

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC " TRAIAN VUIA " TIMISOARA
FACULTATEA DE CONSTRUCTII

Ing. Ioan Adrian Nicolae Retezan

CONTRIBUTII LA CALCULUL PROCESELOR HIDRODINAMICE
ALE TRATARII APEI CU OZON

- Teză de doctorat -

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMISOARA

CONDUCATOR STIINTIFIC,
Prof.dr.ing. CORNEL JURA

- Timisoara 1987 -

I N T R O D U C E R E

Asigurarea cantității și calității apei prin amenajări sistematice, amplificarea și perfecționarea continuă a instalațiilor de apă în centrele urbane, rurale, în industrie, în complexele agrozootehnice, constituie unul din obiectivele importante ale economiei naționale. Sistemele de alimentare cu apă sînt importante din considerenți de ordin social și economic deoarece contribuie direct la ridicarea standardului de viață, a gradului de confort, la asigurarea sănătății publice, precum și la realizarea sarcinilor de plan în economie.

Programul Partidului Comunist Român de înălțare a societății socialiste multilateral dezvoltate și înaintare a României spre comunism reflectă politica partidului în domeniul ridicării nivelului de trai al întregului popor și prin realizarea și dezvoltarea lucrărilor hidroedilitare. În acest context asigurarea și îmbunătățirea calității apei constituie o sarcină de mare răspundere pentru specialiști.

Obiectul principal urmărit în lucrarea de doctorat îl constituie introducerea treptei de ozonizare în cadrul tratării pentru a conferi apei calități superioare.

Pentru a fi utilizat, ozonul se prepară în cadrul stației de tratare a apei, necesitînd o gospodărie de gaz/aer care să-i confere calitățile cerute de procesul tehnologic, adică să fie curat, uscat și rece, un sistem de alimentare cu energie electrică care să furnizeze curentul electric cu tensiunea și frecvența cerută de sistemul constructiv al generatorului de ozon utilizat, precum și instalații de asigurare a contactului intim între masa apei de tratat și gazul ozonat furnizat de generator.

Producția de ozon este condiționată de caracteristicile fizice și chimice ale influentului, de caracteristicile gazului ozonat, de particularitățile constructive și funcționale ale contactoarelor folosite, precum și de locul ozonizării în schema generală de tratare a apei. Transferul de masă al ozonului în apă de tratat depinde de modul de realizare al contactorului care, pentru cele două faze gazoasă și lichidă, funcționează în contracurent sau în același sens, respectiv asigură difuzia gazului ozonat în apă, sau introducerea apei sub formă de picături în gazul ozonat. În funcție de aceste caracteristici, precum și de amenajarea ou sau fără material de umplură contactoarele de ozon se dimensionează stabili-

linduli-se caracteristicile geometrice.

Rezultatele studiilor teoretice și experimentale, întreprinse de autor, evidențiază posibilitatea și utilitatea realizării ozonizării apei cu rezultate superioare celor obținute prin utilizarea clorului.

Autorul exprimă profunđa recunoștință conducătorului științific, prof.dr.ing. Cornel Jura, pentru permanenta îndrumare și încurajare de care a beneficiat pe parcursul formării profesionale și a activității referitoare la teza de doctorat.

Pe această cale autorul mulțumește conf.dr.ing. Ion Miroș pentru sprijinul prețios ce i-a fost acordat în toată perioada de pregătire a doctoratului.

De asemenea autorul mulțumește colegilor din Catedra construcției hidrotehnice și îmbunătățiri funciare și din Colectivul instalațiilor în construcții din cadrul Catedrei drumuri fundații și instalații în construcții pentru sprijinul acordat în activitatea de cercetare, pentru discuțiile, observațiile și sugestiile în legătură cu tematica tezei.

Autorul aduce vii mulțumiri dr.ing. Vladimir Rojanschi, ing.Viorica Holban din cadrul Atelierului de alimentări cu apă al Institutului de cercetări și proiectări pentru gospodărirea apelor București, precum și conducerii Grupului de întreprinderi de gospodărie comună și locativă Timișoara, conducerii și personalului tehnic și muncitor din cadrul laboratorului fizico-chimic al uzinei de apă nr.2 Timișoara pentru sprijinul acordat în efectuarea măsurătorilor experimentale.

C U P R I N S

INTRODUCERE.....	3
Cap.1. GENERALITATI.....	7
1.1. Noțiuni introductive.....	7
1.2. Metode de dezinfectie; considerații și aprecieri.....	7
1.2.1. Agenți fizici de dezinfectie.....	8
1.2.2. Agenți chimici de dezinfectie.....	8
1.2.3. Metoda oligodinamică.....	11
1.2.4. Metoda biologică.....	11
1.3. Inceputurile și dezvoltarea proceselor de tratare a apelor cu ozon.....	12
1.4. Proprietățile ozonului.....	13
1.5. Acțiuni nocive ale ozonului în mediul ambiant.....	14
1.6. Istoricul folosirii ozonului în tratarea apelor.....	16
1.7. Oportunitatea introducerii ozonizării.....	19
1.8. Concluzii.....	22
Cap.2. CERCETARI ASUPRA CONDIȚIILOR DE APLICARE A OZONIZĂRII.....	24
2.1. Aplicarea ozonizării.....	24
2.1.1. Scheme principale de utilizare a ozonului.....	24
2.2. Gospodăria de gaz.....	26
2.2.1. Schimbătorul de căldură răcitor cu apă.....	30
2.2.2. Răcitorul frigorific cu gaz.....	30
2.2.3. Uscătorul desicant.....	30
2.2.4. Utilizarea oxigenului cu gaz de alimentare.....	32
2.3. Alimentarea cu energie electrică a generatorului de ozon.....	34
2.4. Generatoare de ozon.....	36
2.5. Contactoare de ozon.....	40
2.5.1. Elemente constructive și funcționale.....	40
2.6. Critica procedeelor de ozonare.....	42
2.7. Concluzii.....	45
Cap.3. CERCETARI PRIVIND OPTIMIZAREA PARAMETRILOR GAZULUI DE OZONAT.....	48
3.1. Filtrarea aerului.....	48
3.1.1. Filtrele ucate din țesături.....	49

3.1.1.1.	Gradul de separare.....	50
3.1.1.2.	Viteza de trecere.....	51
3.1.1.3.	Rezistența aerului.....	51
3.1.1.3.1.	Contribuții la alegerea materialului filtrant.....	53
3.1.1.4.	Debitul specific de aer al filtrului.....	55
3.1.2.	Filtre electrice.....	55
3.2.	Răciria aerului.....	59
3.3.	Uscarea aerului.....	61
3.3.1.	Fenomenul uscării aerului.....	64
3.3.2.	Regenerarea materialului adsorbant.....	70
3.3.3.	Căderea de presiune în instalația de uscare a aerului.....	75
3.4.	Concluzii.....	80
Cap.4.	STUDIUL ASUPRA GENERATORULUI DE OZON.....	83
4.1.	Tipuri de generatoare de ozon.....	83
4.1.1.	Generatoarele de ozon cu tuburi orizontale.....	83
4.1.2.	Generatorul de ozon cu tuburi verticale.....	84
4.1.2.1.	Generatorul de ozon cu tub vertical cu ră- cire cu apă.....	84
4.1.2.2.	Generatorul de ozon cu tuburi verticale și dublă răcire cu ulei și apă.....	86
4.1.3.	Generatorul de ozon cu plăci tip Otto.....	86
4.1.4.	Generatorul de ozon tip Lowther.....	87
4.1.5.	Generatorul de ozon realizat în România în două variante.....	88
4.2.	Caracteristici funcționale ale generatorului de ozon.....	88
4.2.1.	Proprietățile electrice ale elementului capacitiv.....	89
4.3.	Recomandări privind realizarea construcțiilor care adăpostesc generatoarele de ozon.....	90
4.3.1.	Măsurî tehnico-organizatorice.....	92
4.3.2.	Măsurî igienico-sanitare.....	93
4.4.	Concluzii.....	94
Cap.5.	CERCETĂRI PRIVIND STUDIUL CONTACTOARELOR DE OZON.....	96
5.1.	Clasificarea contactoarelor de ozon.....	96
5.1.1.	Forma contactoarelor după calitatea apei introduse.....	96
5.1.2.	Forma contactoarelor după circulația celor două faze.....	96
5.1.3.	Forma contactoarelor după modul de realizare și funcționare.....	97

