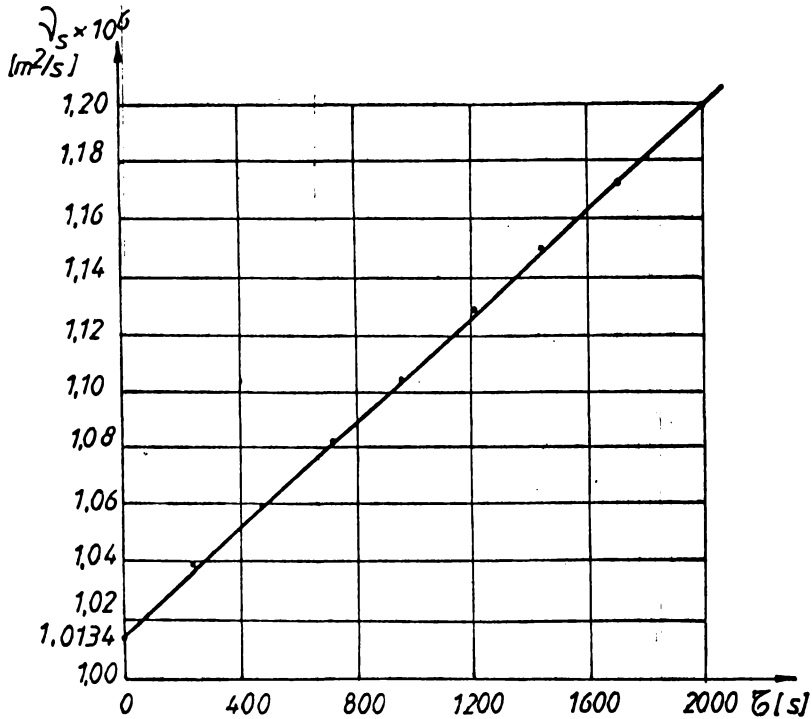


Fig. 5.16

Rezultatele calculelor se prezintă sintetic:

τ (% vol)	$\gamma \times 10^6$ ($\frac{\mu^2}{s}$)	$\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \gamma v_0 \cdot e^{-z} \sqrt{\frac{\omega}{2\gamma s_0}} (\alpha + \beta)$ γv_0				
		$z=0$	$z=1\mu m$	$z=10\mu m$	$z=100\mu m$	$z=200\mu m$
$\tau=100s$ $\alpha=0,991$	2,81 1,0234	1	0,7878	0,08804	$2,676 \times 10^{-11}$	$7,09 \times 10^{-22}$
$\tau=1000s$ $\alpha=0,910$	9,05 1,1134	1	0,8379	0,119	$2,014 \times 10^{-10}$	$3,87 \times 10^{-20}$
$\tau=1800s$ $\alpha=0,849$	13,65 1,1934	1	0,8806	0,1346	$9,338 \times 10^{-10}$	$8,037 \times 10^{-19}$

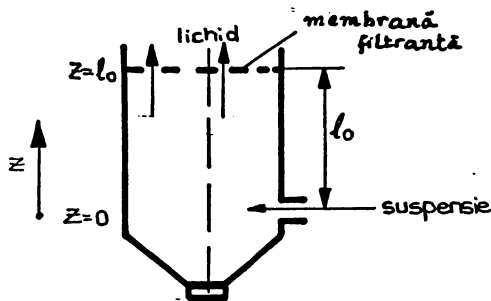
Analiza rezultatelor evidențiază aportul favorabil al creșterii vâscozității suspensiei asupra micșonerării și reducerii amplitudinii vitezei de oscilație, comparativ cu cazul unei suspensii apoase diluate prezentat la paragraful 5.2.C.1. Din

relația (5.42) rezultă că amplitudinea vitezei de oscilație la $\omega = \text{const.}$ crește pe durata filtrării odată cu creșterea viscozității cinematice, iar la $\tau = \text{const.}$, amplitudinea vitezei de oscilație scade cu îndepărtarea de membrana filtrantă.

5.3. Stabilirea modelelor matematice ale filtrării.

5.3.1. Filtrarea în absența cimpului ultrasonic.

Analizând procesul de filtrare se constată că, în absența cimpului ultrasonic, suspensia aflată în corpul cilindric al aparatului, având înălțimea l_0 (fig.5.17) și anume în spațiul



suprins între nivelul orificiului de intrare a suspensiei în aparat și nivelul membranei filtrante, între care se aplică o diferență de presiune constantă ΔP , își modifică porozitatea datorită particulelor solide în acest spațiu, cu concentrație maximă sub membrana filtrantă.

Fig.5.17

filtrantă.

Debitul filtrului, Q , este funcție de porozitatea stratului de suspensie, de grosime l_0 (fig.5.17), de sub membrana filtrantă, ceea ce-i determină permeabilitatea; totodată debitul de lichid filtrat depinde de înălțimea stratului de suspensie l_0 , de diferența de presiune ΔP , viscozitatea fazei lichide și aria secțiunii stratului, conform relațiilor lui Darcy.

$$Q = \frac{V_f}{\tau} = K \frac{\Delta P S}{\eta l_0} \quad (5.45)$$

respectiv Kozeny-Carman

$$Q = \frac{V_f}{\tau} = \frac{\varepsilon_s^3}{5 \sigma^2 (1 - \varepsilon_s)^2} \cdot \frac{\Delta P}{\eta l_0} S \quad (5.46)$$

în care: Q - debitul volumetric al filtratului ; V_f - volumul filtratului; τ - timpul ; K - permeabilitatea stratului de suspensie; ΔP - diferența de presiune ; η - viscozitatea dinamică a filtratului ; l_0 - înălțimea stratului de suspensie; S - aria

secțiunii stratului de suspensie ; ε_p - porozitatea suspensiei din corpul cilindric al filtrului sub membrana filtrată; σ - suprafața specifică a particulelor solide din suspensie.

Datorită aglomerării particulelor solide sub membrana filtrantă, aglomerare ce nu este uniformă pe toată înălțimea stratului de suspensie, fiind maximă în vecinătatea membranei filtrante, permeabilitatea scade în timp, satisfăcând următoarele condiții:

- în momentul inițial, $\tau = 0$, suspensia fiind omogenă, permeabilitatea este aceeași în tot volumul suspensiei și are valoarea K_0 , ceea ce se scrie sub forma

$$\text{pentru } \tau = 0 \quad \begin{cases} Z = 0 \\ K = K_0 \end{cases} \quad \begin{cases} Z = 1_0 \\ K = K_0 \end{cases}$$

- într-un moment oarecare al procesului de filtrare, $\tau > 0$, permeabilitatea este funcție de coordonata z și de timp, ceea ce înseamnă că

$$\text{pentru } \tau > 0 \quad \begin{cases} Z = 0 \\ K_{(0,\tau)} = K_0 f(0,\tau) \end{cases} \quad \begin{cases} Z = 1_0 \\ K_{(1_0,\tau)} = K_0 f(1_0,\tau) \end{cases}$$

$$\text{cu } K_{(0,\tau)} > K_{(1_0,\tau)} \quad (5.47)$$

și deoarece permeabilitatea scade în timp

$$K_{(0,\tau)} < K_0 \quad (5.48)$$

Pe baza acestor considerații și condiții impuse din analiza fenomenului, se propune o lege de variație a permeabilității în timp și de-a lungul înălțimii Z , de forma [70]

$$K = K_0 \frac{1}{(\xi + b)t^a + 1} \quad (5.49)$$

în care:

K_0 - permeabilitatea suspensiei în momentul inițial, $\tau = 0$,
 b și c - doi parametri care caracterizează suspensia și membrana filtrantă, iar

$\xi = \frac{z}{l_0}$ și $t = \frac{\tau}{\tau_0}$, variabilele adimensionalizate ;

τ_0 este un timp de referință ales care va fi precizat ulterior.

Relația (5.49) satisface condițiile (5.47) și (5.48) impuse:

- pentru $\tau = 0$, respectiv $t = 0$, rezultă

$$\begin{cases} Z = 0 \\ K = K_0 \end{cases} \quad \begin{cases} Z = 1_0 \\ K = K_0 \end{cases}$$

- pentru $\tau > 0$, respectiv $t > 0$, se obține

$$\begin{cases} Z = 0 \\ K_{z=0} = \frac{K_0}{b \cdot t^{c+1}} \end{cases} \quad \begin{cases} Z = 1_0 \\ K_{z=1_0} = \frac{K_0}{(1+b)t^{c+1}} \end{cases}$$

Pentru $b > 0$ sînt satisfăcute condițiile (5.47) și (5.48) adică

$$K(0, \tau) < K_0 \text{ și } K_{0, \tau} > K(1_0, \tau)$$

Cu legea propusă pentru permeabilitatea K , debitul filtratului se poate exprima sub forma

$$Q(t) = K(\xi, t) \cdot \frac{S}{\eta} \cdot \frac{dP(\xi, t)}{ds} \quad (5.50)$$

unde $P(\xi, t)$ este distribuția presiunii de-a lungul zonei de lucru, l_0 .

Din relația (5.50) se obține ecuația debitului volumetric de filtrat trecut prin unitatea de suprafață, care are forma

$$Q_F(t) = \frac{Q(t)}{S} = \frac{1}{\eta} K(\xi, t) \cdot \frac{dP(\xi, t)}{ds} \quad (5.51)$$

Diferența de presiune pe înălțimea l_0 , la momentul t , se poate obține sub forma l_0

$$P(1, t) - P(0, t) = \int_0^1 \frac{\eta Q_F(t)}{K(\xi, t)} \cdot ds \quad (5.52)$$

Tinând seama că $z = l_0 \xi$, din relațiile (5.49) și (5.52) rezultă:

$$\Delta P = P(l, t) - P(0, t) = \frac{\eta Q_F(t)}{K_0} \int_0^{l_0} [(\xi + b)t^a + 1] d\xi \quad (5.53)$$

sau

$$\Delta P = P(l_0, t) - P(0, t) = \frac{\eta l_0 Q_F(t)}{K_0} \int_0^1 [(\xi + b)t^a + 1] d\xi \quad (5.54)$$

Prin integrare se obține

$$\Delta P = \frac{\eta l_0 Q_F(t)}{K_0} \left[t^a \left(\frac{\xi^2}{2} + b\xi \right) \Big|_0^1 + \xi \Big|_0^1 \right] \quad (5.55)$$

respectiv

$$\Delta P = \frac{\eta l_0 Q_F(t)}{K_0} \left[1 + \left(\frac{1}{2} + b \right) t^a \right] \quad (5.56)$$

Din relația (5.56) rezultă pentru debitul filtratului prin unitatea de suprafață expresia

$$Q_F(t) = K_0 \frac{\Delta P}{\eta l_0} \cdot \frac{1}{1 + (0,5 + b)t^a} \quad (5.57)$$

sau notînd $a = 0,5 + b$ (5.58)

$$Q_F(t) = K_0 \frac{\Delta P}{\eta l_0} \cdot \frac{1}{1 + at^a} \quad (5.59)$$

Verificînd acest debit în condițiile extreme, din relația (5.58) rezultă, în ipoteza menținerii unei diferențe de presiune $\Delta P = \text{constant}$,

- pentru $\tau = 0$, $t = \frac{\tau}{a} = 0$

$$Q_F(0) = \lim_{t \rightarrow 0} Q(t) = \lim_{t \rightarrow 0} K_0 \frac{\Delta P}{\eta l_0} \cdot \frac{1}{1 + at^a} = K_0 \frac{\Delta P}{\eta l_0} \quad (5.60)$$

ceea ce reprezintă debitul filtratului cu viscositatea η , trecut

prin unitatea de suprafață filtrantă, obținut în momentul inițial, când permeabilitatea stratului de suspensie, având grosimea l_0 , este K_0 .

- pentru $\tau \rightarrow \infty$, deci $t = \frac{\tau}{\tau_f} \rightarrow \infty$

$$\psi_p(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \psi_p(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} K_0 \frac{\Delta P}{\eta l_0} \cdot \frac{1}{1 + a_0 t^c} = 0 \quad (5.61)$$

ceea ce corespunde situației când întreg spațiul de sub membrana filtrantă este umplut cu particule solide, porozitatea stratului devenind minimă, iar permeabilitatea fiind nulă.

5.3.2. Filtrarea în prezența cîmpului ultrasonic

Modelul matematic al filtrării în utilajul analizat în prezența cîmpului ultrasonic se bazează pe următoarele două ipoteze [70,72]:

- omogenizarea distribuției particulelor solide din stratul de suspensie de grosime l_0 , ceea ce determină o permeabilitate medie constantă pe înălțimea l_0 , la un moment dat, ce se obține prin medierea spațială a lui K .

- amplificarea instantanee a debitului la apariția cîmpului ultrasonic datorită efectelor undelor ultrasonice, elastice (efect de coardă vibrantă) care determină o reorganizare favorabilă a particulelor în suspensie și mărirea pe această cale a permeabilității.