5.1.4.	Forma contactoarelor după modul de realizare a contactului între gazul ozonat și lichidul de tratat.....	97
5.1.5.	Forma contactoarelor după realizarea constructivă.....	97
5.2.	Exemple de contactoare.....	98
5.3.	Introducerea gazului ozonat sub formă de bule în masa de apă.....	101
5.3.1.	Considerații teoretice privind procesul de transfer de masă gaz-lichid.....	101
5.3.2.	Transferul de ozon în masa de apă.....	105
5.3.3.	Considerații privind similitudinea transferului de masă.....	108
5.3.4.	Formarea bulelor de gaz.....	110
5.3.5.	Viteza și regimul de mișcare al bulei de gaz.....	115
5.3.6.	Considerații privind dispozitivul de formare a bulelor de gaz.....	116
5.4.	Introducerea apei sub formă de picături în atmosfera de gaz ozonat.....	117
5.4.1.	Transferul ozonului din gazul ozonat în apă.....	117
5.4.2.	Considerații privind hidrodinamica formării și mișcării picăturilor de apă.....	118
5.5.	Curgerea apei și a aerului ozonat prin structuri de umplutură.....	122
5.5.1.	Mărimi caracteristice ale materialului de umplutură.....	122
5.5.2.	Caracteristicile hidraulice ale curgerii.....	125
5.6.	Concluzii.....	131
Cap.6.	CECOCIPARI EXPERIMENTALE.....	135
6.1.	Studiul filtrului uscat din țesături.....	135
6.2.	Asigurarea procesului de uscare a aerului.....	137
6.3.	Etalonarea generatorului de ozon.....	139
6.4.	Experimentări privind eficiența tratării apei cu ozon.....	141
6.4.1.	Etapa 1961.....	141
6.4.1.1.	Interpretarea rezultatelor.....	148
6.4.2.	Etapa 1984.....	151
6.4.2.1.	Interpretarea rezultatelor.....	153
6.4.3.	Etapa 1987.....	155
6.4.3.1.	Interpretarea rezultatelor.....	156
6.5.	Pierderile de sarcină în contactorul tip prefiltru.....	159
6.6.	Concluzii.....	162

Cap.7. CONTRIBUȚII LA APPLICAREA EFICIENTĂ A OZONULUI ÎN TRATAREA APEI CU OZON.....	164
7.1. Parametrii procesului de producere a ozonului.....	164
7.2. Concentrația ozonului în gazele ozonizate.....	165
7.3. Influența dozei de ozon și a timpului de contact.....	167
7.4. Modificarea calității apei în contactorul de ozon.....	170
7.5. Dimensionarea contactoarelor de ozon.....	171
7.6. Aspecte economice ale tratării apei cu ozon.....	174
7.7. Concluzii.....	176
Cap.8. CONCLUZII FINALE.....	176
8.1. Concluzii generale.....	176
8.2. Contribuții personale.....	182
8.3. Direcții de cercetare viitoare.....	184
BIBLIOGRAFIE.....	185

C A P I T O L U L 1

GENERALITATI

1.1. Notiuni introductive

Sursele de apă potabilă care pot satisface cerințele actuale de calitate și cantitate sînt tot mai restrînse. Totodată sistemul de distribuție nu este întru-totul ferit de influențe exterioare nedorite. Rezultă că orice sursă de apă trebuie să aibă o stație de tratare cu dublu scop : corectarea caracteristicilor, respectiv tratarea preventivă. Cea mai simplă tratare se reduce la dezinfectia preventivă - aplicată sistemelor de alimentare cu apă locale din zonele de deal și munte - unde apa izvoarelor captate este clorată în vederea asigurării clorului remanent în rețeaua de distribuție. Dezinfectarea apei reprezintă una din problemele principale ale menținerii sănătății publice [30,13,33,108, 30,41, 42,56,81,110,123,132,158].

În tratarea apei, prin dezinfectare se înțelege procesul tehnic de reducere a numărului de microorganisme din apă sub limita admisibilă, astfel încît aceasta să nu fie dăunătoare organismului omenesc. Dezinfectarea apelor presupune și aspectele de neutralizare a substanțelor chimice dăunătoare pe lângă distrugerea totală a agenților patogeni : bacterii, viruși, chisturi.

1.2. Metode de dezinfectare : considerații și aprecieri

La apele de suprafață, la apele subterane de mică adîncime (care pot fi infectate direct prin infiltrarea apelor de scurgere de pe suprafețe), la apele de mare adîncime (care pe parcurs în contact direct cu anumite minerale pot deveni nepotabile), se impune dezinfectarea.

Dezinfectarea apei poate fi realizată prin una din următoarele metode [79,123,158] :

- metode bazate pe acțiunea agenților fizici: căldură, electricitate, raze ultraviolete, raze X ;
- metode bazate pe acțiunea agenților chimici: clorul, fluorul, ozonul, diclorul de clor, bromul, iodul, permanganatul de potasiu, etc ;

- metode oligodinamice bazate pe acțiunea bactericidă a ionilor metalelor grele : argint, cupru, etc. ;
- metode biologice bazate pe acțiunea membranei biologice realizată în acest scop.

1.2.1. Agenti fizici de dezinfectie

Acțiunea agenților fizici, ca și dezinfectanți, este violentă, de mare eficacitate, dar are o serie de aplicabilitate foarte restrânsă datorită unor dezavantaje remarcabile. Printre acestea se amintesc : un mare consum de energie, instalații complexe deosebit de costisitoare, aparatură de măsură și control de înaltă performanță tehnică, necesitatea asigurării unor măsuri deosebite de tehnica și securitatea muncii.

1.2.2. Agenti chimici de dezinfectie

Folosirea agenților chimici se bazează pe acțiunea lor puternic oxidantă. Este metoda cu cea mai largă răspândire datorită avantajelor pe care le oferă: acțiune rapidă, instalații relativ simple, eficacitate, siguranță.

Metoda dezinfectării apei cu clor are cea mai mare răspândire datorită simplității instalației și mai ales a costului de investiție, întreținere și exploatare redus. Cu toate aceste avantaje, reale, în alegerea agentului chimic de dezinfectare trebuie să ne ținem seama de dezavantajele folosirii clorului, dintre care semnalăm :

- reactivul (clorul) trebuie transportat de la unitatea producătoare la stația de utilizare pe distanțe mari, la noi în țară, medie de ca. 250 km, după cum reiese din relația:

$$D = \frac{\sum D_i G_i}{\sum G_i} \quad (1.1)$$

în care: D - distanța medie de transport a clorului, în km ;

D_i - distanța de la fabrica producătoare la stația de tratare, în km ;

G_i - cantitatea de clor livrată stației de tratare, în tone.

Transportul clorului se face sub formă lichidă, imbuteliat la presiuni de 6..8 at, (deoarece la presiunea atmosferică și la temperaturi mai ridicate decât -33°C se prezintă sub formă de gaz, de

culoare slab galben - verzui , cu densitatea de 2,5 ori mai mare ca cea a aerului [30,108] ,fapt care impune un important consum de carburanți.De asemenea se impun condiții speciale de siguranță a circulației.

Tot legat de transportul clorului se ridică problema ritmicității în aprovizionare, îngreunată (uneori condiționată) de alterarea vremii, sau de necesarul de clor datorat modificărilor (defavorabile) ale calității apei de tratat-în special pentru apa de suprafață, și mai ales în cazul viiturilor pe cursurile de apă:

- necesitatea asigurării unei amestecări perfecte a influențelor cu soluția de tratat ;
- timpul de contact (pentru asigurarea reacțiilor) relativ mare, de cel puțin 30 minute ;
- insuficiența acțiunii clorului asupra virusului poliomyelitelor, ghizturilor, ouălor de lambii și a lambiilor , precum și asupra culorii apei ;
- formarea de compuși chimici stabili (clorfenoli spre exemplu) în apă care-i conferă acestora gust și miros neplăcut ;
- acțiunea corosivă asupra componentelor metalice cu care vine în contact ;
- prin compușii secundari din apă rezultați în urma reacțiilor lor favorizează apariția și declanșarea unor boli hepatice ale aparatului digestiv și de piele[33,64,108] ;
- se necesită dechlorarea apei prin tratare cu amoniac, sau filtrare de cărbune activ, operații care-i măresc costul.

Folosirea clorului cu agent chimic dezinfectant are ca efect secundar - pozitiv - consolidarea smalțului dentar, și deci prevenirea cariilor. Ca și dezavantaj major se semnalează faptul că clorul necesită o dozare extrem de riguroasă și precisă, folosirea dozelor mai mici îl fac ineficient, iar a celor mai mari îl fac toxic pentru organism.

Bioxidul de clor - a fost descoperit în 1811 de Humphrey Davy, dar abia în 1930 a început să fie preparat la scară industrială [108]. Pentru prima oară a fost folosit în procesul de potabilizare al apei la uzina nr.2 din New York, în 1944, în scopul îmbunătățirii gustului și mirosului datorat produșilor de fenoli [4,41,62,64,76,97,125,130,132] .