În baza primei ipoteze, permeabilitatea medie, K_m , se determină prin mediere spațială

$$K_m = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} K(z, t) dz = \frac{1}{l_0} \int_0^1 K(\xi, t) l_0 d\xi \quad (5.62)$$

Înlocuind expresia permeabilității (5.49) se obține

$$K_m = K_0 \int_0^1 \frac{d\xi}{(\xi + b)t^c + 1} \quad (5.63)$$

Prin integrarea relației (5.63) se obține

$$K_m = \frac{K_0}{t^c} \ln \left[(1+b)t^c + 1 \right] \Big|_0^1 \quad (5.64)$$

respectiv

$$K_m = \frac{K_0}{t^c} \left\{ \ln \left[(1+b)t^c + 1 \right] - \ln(b \cdot t^c + 1) \right\} \quad (5.65)$$

$$K_m = \frac{K_0}{t^c} \cdot \ln \frac{1+(1+b)t^c}{1+b \cdot t^c} \quad (5.66)$$

Din relația (5.66) se poate observa că permeabilitatea medie scade în timp. Se verifică de asemenea condițiile extreme:

- pentru momentul inițial, $\tau = 0$, $t = \frac{\tau}{\tau_0} = 0$, rezultă (prin aplicarea regulii lui l'Hospital) $K_m = K_0$, dar pentru $\tau \rightarrow \infty$ respectiv, $t \rightarrow \infty$, $K_m = 0$, ceea ce corespunde situației când întreg spațiul de sub membrana filtrantă este saturat cu material solid.

Debitul de filtrat trecut prin unitatea de suprafață filtrantă, în prezența cimpului ultrasonic, Q_{fus} , în condițiile menținerii aceleiași diferențe de presiune, ΔP , este

$$Q_{fus}(t) = A_{us} \cdot K_m \cdot \frac{\Delta P}{\eta l_0} \quad (5.67)$$

unde A_{us} este un coeficient supraunitar care depinde de a doua ipoteză.

Ținând seama de relația (5.66) se obține

$$Q_{fus}(t) = A_{us} \cdot \frac{K_0 \Delta P}{\eta l_0} \cdot \frac{1}{t^c} \ln \frac{1+(1+b)t^c}{1+b \cdot t^c} \quad (5.68)$$

Coeficientul A_{us} reprezintă un factor care este determinat de amplificarea debitului $Q_{fus}(0)$ în momentul inițial, ($\tau = 0$), în prezența cimpului ultrasonic, față de debitul, $Q_f(0)$, corespunzător în filtrarea în absența cimpului ultrasonic. Expresia coeficientului A_{us} este

$$A_{us} = \frac{Q_{fus}(0)}{Q_f(0)} > 1 \quad (5.69)$$

Verificând condițiile limită, din relația (5.68) se obține

= pentru $\tau = 0$, respectiv $t = 0$

$$Q_{fus}(0) = \lim_{t \rightarrow 0} Q_{fus}(t) = A_{us} \cdot \frac{K_a \Delta P}{\eta l_0} \quad (5.70)$$

= pentru $\tau \rightarrow \infty$, respectiv $t \rightarrow \infty$

$$Q_{fus}(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} Q_{fus}(t) = 0 \quad (5.71)$$

ceea ce corespunde situației reale.

Pentru a pune în evidență influența cimpului ultrasonic asupra debitului de filtrat, relațiile (5.59) și (5.68) s-au raportat la debitul de filtrat $Q_f(0) = \frac{K_a \Delta P}{\eta l_0}$ (relația 5.60), obținându-se relații adimensionale pentru debitele filtrate în cele două variante

$$q_f(t) = \frac{Q_f(t)}{Q_f(0)} = \frac{1}{1 + at^b} \quad (5.72)$$

respectiv

$$Q_{fus}(t) = \frac{Q_{fus}(t)}{Q_f(0)} = A_{us} \cdot \frac{1}{t^c} \ln \frac{1 + (1+b)t^d}{1 + bt^d} \quad (5.73)$$

Parametrii $a, (b), c$ și A_{us} care intervin în relațiile (5.72) și (5.73) caracterizează suspensia, membrana filtrantă și prezența cimpului ultrasonic. Acești parametri se determină pe baza curbelor experimentale obținute pe utilajul modelat. Astfel parametrul "a" rezultă din condiția

$$q_f(1) = \frac{1}{1 + a \cdot 1^b} = \frac{1}{1 + a} \quad (5.74)$$

în care valoarea $q_f(1)$ se citește din curba experimentală $Q_f(t)$ pentru $t=1$. Din relația (5.58) rezultă $b=0,5$. Valorile parametrului "a" variază în intervalul $(0, 3, 1]$, iar ale parametrului "b" în intervalul $[-0, 0, 5]$.

Orientativ, valoarea parametrului "c" se obține din relația (5.72) aplicată curbei experimentale pentru câteva valori ale lui "t", în intervalul (0,1). Timpul de referință, τ_r , se alege pe baza curbelor experimentale $q_f(\tau)$, și $q_{fus}(\tau)$ în zona valorilor quasistabilizate ale debitelor.

Pentru parametrul A_{us} , care evidențiază aportul cimpului ultrasonic în procesul de filtrare, pe baza observației că la utilajele de filtrare în cimp ultrasonic, cunoscute [3,15,20,21,23] se folosesc frecvențe în domeniul $f=18-25$ kHz, se propune o dependență de forma

$$A_{us} = 1 + d \sqrt{f} \quad (5.75)$$

în care "d" este o mărime caracteristică utilajului. Din relația (5.75) rezultă că în banda de frecvențe menționată aportul cimpului ultrasonic este aproximativ de aceeași valoare. În absența cimpului ultrasonic, adică la $f=0$, $A_{us}=1$. Valoarea mării "d" se poate calcula din valorile raportului q_{fus}/q_f la $\tau=0$, prezentate în paragraful 5.1.2.

5.3.3. Program de calcul pentru identificarea parametrilor din relațiile modelelor matematice.

Folosind limbajul BASIC, pe baza relațiilor (5.72) și (5.73) s-a elaborat un program de calcul pentru calculatorul TIM-S, care a fost cuplat cu o imprimantă matricială-grafică Rom Control Data București, tip RCD 9335-1. Programul elaborat este general, dar pentru exemplificare s-au ales curbele $q_f(t)$ și $q_{fus}(t)$ experimentale redată în fig.5.8. În continuare se prezintă programul listat și graficele funcțiilor $q_f(t)$ notată prin q și $q_{fus}(t)$ notată prin r. Scările adoptate în reprezentarea grafică pentru axele x și y sînt $k_x=100/1$ și $k_y=175/2$, 175 ținînd cont de parametrul $A_{us} = 2,173$ [70,72].

Pentru a evita nedeterminarea funcțiilor q și r la $t=0$, s-a adoptat valoarea inițială $t=0,02$, iar în continuare s-a impus pentru variabila t pasul $t=0,02$. Parametrul "a" ia valori între 0,6 și 1, avînd pasul 0,1, iar pentru parametrul "c" s-au admis valori între 0,25 și 0,5, cu pasul 0,05. Prin program s-a impus tipărirea valorilor funcțiilor r și q numai pentru trei situații și anume: $t=0,2$, $t=0,5$ și $t=0,8$, în vederea compe-

rării curbelor calculate pe baza modelului, în diverse variante, cu cele obținute experimental. Aceste situații s-au considerat suficiente pentru controlul curbelor calculate. Admițând de exemplu o eroare a valorilor curbelor calculate de $\pm 5\%$ față de curbele experimentale, se selectează din familiile de curbe reprezentate grafic în fig.5.18, 5.19, 5.20 și 5.21, numai celele determinate prin parametrii $c=0, 25-0,35$ și $a=0,8$, restul curbelor se caracterizează prin erori mai mari. Dacă s-ar admite o eroare de $\pm 10\%$ s-ar încadra și curbele determinate prin parametrii $c=0,25-0,35$ și $a=0,7-0,9$. Selecția curbelor calculate pe bază de model care se încadrează în limita unor erori impuse față de curbele experimentale se face pentru perechi de funcții $q-r$, determinate prin aceiași parametri "a" și "c".

În concluzie, modelul matematic original stabilit pentru filtrarea în cimp ultrasonic caracterizată în mod corespunzător procesul de filtrare, are un caracter general pentru utilajele în care membrana filtrantă oscilează în direcția de curgere a filtratului și oferă precizia necesară studiului problemelor complexe de acest tip.

```

1 OPEN #2,"b"
57 LET kx=100/1: LET ky=175/2.
173
500 FOR c=.25 TO .35+.05 STEP .
05
505 PRINT "          c=";c
510 FOR a=.6 TO 1+.1 STEP .1
530 LET b=a-.5
540 FOR t=0.02 TO 1+.2 STEP .02
550 LET q=1/((1+a*t^c)
560 LET r=2.173*LN (((1+(1+b)*t^
c)/(1+b*t^c))/t^c
570 PLOT 0,175: DRAW 0,-175: DR
AW 255,0
575 PLOT 0,2*ky: DRAW 10,0
576 PLOT 0,1*ky: DRAW 10,0
577 PLOT .5*kx,0: DRAW 0,5
578 PLOT 1*kx,0: DRAW 0,5
580 PLOT t*kx,q*ky
582 PLOT .2*kx,0: DRAW 0,170
583 PLOT .5*kx,0: DRAW 0,170
584 PLOT .8*kx,0: DRAW 0,170
590 PLOT t*kx,r*ky
600 NEXT t
610 NEXT a
620 COPY : CLS
630 NEXT c
640 STOP

```

```

700 OPEN #2,"b"
740 LET x$="          q=": LET x=1:
GO SUB 750
742 PAUSE 0
745 LET x$="          r=": LET x=2:
GO SUB 750
749 CLOSE #2: STOP
750 FOR c=.25 TO .35 STEP .05
751 PRINT : PRINT "c=";c
800 LET t=.2: PRINT " t=";t:
GO SUB 950
803 LET t=.5: PRINT " t=";t:
GO SUB 950
807 LET t=.8: PRINT " t=";t:
GO SUB 950
810 NEXT c
940 RETURN
950 FOR a=.6 TO 1.1 STEP .1
960 LET b=a-.5
1000 LET q=1/((1+a*t^c)
1010 LET r=2.173*LN (((1+(1+b)*t^
c)/(1+b*t^c))/t^c
1020 IF x=1 THEN PRINT " a=";a:
x$;q
1022 IF x=2 THEN PRINT " a=";a:
x$;r
1030 NEXT a
1050 RETURN