Bioxidul de clor în contact cu apa își schimbă culoarea tre-

cînd de la galben-verzui în roșu-orange. Este solubil în apă numai sub presiune; la temperatura de 20°C și suprapresiunea (presiunea parțială) de 40 mm col.Hg, solubilitatea în apă a bioxidului de clor este de cca. $3,1 \text{ g/dm}^3$. Este de cca. 5 ori mai solubil decît clorul gazos.

Densitatea bioxidului de clor este de 2,4 ori mai mare decît a aerului. Are greutatea moleculară 67,5 u.a.m.

Bioxidul de clor este foarte volatil, de aceea trebuie pus în operă rapid fără a fi în contact cu aerul. Are un miros caracteristic, neplăcut, este sesizabil la concentrații de 17 g/m^3 aer. Este iritant pentru căile respiratorii la o concentrație de 45 g/m^3 în aer. La concentrații de 11% este exploziv [108].

Demn de semnalat este faptul că bioxidul de clor distruge compușii pe bază de fenol (clorfenolii), contribuind astfel la îmbunătățirea gustului și mirosului apei tratate. Are o acțiune oxidantă mai rapidă și este mai eficient decît clorul [45,42,70, 132].

Soluția de bioxid de clor este sensibilă la lumina naturală (și ultravioletă), degradîndu-se, implicit scăzînd eficiența reactivului. Totodată se semnalează, ca aspect negativ al folosirii ClO_2 în procesul de potabilizare, incertitudinea referitoare la asigurarea sănătății publice datorită ionului ClO_2^- din apa tratată (deficiență semnalată și la folosirea clorului [108, 120, 172]).

Permanganatul de potasiu are o acțiune oxidantă relativ redusă în comparație cu ceilalți agenți chimici. Se utilizează în special ca agent de preoxidare, în procesele de potabilizare a apei fiind urmat de clorinare. Permanganatul de potasiu are dezavantajul colorării apei, fenomen ce trebuie evitat sau înlăturat.

Folosirea ozonului ca reactiv chimic la dezinfecție reprezintă o metodă modernă care conferă procesului o maximă eficiență și siguranță.

Ozonul nu produce la locul de punere în operă, în felul acesta dispărînd inconvenientele legate de transport.

Fiind un oxidant foarte puternic, și din cauză că multe impurități (majoritatea) din apele brute sînt oxidabile, ozonul poate fi folosit în procesele de tratare a apelor (potabilizare

sau epurare) pentru mai multe scopuri/aplicații [39,41,62,65,108, 129]. Acționează astfel :

- a) dezinfecția bacteriologică ;
- b) inactivarea/sterilizarea virusurilor și chisturilor;
- c) oxidarea fierului și/sau manganului solubili ;
- d) oxidarea fierului și manganului legați organici ;
- e) îndepărtarea/suprimarea culorii apei ;
- f) acțiunea de suprimare a gustului și mirosului apei ;
- g) suprimarea prin oxidare a algelor ;
- h) înlăturarea substanțelor organice greu dizolvabile , cum sînt : pesticidele, detergenții, fenolii ;
- i) oxidarea și înlăturarea cianurilor ;
- j) stimularea floculării ;
- k) consumarea substanțelor organice ;
- l) pregătirea carbonului granular activat pentru îndepărtarea biologică a amoniacului.

Deși prima utilizare a ozonului în potabilizarea apei a fost dezinfecția (distrugerea bacteriilor patogene, inactivarea virusurilor și chisturilor), astăzi aplicațiile oxidabilității ozonului se consideră pentru un important și crescînd număr al întrebunțurilor simultane. În acest sens practica a evidențiat unele "efecte secundare" ale acțiunii ozonului în potabilizarea apei, spre exemplu, ozonul este întrebunțat pentru suprimarea culorii, dar se constată și o importantă dezinfecție. Gazul remanent (reziduu) din contactoarele de ozon închise poate fi recuperat și folosit pentru îmbunătățirea procesului general de tratare, prin recirculare, contribuind la oxidarea fierului și/sau manganului, stimularea floculării, etc.

1.2.3. Metoda oligodinamică

Acțiunea bactericidă a ionilor metalelor grele era cunoscută din antichitate (băuturile, și apa în special, se puneau în recipiente de argint și cupru). Aplicarea modernă a acestei metode însă, necesită instalații complicate, mare consum energetic și costisitoare, în plus, prin pierderile de metal.

1.2.4. Metoda biologică

Membrana biologică a filtrelor lente, are o acțiune bacto-

rici dă, remarcabilă. Folosirea acestei metode biologice nu necesită energie suplimentară și nici intervenția personalului pe durata de funcționare, ci doar o supraveghere, în ideea asigurării funcționării normale a filtrului. Când filtrul lent trebuie scos din funcție și spălat și membrana biologică se distruge. Ea are, însă, proprietatea de a se forma relativ repede în partea superioară a filtrului, deci amorsarea procesului de filtrare-dezinfectie, se produce într-un interval de timp mic, dacă o raportăm la timpul dintre două spălări.

Dezavantajul (hotărâtor) al acestei metode îl constituie necesarul deosebit de mare de teren pe care să se desfășoare instalațiile, motiv pentru care metoda (altfel foarte bună) este abandonată în prezent pentru sistemele mari de alimentare cu apă.

1.3. Începuturile și dezvoltarea proceselor de tratare a apei cu ozon

Primul care a sesizat ozonul, prin manifestările acestuia, a fost cercetătorul olandez Van Marum, care, în 1785, a observat că aerul din jurul unei mașini electrostatice capătă un miros caracteristic când este trecut printr-o succesiune de scinte electrice. Același miros l-a sesizat și Cruickshank, în 1801, la gazul format la anod în timpul electrolizei apei. Numai în 1840 Schonbein atrage atenția că acest miros se datorește unei noi substanțe, pe care o denumește OZON, cuvânt derivat din grecescul "ozein" care înseamnă miros. Schonbein, de asemenea, a fost primul cercetător care a sugerat că ozonul poate fi găsit în stare naturală în atmosferă [108,141].

Prepararea ozonului, urmărind acest scop, și nu ca efect secundar al altor procese, se realizează în a doua jumătate a secolului XIX de către Werner Von Siemens în Germania, Brodie în Anglia și Bertholot în Franța.

Actuala construcție a generatorilor de ozon, cu descărcări electrice, s-a dezvoltat pe baza concepției de realizare-proiectare a aparatului lui Siemens, din 1857. Primul ozonizor Siemens a constat, în esență, din două tuburi coaxiale din sticlă, cel din afară învelit la exterior și cel dinăuntru învelit în interior cu o folie de staniu, ca electrozi (vezi fig.1.1), iar prin spațiul dintre electrozi circulând gazul de alimentare, adică aerul

[108,141].

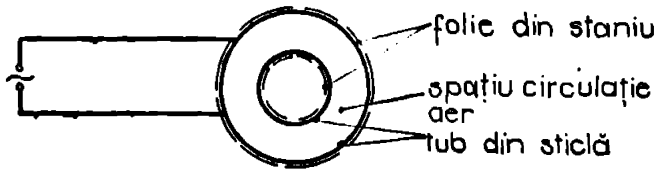


Fig.1.1.Schema de principiu a ozonizorului Siemens.

Tipul generatorului de ozon Siemens s-a perfecționat ca tehnologie în vederea asigurării parametrilor de producție și rentabilitate, diversitatea datorându-se, în special, sistemului de cire, păstrând însă principiul funcțional de bază: descărcarea electrică radială, care necesită tensiuni și frecvențe înalte, degajând astfel o căldură considerabilă. Răcoirea, deci, se impune cu necesitate în scopul obținerii de randamente maxime cu minimum de energie.

1.4. Proprietățile ozonului

Ozonul este un gaz albastrui, instabil, care în condiții normale, la temperatura de 0°C și presiunea atmosferică are densitatea de 2,143 kg/m³, punctul de fierbere de -110,5°C, punctul de lichefiere de -251,4°C. Ozonul are un miros pătrunzător, caracteristic, ușor detectabil la concentrații foarte mici, de 0,01...0,1 g/m³.

Ozonul este parțial solubil în apă. Solubilitatea în apă a ozonului se utilizează (foarte des) sub forma coeficientului de repartizare k_r :

$$k_r = \frac{C_a}{C_g} \quad (1.2)$$

și reprezintă, la echilibru de dizolvare, raportul dintre concentrația ozonului din apă C_a și concentrația ozonului în gazul ozonat difuzat C_g , în aceleași condiții de temperatură și presiune.

Valoarea maximă admisă de literatura de specialitate pentru k_r este de 0,66 (de 20 ori mai mare ca cea pentru oxigen). Diferenți autori au propus diferite valori pentru k_r , dar sînt unanimi

în aprecierea că solubilitatea în apă scade cu creșterea temperaturii.