```

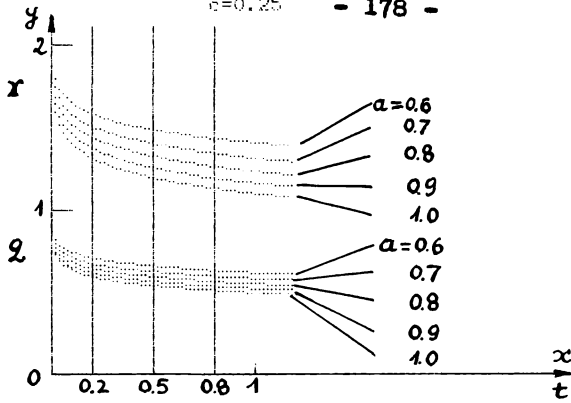



Fig. 5.18

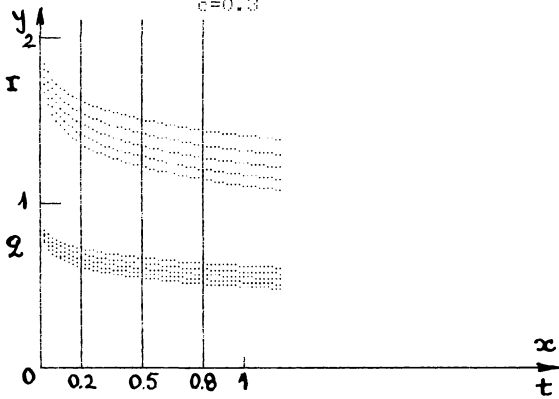


Fig. 5.19

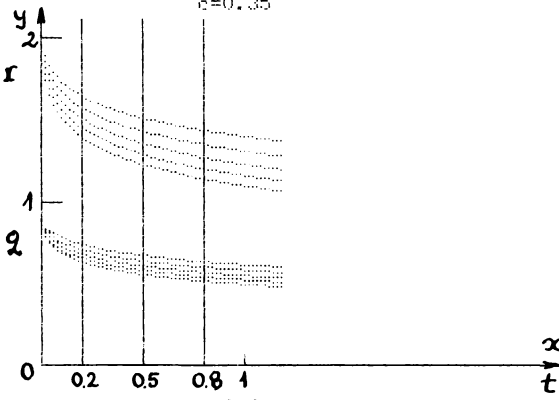


Fig. 5.20

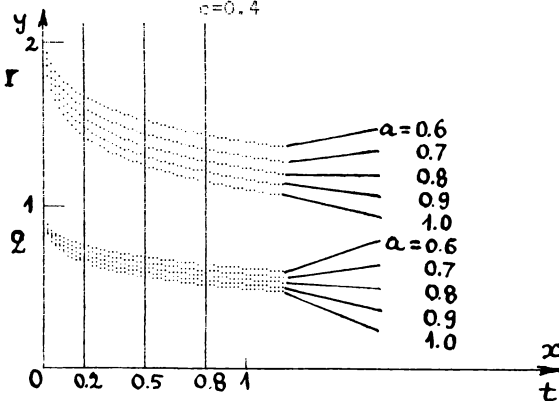


Fig. 5.21

c=0.25
t=0.2
a=0.6 q=0.71365149
a=0.7 q=0.68114406
a=0.8 q=0.65146909
a=0.9 q=0.62427184
a=1 q=0.59925442
t=0.5
a=0.6 q=0.66465593
a=0.7 q=0.62947419
a=0.8 q=0.59782971
a=0.9 q=0.56921456
a=1 q=0.54321362
t=0.8
a=0.6 q=0.63798093
a=0.7 q=0.60167779
a=0.8 q=0.56928374
a=0.9 q=0.54019965
a=1 q=0.51394286

c=0.3
t=0.2
a=0.6 q=0.72980964
a=0.7 q=0.69836123
a=0.8 q=0.66951116
a=0.9 q=0.64295017
a=1 q=0.61841624
t=0.5
a=0.6 q=0.67233606
a=0.7 q=0.63752064
a=0.8 q=0.60613337
a=0.9 q=0.57769169
a=1 q=0.55179952
t=0.8
a=0.6 q=0.64055382
a=0.7 q=0.60434868
a=0.8 q=0.57201734
a=0.9 q=0.54296964
a=1 q=0.51672952

c=0.35
t=0.2
a=0.6 q=0.74538132
a=0.7 q=0.71503767
a=0.8 q=0.68706789
a=0.9 q=0.66120389
a=1 q=0.63721651
t=0.5
a=0.6 q=0.679925
a=0.7 q=0.64549075
a=0.8 q=0.61437618
a=0.9 q=0.58612329
a=1 q=0.56035465
t=0.8
a=0.6 q=0.64311865
a=0.7 q=0.60701336
a=0.8 q=0.57474654
a=0.9 q=0.54573698
a=1 q=0.51951514

c=0.25
t=0.2
a=0.6 r=1.5812473
a=0.7 r=1.5065457
a=0.8 r=1.4386933
a=0.9 r=1.3767766
a=1 r=1.3200393
t=0.5
a=0.6 r=1.4837607
a=0.7 r=1.4011979
a=0.8 r=1.327529
a=0.9 r=1.2613648
a=1 r=1.2015952
t=0.8
a=0.6 r=1.4308478
a=0.7 r=1.344544
a=0.8 r=1.2683061
a=0.9 r=1.2004346
a=1 r=1.1395986

c=0.3
t=0.2
a=0.6 r=1.6135217
a=0.7 r=1.5416976
a=0.8 r=1.4760845
a=0.9 r=1.4159002
a=1 r=1.3604898
t=0.5
a=0.6 r=1.4990118
a=0.7 r=1.4175962
a=0.8 r=1.3447442
a=0.9 r=1.2791439
a=1 r=1.2197604
t=0.8
a=0.6 r=1.4359483
a=0.7 r=1.3499889
a=0.8 r=1.2739808
a=0.9 r=1.2062561
a=1 r=1.1455058

c=0.35
t=0.2
a=0.6 r=1.6446993
a=0.7 r=1.5757844
a=0.8 r=1.5124847
a=0.9 r=1.4541331
a=1 r=1.4001651
t=0.5
a=0.6 r=1.5140912
a=0.7 r=1.4338401
a=0.8 r=1.3618295
a=0.9 r=1.2968312
a=1 r=1.2378528
t=0.8
a=0.6 r=1.4410334
a=0.7 r=1.3554208
a=0.8 r=1.2796456
a=0.9 r=1.2120709
a=1 r=1.1514098

6. DISCUȚII GENERALE

Teza de doctorat a folosit rezultate ale studiilor teoretice și cercetărilor experimentale desfășurate de autoarea lucrării, deși o parte din potențialul vast al filtrării cu ultrasunete aplicării în industria chimică.

În lucrarea de doctorat explorată s-au abordat și rezolvat unele aspecte ale problemei la care se stabilește planul de lucru care intervin în ecuația generalizată a filtrării și care caracterizează tipul procesului de filtrare, precum și problema întinzierii și filtrării suspensiilor solid-lichid în câmp ultrasonic. S-a aplicat celor prezentate în lucrare o serie de recomandări metodologice generale și contribuții originale:

6.1) Tema și conținutul lucrării de doctorat se încadrează în caracteristicile științifice actuale pe plan mondial [74] privind întinzierii și filtrării cu ultrasunete a unor clase de corpuri solid-lichid folosite în câmp ultrasonic. Aceste lucrări recente prezentate [53] privind aplicarea în activitățile științifice la purificarea triacetatului de celuloză în câmp ultrasonic.

6.2) Conținutul lucrării reprezintă o introducere și o extindere pe plan regional în domeniul științific și aplicativ experimental la nivel de laborator de talie de laborator, a filtrării în câmp ultrasonic.

6.3) Filtrarea este nu numai un proces relativ simplu. În literatura de evidențiază necesitatea completării teoriei și aplicării și utilitatea introducerii unor metode care să asigure realizarea tuturor tehnologiilor implicate în acest proces [59].

6.4) Teoria filtrării neconvenționale, bazată pe aplicarea în acustică a ultrasunetelor și aplicarea în câmp ultrasonic, este încă insuficient studiată, deși tehnologia aplicării acestora în sfera industrială, în contextul promovării unor tehnologii moderne, este esențială [47, 48].

6.5) Aspecte teoretice ale filtrării în câmp ultrasonic sunt prezentate [54] pentru aplicarea în câmp ultrasonic a ultrasunetelor într-un plan perpendicular pe direcția de propagare a lichidului. În acest caz se prezintă relații privind probabilitatea trecerii unei particule solide din suspensie prin orificiu-

ile membranei filtrante oscilante, în funcție de dimensiunea particulelor și diametrul unghiurilor cuneiforme ale membranei filtrante, cât și de raportul dintre viteza lichidului și viteza oscilatorie a membranei filtrante.

6.6) Referitor la filtrarea ciliară, în diferența constantă de presiune, pe care înălțările din literatură, s-a constatat necesară prezentarea unei metode generalizate a filtrării, și apoi ciliară, prin particularizare, sau scrierile caracteristice ale unor tipuri de filtrare care intervin în proces.

6.7) Referitor la metodele pentru identificarea tipului procesului de filtrare și raporturilor ciliar-licid, s-a prezentat în mod clar și prezentarea unei variante (6.7.3.0) și avantajelor, care implică o rezolvare practică și științifică.

6.8) Pentru identificarea tipului filtrării, în paragraful 6.8.6. se prezintă ca și ca exemplu al metodei care este în 6.8.6. și 6.8.6.

6.9) Pentru determinarea experimentale obținute pe o tehnologie constructivă în acest scop, în cadrul paragrafului 6.9.7 se identifică existența unei metode inovative de agitare a suspensiei, pentru care filtrarea se poate face lentă prin membrana filtrantă ciliară, sau prin metode diferite, ale unei metode ciliară de filtrare în suspensie. Pe de altă parte, se rezultă că, în cazul suspensiei, din cauza creșterii concentrației acesteia poate fi necesară agitare în timpul procesului de filtrare prin cele două metode. În concluzie, s-a stabilit că există o metodă concentrată, caracteristică suspensiei, pentru care filtrarea prin cele două metode se poate face lentă, chiar în condiții optime.

6.10) S-a conceput, proiectat și realizat prin autoritate, într-o variantă de filtrare prin filtrare ciliară, în scopul ultrasonice pentru suspensii ciliar-licid, caracterizată prin necesitatea membranelor filtrante ciliare în direcția de curgere a filtratului. Acest fapt a obligat la realizarea lucrării de studiu și proiectarea electrice pentru realizarea care intervin în funcționarea utilităților de filtrare și agitare ultrasonice, elemente prezentate în cap. 3.

6.11) Sistemul de filtrare ciliară prezentat în cap. 3.

nic cu concentratorul ultrasonic și membrana metalică filtrantă reprezintă blocul oscilator la frecvența cimpului ultrasonic și are rolul determinant în funcționarea filtrului. Pentru alegerea variantei corespunzătoare este necesar calculul electromagnetic al transductorului magnetostrictiv, precum și dimensionarea mecanică a concentratorului ultrasonic cu secțiune transversală variabilă. Relațiile prezentate în paragrafele 3.2.2. și 3.2.3. ale lucrării sînt generale și permit proiectarea blocurilor oscilatoare de acest tip. Programul de calcul pentru trasarea profilului exponențial al concentratorului ultrasonic compunează prezentarea relațiilor de calcul.

6.12) Realizarea standardului de laborator s-a făcut utilizînd materiale și aparate indigene, sau realizate prin autodotare, o problemă deosebită fiind aceea a existenței unui transductor electronic de semnale mecanice variabile care să permită identificarea rețaului de rezonanță a blocului oscilator[46].

6.13) Măsurătorile experimentale s-au efectuat pe intervale mari de timp și de aceea a fost necesară, în această etapă a cercetării, folosirea unor suspensii model în sensul păstrării constante în timp a proprietăților, pentru a exclude influența parametrilor variabili introdusi de suspensie.

6.14) În cadrul lucrării, în paragraful 5.2. s-a avut o explicație tehnologică originală privind evitarea aglomerării particulelor din imediata vecinătate de sub membrana filtrantă și omogenizarea volumică a suspensiei din întreg spațiul de sub membrana filtrantă, în prezența cimpului ultrasonic, care determină mărirea productivității filtrului. Aceste ipoteze au permis stabilirea modelelor matematice semiempirice ale filtrării în absența și în prezența cimpului ultrasonic.

6.15) Propagarea oscilațiilor prin suspensii vîscoase s-a analizat teoretic în două variante și anume: suspensii diluate și concentrate.

În cazul suspensiilor diluate, vîscozitatea cinematică poate fi considerată constantă în spațiul de sub membrana filtrantă; la suspensiile concentrate, vîscozitatea crește în timp, pe durata filtrării și ca urmare a implicat rezolvarea unei probleme deosebite, conducînd în final, printr-o rezolvare teoretică originală, la stabilirea relației generale (5.42).

6.16) Relațiile stabilite pentru modelele filtrării, paragraful 5.3. sînt originale și au fost confirmate prin comparare cu valorile obținute experimental.

6.17) Programul de calcul elaborat în limbaj BASIC pentru microcalculatorul II-86, permite identificarea parametrilor care intervin în expresiile modelelor matematice, are un caracter general și corespunde rezolvărilor actuale ale problemelor de acest tip.

6.18) Pentru suspensiile filtrate în câmp ultrasonic au rezultat în cazul lucrării productivități de peste două ori față de cele obținute în absența câmpului ultrasonic, ceea ce confirmă contribuția câmpului ultrasonic la intensificarea operației de filtrare.

6.19) Unele concluzii și relații teoretice, verificate experimental, completează alte soluții cunoscute din literatură privind filtrarea în câmp ultrasonic.

6.20) Filtrarea în câmp ultrasonic se înscrie în domeniul noilor tehnologii specifice ingineriei chimice moderne, implică rezolvarea unor probleme complexe și în acest context necesitatea unei colaborări interdisciplinare.

7. BIBLIOGRAFIE

1. Alt Chr., Internationales Symposium "Liquid-Solid Filtration", Chem.-Ing.Techn. 51(6), 688, (1979).
2. Alt Chr., Practical Problems in Choosing Filtration Process and Future Developments, In The Scientific Basis of Filtration, edited by K.J.Ives, Series E., vol.2 Noordhoff-Leyden, 1975, p.411.
3. Anza Gh., Barb D., Constantinescu Florica, Sisteme ultracustice, Bucuresti, Editura Tehnică, 1968.
4. Avertisian A.G., Arakelian V.C., Bagdasarian O.V., Dugolian A.K. O povedenii tiajeloi ciastiti v viaskoi jidkosti v pole steiacei ultrasvukovoi volni, Akust.Jurn. 31 (3), 385 (1985).
5. Răduanu E., Grumăzescu M., Ultracustica fizică și tehnică, Bucuresti, Ed. tehnică, 1967.
6. Bender W., Redecker D., Steiner K.H., Filtergeräte, Chem. Ing.Techn. 51 (12), 1177 (1979).
7. Bender W., Redecker D., Progrese in separarea mecanică a lichidelor prin filtrare. Chem. Ing. Techn. 53, 227 (1981).
8. Berlino E., Heits F., Filtration des liquides, Génie chim. 69 (2) 44 (1963).
9. Bernhardt C., Husemann K., Über das Erfahrungen zum Mikro-siebung mit ultraschall, Chem.Techn. 34(10)507, (1982).
10. Polek M., Matematicheskoe opisaniie nekotorih filtratsionnih professov dlia prakticheskikh rascetov, Him.prom. (3) 171 (1982).
11. Bratu M.A., Operații unitare in ingineria chimică, vol. II, Bucuresti, Ed. Tehnică, 1964.
12. Brown I.G., Reversible Filtration, Chem. Eng. Progr. 52, 236 (1956).
13. Buzdugan Gh., Fetcu L., Madeg M., Vibrațiile sistemelor mecanice, Bucuresti, Ed. Acad. RSR, 1975.
14. Cocheși V., Taubert Lidia, Polices Septimia, Nedeleanu Minodora, Șora Mariana, Kohn D., Bilog M., Crișan D., Contribuții privind filtrarea hidroxidului de magneziu, Al III-lea Congres Național de Chimie 21-24 sept. 1968, Bucuresti.
15. Cosma T., Filtrarea ultrasonică a soluțiilor chimice industriale, Lucrările celei de a IV-a Conferință națională de acustică, Bucuresti, 1973, vol. II, p. 193.
16. Crighton D.G., Interconecțiuni între acustica și mecanica fluidelor, J. of Fluid Mechanics, 106, 266 (1981).
17. Drăgan O., Iancu C., Anza Gh., Drimer D., Isarie I., Ultrasunete de mari energii, Bucuresti, Ed. Acad. RSR, 1983.