Cele mai raționale valori ale coeficientului de repartizare ale ozonului, oxigenului și azotului, la temperatura de 20°C și presiunea atmosferică (760 mm col Hg) sînt:

$$k_r \text{ ozon} = 0,21...0,38$$

$$k_r \text{ oxigen} = 0,0333$$

$$k_r \text{ azot} = 0,0166$$

Ozonul este un oxidant foarte puternic, avînd un potențial de oxidare remarcabil, de -2,07 V (față de cel al clorului de numai -1,36 V), motiv pentru care ar putea fi considerat drept o substanță periculoasă, fiind capabil să oxideze multe tipuri de substanțe organice, inclusiv țesutul corpului omenesc [41, 108].

Amestecurile ozon-aer cu concentrații de 15...20%, sau mai mari sînt explozive. Dar, la concentrații relativ mici, cum rezultă din generatoarele de ozon, rentabile funcțional, de 1...3%, pentru aerul ozonat și de 2...6% în cazul oxigenului ozonat, nu există pericolul producerii exploziilor [108].

În soluțiile apoase ozonul este relativ instabil, avînd în apa distilată de 20°C un timp de descompunere mic, adică o stabilitate scăzută, de numai cca. 20-30 minute. Stabilitatea ozonului este invers proporțională cu temperatura, adică la temperaturi scăzute îi crește stabilitatea, și invers. Dacă însă, în soluție se află materiale/substanțe oxidabile, stabilitatea ozonului se reduce proporțional cu aceste cantități "impurificatoare".

În aer, și în special în aerul uscat, stabilitatea ozonului este cu mult mai mare decît în apă. Măsurătorile efectuate de Agenția de Protecție a Mediului Inconjurător a SUA au determinat stabilitatea ozonului în mediul ambiant, considerînd-o de ordinul a 12 ore. De aceea este necesar ca spațiile și incintele unde ozonul se poate degaja să fie foarte bine ventilate pentru a evita orice fel de efect dăunător asupra organismului uman [108].

1.5. Acțiuni nocive ale ozonului în mediul ambiant

Acțiunea ozonului asupra organismului uman depinde de :

- concentrația sa în mediul ambiant (în aerul inhalat), și
- rezistența organismului.

Ozonul pătrunde în organism la nivelul căilor respiratorii unde nu poate fi integral consumat din cauza timpului foarte scurt și deci, într-o anumită doză -foarte slabă- ajunge la nivelul alveolelor putînd astfel acționa asupra sîngelui [60].

Utilizările ozonului (pînă în prezent) din medicină, datorită caracteristicilor sale, sînt:

- acțiune respiratorie, în particular acțiune antispasmodică; se utilizează în doze mici în tusea convulsivă și în astm;
- folosirea în tulburările de nutriție, în gută și reumatism datorită calității de mărire a cantității de uree în urină și măririi diurezei;
- se practică în tratamentul obezității sub formă de vapori ozonizați;
- acțiune cicatrizantă, datorită proprietăților sale bactericide excepționale [42,60,142].

În anumite condiții, cînd se depășește concentrația maximă admisă (C.M.A. = 0,1..0,2 mgO₃/m³ aer), poate provoca intoxicații:

- ușoare, caracterizate prin una sau mai multe din simptomele: iritarea mucoaselor (nazale și a bronhiilor), a ochilor (conjunctivite), cefalee, amețeli, tendință de somn;
- grave, manifestate prin jenă respiratorie, urmată de edem pulmonar și comă;
- cronice, caracterizate prin cefalee, amețeli, crampe stomacale, dispnee, astenie - produsă după toleranța personală a indivizilor.

Se pare că o expunere de 3..4 minute totalizînd 3..4 ore pe săptămînă la doze de 0,1...1 mgO₃/m³ aer ar produce cronizarea acțiunii ozonului asupra organismului uman.

În funcție de concentrația în aer a ozonului și de timpul de expunere, efectele acestuia asupra organismului omenesc sînt:

- decelarea mirosului de ozon la concentrații de 0,01... 0,05 mgO₃/m³ aer;
- miros sensibil, la 0,1 mgO₃/m³ aer;
- arsură nazală, la concentrații de 1,3 mgO₃/m³ aer inhalat timp de 20 minute;

- tuse și arsură în gât, la concentrații de $2 \text{ mgO}_3/\text{m}^3$ aer inhalat timp de 5 minute ;
 - miros supărător, la concentrații de $4 \text{ mgO}_3/\text{m}^3$ aer ;
 - accidente grave, la concentrații de $10 \text{ mgO}_3/\text{m}^3$ aer.
- Aoțiunea toxică a ozonului asupra organismului omeneasc,

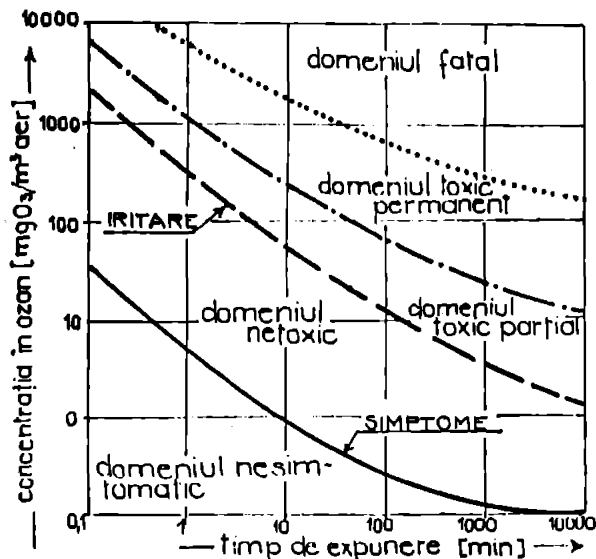


Fig.1.2.Toxicitatea ozonului în mediul ambiant.

după Evans [41], concentrat și schematizat este prezentată în graficul din figura 1.2.

Din graficul acesta se observă că expunerea de lungă durată în mediu ambiant cu ozon, chiar în concentrații mici, poate deveni dăunătoare pentru organism. De aceea perfectă ventilare a încăperilor unde se lucrează cu gaz ozonat este o măsură obligatorie, iar aspectul protecției muncii din acest punct de vedere capătă valențe deosebit de importante.

1.6. Istoricul folosirii ozonului în tratarea apelor

Primele experimente de folosire a ozonului ca germicid au fost efectuate în anul 1886 în Franța sub conducerea lui Meritens, demonstrând că aerul cu o concentrație relativ redusă de ozon asigură sterilizarea apelor impurificate. Cîțiva ani mai tîrziu,

în 1981, proprietățile bactericide ale ozonului au fost evidențiate pe o stație de pilot la uzina de apă din Martinkensfeld (o parținând firmei Siemens-Halske) de către Erlolich [141,108].

Prima uzină de apă potabilă care a utilizat ozonul în tratare (dezinfecție), în anul 1893, a fost cea construită la Oudshoorn (Olanda) [108,141], urmînd fluxul tehnologic prezentat în figura 1.3.

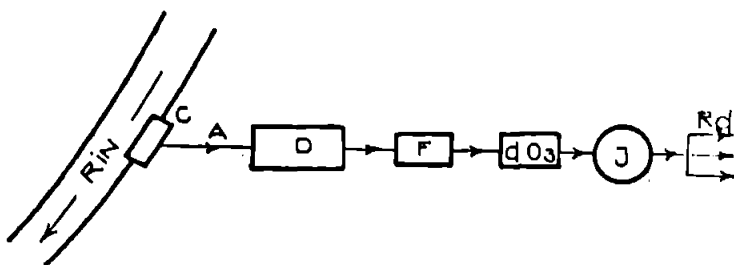


Fig.1.3. Uzina Oudshoorn - flux tehnologic.
C- captare, A- aducțiune, D- decantare,
F- filtrare, d.O₃- dozinfecție cu ozon,
I- înmagazinare, R.d- rețea de distribuție.

Următoarele uzine de tratare a apei utilizînd ozonul au fost realizate în Germania de firma Siemens -Halske, la Wicobad în 1901, și Paderborn în 1903 [108].

La solicitările municipalității orașului Nisa, frecvent confruntat cu ororile epidemiilor, un grup de medici francezi studiat efectul ozonizării în tratarea apei la uzina de la Oudshoorn (Olanda). Studiile și cercetările au continuat, apoi în Franța pe stații pilot la Paris (St.Maur) și la Lille. Avînd ca bază rezultatele experimentărilor și testărilor efectuate, în 1906 a început să funcționeze la Nisa prima mare uzină de tratare a apei pentru potabilizare utilizînd ca agent de dezinfecție ozonul, uzina Bon Voyage, care prelucra 19000 m³/zi [94,7,142].

Din cauză că ozonul este utilizat în procesul de potabilizare a apei fără întrerupere la Nisa, de cînd Bon Voyage a început să funcționeze (anul 1906), Nisa este recunoscut ca "locul de naștere" al ozonizării pentru tratarea apei în scopul potabilizării.

De atunci, datorită eficienței și siguranței dezinfecției

525.207
182.F

cu ozon, procedeul a fost utilizat în mai multe țări europene, astfel că în 1916 erau 49 asemenea uzine având o capacitate totală de aproape 320.000 m³/zi. Din cele 49 de uzine de potabilizare a apei utilizând ozonul, 26 au fost realizate în Franța.

Până în 1940 acest număr a crescut la 119 uzine, localizate după cum urmează :

Aria de răspândire a uzinelor de apă utilizând ozonul, la nivelul anului 1940.

Tabelul 1.1.

Franta	90
Italia	14
Belgia	5
Anglia	4
ROMANIA	3 (Brăila, Turnu Severin, Sulina)
U.S.A.	2
U.R.S.S.	1

În prezent sînt în funcțiune peste 1000 uzine de apă care folosesc în procesul potabilizării ozonul, cu unul sau mai multe scopuri, după cum urmează:

Aria actuală de răspândire a uzinelor de apă utilizând ozonul.

Tabelul 1.2.

Franta	593	U.R.S.S.	4
Elveția	150	Japonia	4
R.F.G.	136	Norvegia	3
Austria	42	Suedia	3
Canada	23	ROMANIA	2 (Huși și Rîmnicu Vîlcea)
Anglia	18	Algeria	2
Olanda	12	Bulgaria	2
Belgia	9	Mexic	2
Polonia	6	Siria	2
Spania	6	Ungaria	1
S.U.A.	6	Cehoslovacia	1
Italia	5	Ș.a.m.d.	

Pentru a urmări comparativ situația implementării proceselor de potabilizare cu treaptă de ozonizare în diferite țări, se prezintă în tabelul 1.3 [185] numărul instalațiilor de ozonizare raportate la 1 milion locuitori :

Gradul de tratabilitate al
apelor potabile cu ozon.

Tabelul 1.3.

Elveția	24	Suedia	0,37
Franța	11	Anglia	0,32
Austria	6	Polonia	0,18
R.F.G.	2	Spania	0,17
Canada	1	Italia	0,09
Olanda	0,92	Japonia	0,04
Belgia	0,90	U.R.S.S.	0,02
Danemarca	0,80	U.S.A.	0,02
Norvegia	0,75	ș.a.m.d.	

Cele mai mari uzine de apă care folosesc ozonizarea în procesul tehnologic sînt cele din Moscova (funcționînd din 1969) care tratează un debit de apă de 1.200.000 m³/zi, avînd o producție de ozon de cca. 200 kg/h, doza medie de ozon fiind de 4 g/m³ [108] și din Montreal (uzina Charles J. des Bailleurs), avînd debitul instalat de 2.300.000 m³/zi, producția de ozon de cca 300 kg/h, doza medie de ozon de 3,12 g/m³ [35,104,108] .

1.7. Oportunitatea introducerii ozonizării

Etape actuală de dezvoltare în ritm înalt a întregii vieți economice din țara noastră impune, prin documentele de partid și de stat, prin apelurile secretarului general al Partidului Comunist Român, președinte al Republicii Socialiste România, tovarășul Nicolae Ceaușescu, ridicarea pe trepte calitativ superioare a întregii activități din toate sectoarele de producție.

Producția de apă potabilă se circumscrie efortului întregului popor de ridicare pe noi culmi de bunăstare și civilizație. În acest context asigurarea unui factor de confort sporit conferit apei prin asigurarea calității superioare - pentru aceleași caracteristici ale influentului - justifică introducerea procesului de ozonare în potabilitatea apelor.

Utilizînd metoda de dezinfecție cu clor (analizată succint

in paragraful 1.1) efectele tratării nu sînt mulțumitoare, și din cauza gustului și mirosului neplăcut ce persistă în apă după tratare, caracteristici cu o accentuare îngrijorătoare, pentru cursurile de suprafață, în perioadaviiturilor (cca 10-15 pe an) se impune, deci luarea în considerare și a altor metode. Metoda ozonizării, prin avantajele care le prezintă (eficiență, siguranță, efecte multiple) trebuie luată în considerare.

Clorinarea în procesul de potabilizare se realizează într-o treaptă (postclorinare), asigurînd totodată și clorul remanent pentru rețea, sau în două trepte (preclorinare și postclorinare). În cazul uzinei de apă nr.2 a municipiului Timișoara (de exemplu) s-a adoptat cea de a doua soluție asigurîndu-se dezinfectia, reducerea substanțelor organice și clorul rezidual pentru rețea. Dar acesta din urmă (clorul remanent) prezintă variații ale concentrației în rețea în funcție de:

- distanța punctului de recoltare față de sursă, cu cît punctul de recoltare este mai îndepărtat de sursă, cu atît concentrația clorului remanent scade ;
- momentul recoltării - cînd consumul este mai mare, acesta atrage după sine micșorarea timpului dintre folosirea clorului și consumul apei, deci a timpului de contact și ca urmare cantitatea de clor remanent măsurată este mai mare ;
- încărcarea influentului - dozele de clor se măresc cînd condițiile de calitate ale apei brute se înrăutățesc.

Diminuarea cantității de clor remanent din apă în funcție de distanța parcursă de aceasta de la sursă și în funcție de momentul recoltării probei se explică atît prin agresivitatea acestuia față de părțile metalice ale rețelei de distribuție (conducte și armături) cît mai ales prin consumul suplimentar din reacțiile cu substanțele organice greu disociabile, compuși pe bază de azot, etc. Dacă aceste elemente ar fi reduse, lucru pe care ozonul îl realizează, consumul de clor pentru asigurarea clorului rezidual ar scădea.

De asemenea, doza de clor pentru asigurarea clorului rezidual ar putea fi, practic, constantă în situația utilizării ozonului ca agent de dezinfecție.

Acțiunea ozonului de agent puternic oxidant se manifestă

global, depinzînd de calitatea influentului. Deci ozonul acţionează simultan asupra tuturor factorilor impurificatori din apa de tratat, desăvîrşirea acţiunii oxidante asupra unuia sau altuia din aceşti factori depinzînd numai de timpul de contact asigurat. De aceea folosirea ozonului pentru un anumit scop este, practic, imposibilă.

Timpul de contact se determină în funcţie de scopul urmărit prin ozonizare, iar doza se stabileşte experimental în funcţie de calitatea influentului, între cei doi parametri existînd o condiţionare reciprocă.

Ținînd seama de efectele multiple ale ozonului în tratarea apelor, utilizarea acestuia s-a extins (vezi paragraful 1.3) apreciindu-se aplicabilitatea acestei metode moderne și mai ales eficiența ei.

Acțiunea ozonizării și deci efectul acestui proces depind de schema tehnologică a tratării în ansamblu a apei. Unul din cele mai importante aspecte ce trebuie transpus în practică (pe lângă aplicarea ozonării) este acela al aplicării multiple a ozonării, în felul acesta investiția cu introducerea ozonării pe metru cub apă tratată scade, în condițiile asigurării aceleiași calități a apei livrate.

Referirea la calitatea apei rezultate în urma procesului de tratare este obligatorie, acesta constituind termenul de comparație major al procedeelor tehnologice utilizate.

Datorită activității umane complexe factorul de poluare a surselor de apă sporește necontenit, fie că este vorba de apele subterane, fie că este vorba de cele de suprafață. Drept consecință tratarea devine tot mai dificilă, respectiv menținerea categoriei de calitate a surselor este asigurată tot mai greu. Introducerea treptei terțiale și folosirea ozonului la stațiile de epurare contribuie la ameliorarea calității apei în emisari. Dar impurificarea surselor de apă nu se datorește numai deversărilor, ci și poluării atmosferice și folosirii îngrășămintelor agricole artificiale. Ca atare și în potabilizarea apelor este necesară sporirea atenției și folosirea de mijloace energice de tratare, utilizarea ozonului fiind o soluție.

Din cele menționate în paragraful 1.1 reiese eficiența superioară a tratării cu ozon a apelor decât cu alți reactivi chi-

mici. Prin utilizările actuale se demonstrează că folosirea ozonului în procesele de tratare ale apei reprezintă o metodă modernă, eficientă, care s-a afirmat prin calitățile sale.

Dar, trebuie subliniat faptul că ozonizarea nu este "soluție miraculoasă" care rezolvă problemele tratării apei. Aceasta trebuie folosită cu discernământ și numai după studii, testări și măsurători atente și competente în laborator și pe stații pilot.