18. Edmonds P.D., Ultrasonics (Methods of Experimental Physics), vol.19, New York, Academic Press, 1981.
19. Elşin A.I., Formula dlia opisaniia zavisimosti soprotivlenia osadka ot koncentraţii filtruemoi suspensii, J.prikl.kim. 58(12), 2671 (1985).
20. Floarea C., Jinescu Gheorghita, Procesee intesive in operaţiile unitare de transfer, Bucureşti, Ed.Tehnică, 1975.
21. Fridman V.S. Ultrazvukovaiia himiceskaia apparatura, Moskva, Izd. Inzhinostroenie, 1967.
22. Gherşgal D.A., Fridman V.M., Aparate cu ultrasunete, trad. din lb. rusă, Bucureşti, Ed. tehnică, 1962.
23. Gherşgal D.A., Fridman V.M., Ultrazvukovaiia tehnologiceskaia apparatura, Moskva, Izd. Energie, 1976.
24. Gropşian Z., Sora Marians, Kohn D., Identificerea tipului procesului de filtrare a suspensiilor solid-lichid, Zilele Academice Timişoara, Timişoara, 25-27 mai 1989.
25. Harvey M.A., Bridger K., Tiller F.M., Apparatus for Studying Incompressible and Moderately Compressible Cake Filtration, Filtration and Separation 25 (1-2), 21 (1988).
26. Heertjes P.M., Filtration, Trans. Instn. Chem. Eng. 42(7), T266, (1964).
27. Heertjes P.M., Formation of Filter Cakes and Precoats, in "The Scientific Basis of Filtration", edited by K.L. Ives Series E., vol.2, Noordhoff-Leyden, 1975, p.297.
28. Hutto F.B., Distribution of porosity in filter cakes Chem. Eng. Progr. 53(7), 328 (1957).
29. Iatenko A.V., Vliianie akusticeskih kolebanii na proniknovenie jidkosti v kapilliarne kanali, Kolloid, jurn. 48(2), 390, (1986).
30. Jinescu Gheorghita, Procesee hidrodinamice şi utilaje specifice in industria chimică, Bucureşti, E.D.P., 1983.
31. Jujikov V.A., Filtrarea, trad. din lb. rusă, Bucureşti, Ed. tehnică 1962.
32. Jujikov V.A., Filtrovanie, Moskva, Izd. Himia, 1980.
33. Kardasev G.A., Sobolev V.D., Ciuraev N.V., Satalov A.L., Vliianie kolebanii na ureven jidkosti v kapilliare, Kolloid, jurn., 38(3), 461, (1976).
34. Karpaceva S.M., Kuratov V.L., Karachacev J.G., Untersuchung der Pulsationsregenerierung eines diskontinuierlicher Laborfilters, Chem. Techn. 35(7), 348, (1983).
35. Karpaceva S.M., Raghinski L.S., Horhorina L.P., Pribenenie pulsacionnoi tehniki dlia intensivizatii himiceskogo proizvodstva, J.prikl.kim. 59(9) 1955, (1986).

36. Kirk, R.E. și Othmer D.F., Encyclopedia of chemical technology, vol.10, Ed.3, Ed. Wiley-Interscience Publ. New York, 1980.
37. Kohn D., Moraru M., Sora Mariana, Medeleanu Minodora, Elejeiu S., Metode hidrodinamice de separare în procesul de recuperare a catalizatorilor usați, Bul. st. și tehn. I.P. Timișoara, seria Chimie, 33% (1988).
38. Korda P., Demontage tamisage et filtration par ondes sonores, Génie, Chim., 76(4), 109 (1956).
39. Le Lac P., Variations de perméabilité des gâteaux de filtration, Génie Chim., 87(3), 61 (1962).
40. Macarovici C., Gh., Analiză chimică cantitativă anorganică, București, Editura Acad. R.R., 1979.
41. Malinovskaia T.A., Razdelenie suspensii v promișlenosti organičeskogo sinteza, Moskva, Izd. Himia, 1971.
42. Malinovskaia T.A., Kobrinskii J.A., Kirsanov S.O., Reinfart V.V., Razdelenie suspensii v himičeskoj promișlenosti, Moskva, Izd. Himia, 1983.
43. Marinescu N.I., Prelucrări cu ultrasunete, B. Tehnică, București, 1986.
44. Massarani G., La généralisation de la loi de Darcy, Thèse de doctorat, Toulouse, 1971.
45. Mihai Mihaela, Floarea O., Kohn D., Sora Mariana, Moraru M., Operarea filtrării în condiții de rezistență minimă, Al III-lea Congres Național de Chimie, 21-24 sept. 1988, București.
46. Mititelu T., Sora I., Echipament electronic traductor de semnal mecanic variabil 18-30 kHz, M.E.I., Certificat de inovator, nr. 851/1988.
47. Mașui Takehisa, Nisino Mititeru, Ultrasvukovoe filtrovanie, MOL. 1988-26(1), 57-61 (jap), Ref. jurn. him. 19, 3, 1.77 (1989).
48. Morjakov V.I., Smirnov A.F., Ustroistvo dlia uskorennoi tonkoi filtrații jidkosti, Brevet de invenție 1.393.456 URSS, 24.10.83, Ref. jurn. him. 19, 3, 1.62 (1989).
49. Moraru M., Kohn D., Sora Mariana, Gabor Doina, Perfecționarea operațiilor de spălare-filtrare la fabricarea catalizatorilor de conversie a oxidului de carbon, de înaltă temperatură. Protocol la contractul cu C.I.T. Ch. Craiova, 1988.
50. Moraru M., Sora Mariana, Kohn D., Contribuții privind procesul de filtrare a unor mase catalitice, Al III-lea Congres Național de Chimie, 21-24 sept. 1989, București.
51. Nosov V.A., Ultrasvuk v himičeskoj promișlenosti, Gosudarstvennoe izdatelstvo tehničeskoj literatury URSS, Kiev, 1963.