Nu trebuie acreditată ideea că ozonizarea ar fi scumpă în comparație cu celelalte metode chimice deoarece calitățile apei tratate diferă. De asemenea, pînă acum costul ozonizării era calculat fără a ține seama de toate aspectele pozitive pe care le implică, motiv pentru care metoda nu s-a bucurat de atenția cuvenită.

În viitor, cînd urmare a politicii înțelepte a partidului și statului nostru centralele electrice nucleare vor mări potențialul energetic de bază, astfel încît introducerea treptei de ozonizare în tratarea apelor poate deveni o soluție general aplicabilă, cînd bineînțeles, calitatea cerută apei o impune.

Trebuie să ținem seama de stadiul actual al tehnologiei de tratare a apei la stațiile existente la noi în țară, de calitatea apei produse, iar acolo unde se impune îmbunătățirea calității (gust, miros, culoare, conținut de substanțe organice, viruși, chisturi) să luăm în considerare posibilitatea grefării treptei de ozonizare în fluxul tehnologic existent [29,134] aceasta putîndu-se realiza în condiții economice avantajoase.

1.8. Concluzii

1. Dezinfecția apei se impune a fi realizată pentru toate sistemele organizate de alimentare cu apă, reprezentînd una din problemele principale de menținere a sănătății publice.
2. Agenții chimici de dezinfecție au cea mai răspîndită arie de aplicabilitate datorită avantajelor pe care le prezintă: acțiune rapidă, instalații relativ simple, eficiență, siguranță. Ozonul este un oxidant foarte puternic, avînd un potențial de oxidare remarcabil $+2,07V$, are efecte multiple asupra apei de tratat. Ținînd seama de dezavantajele utilizării clorului (potențial de oxida-

re : -1,36V) în tratarea/potabilizarea apelor, și de avantajele folosirii ozonului, acestea câștigă o tot mai mare arie de aplicabilitate. Calitatea apei tratate cu ozon este superioară celei tratate cu clor.

3. La compararea proceselor și procedeelelor de tratare ale apei referirea la caracteristicile calitative este obligatorie, acestea constituind termenul de comparație major, responsabil în menținerea sănătății publice.
4. Utilizările actuale ale ozonului în tehnica tratării apelor demonstrează că treapta de ozonizare reprezintă o metodă modernă, eficientă, care se impune tot mai mult datorită efectelor pozitive pe care le asigură. Dar, ozonizarea nu trebuie să fie privită ca o soluție absolută, capabilă să rezolve orice problemă a tratării apelor și trebuie să fie folosită cu discernământ și numai după studii, testări și măsurători atente și competente în laborator și pe stații pilot.
5. La stabilirea costului ozonizării se impune a lua în considerare calitatea apei rezultate, ținând seama de toate aspectele pozitive pe care le generează.
6. La stațiile de tratare existente unde se impun măsuri pentru îmbunătățirea calității apei produse, în special, pentru corectarea gustului, mirosului sau culorii, sau pentru reducerea substanțelor organice, ori pentru distrugerea totală a virusilor, chisturilor, etc., se recomandă studierea posibilităților de grefare a treptei de ozonizare în fluxurile tehnologice în funcțiune.
7. Aspectele noi ale cercetării condițiilor generale de apariție a proceselor de ozonare constau în critica procedeelelor și agenților de dezinfecție, cu indicarea distanței în medii de transport a clorului, indicarea efectelor respective a scopurilor în care poate fi folosit ozonul în cadrul tratării apelor, semnalarea efectelor negative ale ozonului scăpat în mediul ambiant, precum și în abordarea problemei oportunității introducerii ozonizării.

C A P I T O L U L 2

CERCETARI ASUPRA CONDIȚIILOR DE APLICARE

A OZONIZARII

(2.1.) Aplicarea ozonizării

Datorită multiplelor sale acțiuni în prezent ozonul are o arie de răspândire considerabilă. Este folosit, în tehnica hidroedilitară, la tratarea apelor în uzinele de potabilizare, la stațiile de epurare, la bazinele de înot, etc. În toate cazurile eficiența sa tehnică este remarcabilă rezultând o apă de calitate superioară [9, 14, 16, 23, 39, 44, 63, 68, 73, 90, 108, 130, 141, 150].

Pentru a asigura o eficiență maximă procedeului, sînt necesare, înaintea proiectării ansamblului sistemelor de tratare, studii de laborator și testări pe stații pilot.

2.1.1. Scheme principale de utilizare a ozonului

Pentru a putea fi utilizat ozonul trebuie produs și apoi pus în contact intim cu influentul. Aceste operații se realizează într-un flux clar, bine definit, numit sistem de ozonizare. Sistemul de ozonizare poate fi împărțit în patru părți sau repere fundamentale (fig.2.1):

1. - gospodăria de gaz prin care se asigură pregătirea prealabilă a gazului pentru a fi ozonat ;
2. - alimentare cu energie electrică, sector în care se asigură caracteristicile curentului electric pentru utilizare ;
3. - generatorul de ozon, partea centrală a sistemului, care asigură producerea gazului ozonat ;
4. - contactorul, element esențial al schemei, care asigură contactul intim între gazul ozonat și influent în vederea producerii reacțiilor chimice.

În fig.2.1. este prezentată cea mai simplă schemă, de principiu, a utilizării ozonului în tratarea apei, schemă încă apli-

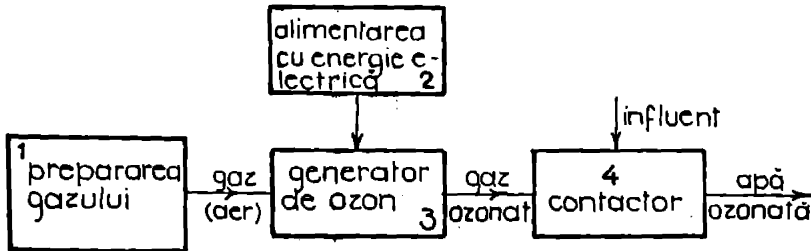


Fig.2.1. Schema de principiu a ozonizării I.

cată, și variabilă, în anumite condiții de calitate ale influentului, precum și pentru anumite tipuri de contactoare (care asigură efectul multiplu al ozonării).

O schemă mai completă, cu re folosirea ozonului rezidual în procesul de limpezire (de exemplu în bazinul de reacție al adjuvanților de coagulare), se prezintă în figura 2.2.

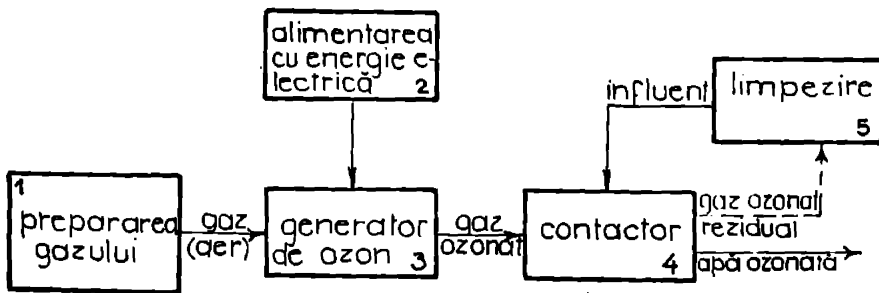


Fig.2.2. Schema de principiu a ozonării II.

La componentele de bază prezentate, se adaugă cele auxiliare cum sînt: aparatura de control și reglaj, aparatura de menținere și protejare a mediului ambiant în spațiile închise (controlul zgomotelor și al concentrației de ozon, instalațiile de ventilare), protecția captării aerului, automatizarea și/sau computerizarea funcționării instalațiilor.

Ca agent purtător al ozonului se folosesc: aerul, aerul îmbogățit cu oxigen sau oxigenul. Studiile tehnico-economice de-
cid asupra calității (tipului) gazului de ozonizat.

2.2. Gospodăria de gaz

Gazul cu aria de răspîndire cea mai mare pentru producerea ozonului necesar tratării apelor îl constituie aerul atmosferic. Aerul folosit în alimentarea generatorului de ozon trebuie să fie:

- curat, adică lipsit de praf și/sau ulei ;
- uscat, cu un conținut de umezeală (vapori de apă) mult redus ;
- cît mai rece.

Praful s-ar înmagazina, în timp, în tuburile de ozonizare ale generatorului de ozon, determinînd scoaterea din funcțiune a acestuia în vederea curățirii. De asemenea ar contribui la micșorarea randamentului generatorului [98, 108, 130].

Uleiurile reduc considerabil capacitatea de uscare a desiccatoarelor prin acoperirea parțială a suprafeței acestora.

Umiditatea gazelor de alimentare reduce cantitatea de ozon produsă pe unitatea de putere, deci mărește consumul de energie electrică, și, în plus, micșorează durata de funcționalitate a dielectricului [98, 144].