52. Novitkii B.G., *Primenenie akusticeskikh kolebanii v himiko-tehnologiceskikh procesсах*, Moskva, Izd. Himia, 1983.
53. Oroveanu I., *Mecanica fluidelor viscoase*, Ed. Academiei, Bucuresti, 1967.
54. Pavlov G.F., Romankov P.G., Moskov A.A., *Procese si aparate in ingineria chimica, Exerciții și probleme*, trad. din lb. rusă, Bucuresti, Ed. Tehnică, 1981.
55. Paulescu Gh., *Contribuții la optimizarea tehnologiei de prelucrare dimensională cu unde ultrasonice a materialelor fragile și dure*, teză de doctorat, Timișoara, Fac. de Mecanică, 1987.
56. Purohas D., *A Practical View of Filtration Theory*, *Filtration and Separation*, 17(3-4), 147 (1980).
57. Kobel H., Gintzschel P., *Über ein Modellgesetz der Filtration und die Bestimmung der Filtrationsgeschwindigkeit auf grund von Durchringungsversuchen*, *Chem. Techn.*, 17(1), 16, (1965).
58. Kobel H., *Grundlagen zur funktionellen Berechnung von Apparaten und Maschinen für mechanischen Stoff-Trennung und-Vereinigung. Filter für Fest-Flüssig-Trennung*, Berlin, VEB Verlag, Technik, 1975.
59. Kobel H., Ruth G., *Theoretische Untersuchungen zur Durchströmung von Filterkuchen*, *Chem. Techn.*, 28(7), 404, (1976).
60. Rushton A., *Liquid-Solid Separation-Recent Research Evaluated*, *Filtr. and Separation* 13 (11-12), 573, (1976).
61. Laemann H., *Über die Filtration mit periodischer Rückspülung*, *Promotionsarbeit*, Zurich, Juris-Verlag, 1959.
62. Schlichting H., *Berechnung steter periodischer grenzschichtströmungen*, *Phys. Zeitschrift*, 33, 327, (1932).
63. Sidorev N.A., Lisanko G.V., Vodi V.E., *Sostoianie kolebliuzhishia jidkosti v prograniceinom aloe i sozdanie vibrofiltra*, *Voprosi himii i himiceskoi tehnologii*, Mاركov, 81, 58 (1986).
64. Straumann H., *Einfluss der Sedimentation auf die Filtration*, *Chem. Ing. Techn.*, 35(10) 715, (1963).
65. Sora Mariana, Nedeleanu Minodora, Kohn D., Koraru M., *Imbunătățirea filtrabilității hidroxidului de magneziu*, *Protecol la contractele de cercetare nr. 22/1985, 91/1986, 22/1987 cu Centrul de Chimie Timișoara*.
66. Sora Mariana, Kohn D., Grăjdeanu M., Sora I., Gligor M., *Filteru integrat cu ultrasunete*, M.B.I., Certificat de inovator nr. 900/1988.
67. Sora Mariana, Kohn D., *Intensificarea procesului de filtrare prin utilizarea cimpului ultrasonic*, Al III-lea Congres Național de Chimie, 21-24, sept., 1988, Bucuresti.
68. Sora Mariana, Sora I., *Elemente ale utilajelor electromecanice care folosesc cimpul ultrasonic pentru intensificarea operației de filtrare în sisteme solid-lichid*, *Simpozionul de Electroenergetică, Timișoara*, nov. 1988, vol. III, p. 13.

- 69) Şora Mariana, Kohn D., Recherches concernant la filtration des suspensions solide-liquide en présence du champ ultrasonique, *Bul. şt. şi tehn. al ITV Timişoara*, 34(1969).
- 70) Şora Mariana, David I., Contribuţii la stabilirea modelului matematic al filtrării în câmp ultrasonic, *Zilele Academice Timişene, Timişoara*, 24-27 mai, 1969.
- 71) Şora Mariana, Şora I., On Some Electromechanical Problems Concerning Equipments for the Intensification of the Solid-Liquid Suspensions Filtration in an Ultrasonic Field, A V-a Conferinţă Naţională de Tehnologie neconvenţională, Timişoara, octombrie 1969, p.284.
- 72) Şora Mariana, David I., Şora I., Theoretical and Experimental Contributions concerning productivity Increase of the Filtration Equipments in an Ultrasonic Field, A V-a Conferinţă Naţională de Tehnologie neconvenţională, Timişoara, octombrie, 1969, p.288.
- 73) Şora Mariana, David I., Cercetări privind influenţa viscozităţii mediului la filtrarea în câmp ultrasonic a suspensiilor solid-lichid, A IV Conferinţă de Chimie şi Inginerie chimică, Facultatea de Tehnologie chimică, Bucureşti, octombrie, 1969.
- 4) Tarleton E.S., How Electric and Ultrasonic Fields Assist Membrane Filtration, *Filtration and Separation* 25 (11-12), 402 (1980).
- 75) Tiller F.M., Compressible Cake Filtration, in the Scientific Basis of Filtration, edited by K.J. Ives, Series, E., vol.2, Noordhoff-Leyden, 1975, p.315.
76. Trawinski H.F., Current Liquid-Solid Separation Technology, *Filtration and Separation* 17 (7-8), 326, (1978).
77. Vauck W.A.R., Müller H.A., Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978.
78. Ward A.S., Solid Liquid Separation Technology - A work of Completeness and Maturity, *Filtr. and Sep.* 18 (9-10), 392, (1981).
79. Weinapach F.K., Hydrodynamisches Verhalten von Suspensionen im Rührgefäß, *Chem. Ing. Techn.* 41 (5-6), 260 (1969).
80. * * * Catalog I.C.R. Bucureşti, Piezuri de ferit. pentru conductoare, 1980.
81. * * * Notită tehnică: Generator de ultrasunete GUS-200, Institutul Politehnic Timişoara, S.P.C., 1966.
82. * * * Catalog Bruel & Kjaer, Instrumente pentru măsurători de sunet şi vibraţii, 1987.