Ca și gaz de ozonare în tehnică se utilizează: aerul, oxigenul de puritate ridicată și aerul bogat în oxigen.

Obiectivele sistemului de preparare a gazului de ozonizare sînt: să asigure un gaz curat, uscat și rece. Cu cît aceste cerințe sînt mai avansate calitativ cu atît producția de ozon va crește pentru aceeași putere unitară consumată. De asemenea, producția de ozon va fi menținută constantă dacă puritatea, umiditatea și temperatura gazului de alimentare a generatorului de ozon se mențin constante și la valori optimizate.

Factorii ce trebuie avuți în vedere la realizarea sistemului de preparare a gazului de alimentare pentru ozonizare sînt:

- tipul (felul) gazului de alimentare ;
- tipul generatorului de ozon, referitor la presiunea gazului de alimentare la care poate funcționa ;
- tipul contactorului, referitor la presiunea sistemului de difuzie a aerului ozonat ;
- temperatura apei folosite la răcire ;
- capacitatea ozonizorului, respectiv debitul instalat al stației de tratare - un sistem de mare capacitate putînd justifica un sistem de preparare a aerului mai complex -

"Materia primă" pentru gazul ozonat, oricare ar fi acesta, o constituie aerul. În cazul folosirii oxigenului ca gaz de ozonare prepararea lui pe cale chimică (prin electroliza unei soluții alcaline de hidroxid de sodiu, sau prin folosirea sării lui Berthollet - $KClO_3$ - care prin încălzire degajă oxigen) nu este rentabilă la scară industrială, datorită costului ridicat. Oxigenul industrial se obține prin distilarea fracționată a aerului lichid. Prin acest procedeu aerul se comprimă pînă la presiuni de 20 MN/m^2 (cca. 20 at) și printr-o destindere bruscă este lichefiat, după care oxigenul se obține, prin separarea de celelalte gaze, printr-o vaporizare fracționată. Această metodă este mult mai ieftină decît metoda chimică de obținere a oxigenului, asigurînd și o puritate satisfăcătoare a acestuia [168]. Oxigenul gazos obținut (în vaporizator) este trimis într-un rezervor de acumulare de unde este aspirat de compresorul de oxigen, presurizat și trimis la rețeaua de distribuție de unde prin rețeaua de distribuție ajunge la consumatori sau poate fi încărcat în butelii, transportat și pus în operă.

Aerul folosit ca gaz de ozonizare este captat direct, printr-un tub sau coș, din atmosferă sau poate fi captat din interiorul construcției care adăpostește instalațiile. Praful și celelalte particule impurificatoare (solide/materiale) conținute în aerul de alimentare a generatorului de ozon, sînt reținute în filtre care trebuie să rețină particulele mai mari de cinci microni.

Pentru captare, filtrare, răcire și uscare, precum și pentru prepararea ozonului și utilizarea acestuia, aerul trebuie presurizat. Funcție de caracteristicile funcționale ale gospodăririi de aer și de sistemul de contactor folosit în procesul tratării apei, deci funcție de schema tehnologică a ansamblului procesului de ozonizare se cunosc trei tipuri (trepte) de presurizare a aerului [14,69,91]:

- de înaltă presiune $5 \dots 8 \text{ MN/m}^2$;
- de medie presiune $0,4 \dots 0,9 \text{ MN/m}^2$;
- de joasă presiune $1 \dots 20 \text{ N/m}^2$ ($10 \dots 2000 \text{ mm col H}_2\text{O}$).

Figura 2.3. prezintă sistemul de preparare a gazului de ozonare la înaltă presiune folosit la uzina de apă din Sherbrook (Canada) [116,118].

Presiunea ridicată este cerută de utilizarea la înaltă presiune a uscătorului desicant, compresorul avînd rolul de a asigura

această presiune prin intermediul rezervorului de aer. Sistemul acesta nu are o arie largă de aplicabilitate.

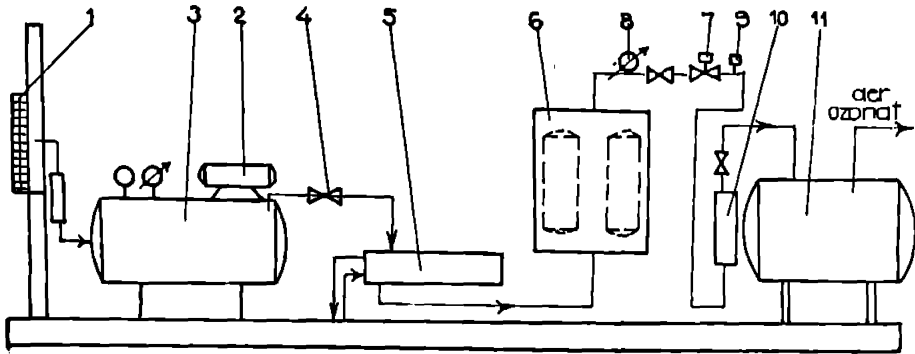


Fig.2.3. Schema instalației de preparare la înaltă presiune a gazului de ozonizare.

1. filtru priză aer, 2. compresor, 3. rezervor de aer, 4. robinet de control, 5. schimbător de căldură/răcitor, 6. uscător desicant, 7. robinet de reducere-reglare a presiunii, 8. manometru, 9. higrometru, 10. debitmetru de aer, 11. generator de ozon.

Asemănător cu sistemul prezentat anterior este sistemul de preparare a gazului de medie presiune ilustrat schematic în figura 2.4. [180].

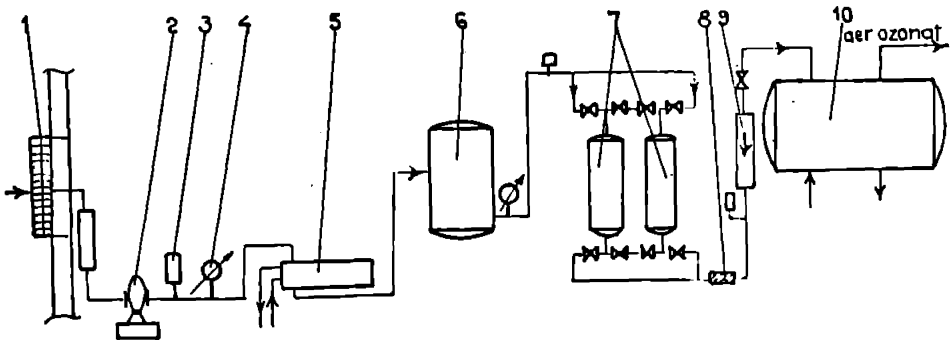


Fig.2.4. Schema instalației de preparare la medie presiune a gazului de ozonare.

1. filtru de aer, 2. suflantă, 3. higrometru, 4. manometru, 5. schimbător de căldură/răcitor, 6. uscător refrigerent, 7. uscător desicant, 8. filtru suplimentar, 9. debitmetru de aer, 10. generator de ozon.

Sistemul de preparare a gazului de ozonare de medie presiune are o largă răspîndire fiind utilizat la sistemele de tratare unde pentru contactul gaz-lichid aerul ozonat nu este aspirat, ci este introdus la partea inferioară a contactorului (prin diverse modalități, frecvent prin unități poroase).

Cînd se folosesc contactoare care aspiră gazul ozonat din generatoarele de ozon se adoptă sistemul de preparare a gazului de joasă presiune, prezentat în figura 2.5. La acest sistem este suficientă o presiune mică, pentru învingerea rezistențelor din filtru de aer, componentele de răcire și uscare și pentru a străbate generatorul de ozon [108].

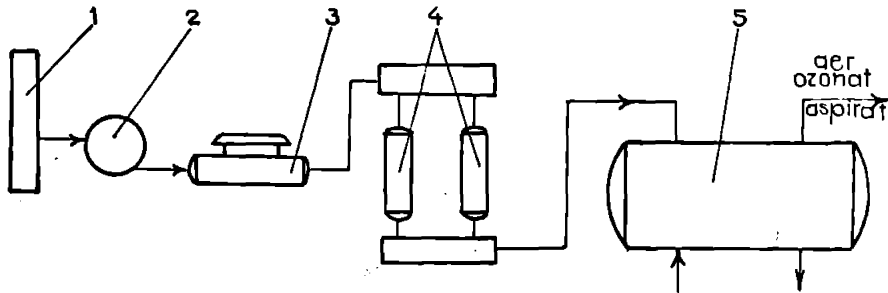


Fig.2.5. Schema instalației de preparare la joasă presiune a gazului de ozonizare.

1. filtru priză de aer, 2. ventilator, 3. uscător refrigerent, 4. uscător desicant, 5. generator de ozon.

Sistemul de preparare a gazului la joasă presiune se pretează tehnologiilor de tratare în care generatorul de ozon este cu plăci tip Otto, care funcționează cu gazul de ozonizare la presiunea atmosferică sau puțin mai mică decît aceasta.

Pentru schema tehnologică de folosire a ozonului este importantă corelarea între presiunea de lucru în gospodăria de aer și în restul sistemului (generator, contactor, refolosirea gazului ozonat rezidual). Controlul presiunilor pentru asigurarea unei concentrații constatăte a ozonului în gazul ozonat se poate realiza manual, prin observații și intervenții permanente, sau automat.

Alegerea agregatului de presurizare (compresor, suflantă, ventilator) este importantă, pe de o parte prin asigurarea presiunii de lucru dorite, iar pe de altă parte pentru "scăpările" de

ulei. Acestea din urmă nu sînt admise datorită efectelor negative ce le au asupra unităților de uscare a aerului. Cînd există pericolul "scăpării" de ulei se prevăd în scheme, separator de ulei, după agregatele de vehiculare ale aerului.

2.2.1. Schimbătorul de căldură răcitor cu apă

Acesta se folosește pentru scăderea temperaturii aerului după compresor, în sistemul de preparare a gazului de înaltă presiune, și în suflantă în sistemul de medie presiune. Sursa de apă, care are rolul de a prelua surplusul de căldură este apa tratată, sub presiune. Apa de răcire se recirculă, fiind trimisă în curentul de apă brută, uneori este trimisă imediat amonte de dezinfecție finală.

Simplicitatea instalației și absența componentelor în mișcare îi conferă siguranță în exploatare avînd o eficiență apreciazabilă [117]. Problemele referitoare la poluarea sonoră/zgomot, mici sau nu, trebuie să avute în vedere.

2.2.2. Răcitorul frigorific cu gaz

Răcitorul frigorific cu gaz/uscătorul refrigerent este o componentă majoră a sistemului de preparare a gazului de medie și joasă presiune. Temperatura gazului de alimentare a generatorului de ozon se reduce prin acest aparat pînă la aproximativ $+5^{\circ}\text{C}$.

Funcția principală a răcitorului frigorific este uscarea gazului. Coborîrea temperaturii gazului/aerului de alimentare provoacă condensarea a 70% din vaporii de apă ai gazului de alimentare, în acest fel reducînd costul și mărimea uscătorului desicant din aval [91, 108].

Sistemul de înaltă presiune a gazului, în mod obișnuit nu folosește răcitorul frigorific pentru că variația presiunii uscătorului desicant este relativ insensibilă la temperatura gazului introdus.

Ca răcitoare se folosesc sistemele frigorifice convenționale.

2.2.3. Uscătorul desicant

Uscătorul desicant de gaz este unitatea de bază în toate tipurile de sisteme ale preparării gazului de alimentare. Uscă-

torul desicator este necesar pentru reducerea umidității gazului în vederea asigurării punctului de condensare/punctului de rouă la: $-40 \dots -60^{\circ}\text{C}$, în vederea asigurării costului scăzut și eficienței ridicate a generatorului de ozon. Temperatura punctului de rouă este temperatura la care presiunea parțială a vaporilor de apă din aerul umed, de o anumită temperatură și conținut de umiditate, răcit izobar, devine egală cu presiunea lor de saturație, sau, reprezintă temperatura la care începe condensarea vaporilor de apă la răcirea izobară, cu conținut de umiditate constant al aerului umed [163].

O unitate desicatoare are două compartimente/coloane cu adsorbant, din care unul este în funcțiune, în timp ce adsorbantul celuilalt compartiment este în procesul de regenerare și purjare. Diferența esențială dintre diferitele tipuri de uscătoare desicatoare constă în procedeul de regenerare a adsorbantului. Regenerarea desicatorului se realizează prin procese folosind sau nu căldura [167, 173].

- Regeneratorul desicator la cald utilizează un curent de resorbție (extragerea umidității de pe granulele adsorbante) termic și acționează la presiune scăzută. Este utilizat în cazul sistemelor de preparare a gazului la presiune medie și scăzută.

Curentul de resorbție termică se aplică ciclic, la o creștere a diferenței de temperatură, care este factorul principal al regenerării.

După ce materialul adsorbant este pregătit pentru etapa următoare de funcționare (este desicat/uscat) se cere o răcire generală a sistemului. Rezultă deci, că instalația necesită o sursă exterioară, sau proprie, de căldură și de răcire (aceasta din urmă poate fi naturală). Perioada de regenerare este, în mod obișnuit, de 8...12 ore.

- Regeneratorul desicator pe bază de diferență de presiune utilizează un ciclu oscilant al presiunii aerului, datorită căruia resorbția se realizează pe baza fenomenului de adsorbție a umidității materialului adsorbant de către aerul cu presiune mai mică. Deci, factorul esențial al resorbției este diferența de presiune a gazului în cele două momente semnificative de funcționare ale instalației : adsorbție-regenerare.

Ciclul de regenerare pentru acest tip de instalație este de

1...2 minute. (Un ciclu se definește ca fiind suma timpurilor necesari instalației - unei coloane de uscare - pentru o perioadă de uscare a gazului de alimentare și pentru o perioadă de regenerare).

Uscătorul desicator cu resorbție pe baza diferenței de presiune are un gabarit mult mai mic decât cel utilizând circuitul căldurii. De asemenea, nu necesită dispozitive pentru încălzire sau răcire. Este mai simplu, ușor de amplasat și cu o funcționare sigură.

Materialele desicatoare (adsorbante de umiditate) cu cea mai răspândită utilizare sînt silicagelul și alumina calcinată (alumina activată). Schimbătorii de ioni sînt folosiți ca treaptă inițială, la unele uscătoare desicatoare care mai conțin silicagel sau alumina activată. Silicagelul, ca material adsorbant al umidității, deși este mai fragil ca alumina activată și este supus descompunerii în prezența apei, pentru scopul precizat se comportă foarte bine și în timp, funcționînd perfect perioade îndelungate (caci. 10 ani). Comportarea sa în timp poate fi observată vizual, fiind înmărcat cu un indicator care-și schimbă culoarea la epuizarea capacității de adsorbție (trece din albăstrui în roz).

2.2.4. Utilizarea oxigenului ca gaz de alimentare

În cazul utilizării oxigenului drept gaz de alimentare sistemul de ozonare a apei nu diferă esențial, modificările apărînd în perimetrul gospodăririi de gaz. Figura 2.6 prezintă schematic sistemul de ozonare al uzinei de tratare a apei din Duisburg care folosește, oxigenul drept gaz de alimentare a generatorului de ozon [108,147].

Un alt mod de alimentare cu oxigen a generatorului de ozon, cu presiune variabilă, preparat la locul utilizării, aplicat cu succes la unele stații de epurare din SUA [108] este prezentat în figura 2.7.

Oxigenul în exces este folosit pentru activarea nămolului din bazinul de nămol.

Gazul rezidual bogat în vapori de apă nu trebuie să ajungă

în generatorul de ozon decât după o prealabilă "curățire", astfel ar reduce producția de ozon pe kwh, și prin formarea de acid

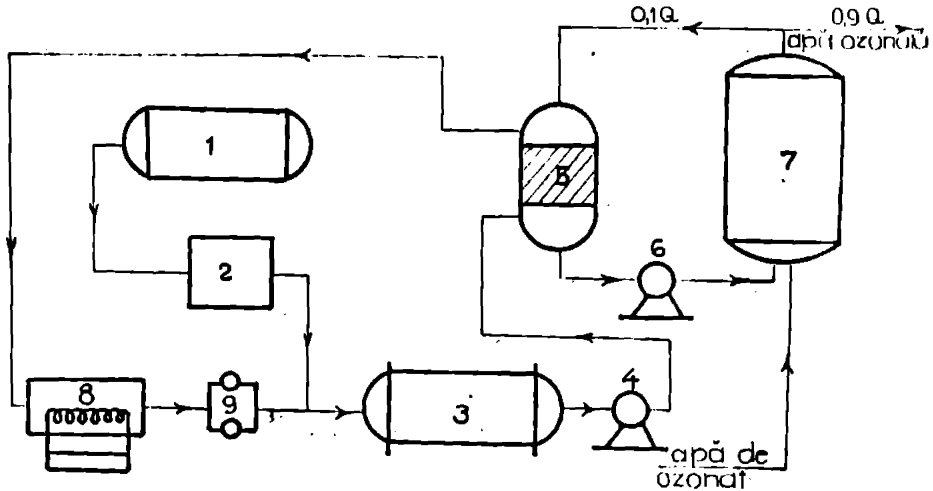


Fig.2.6. Schema sistemului de ozonare a apei folosind oxigenul ca gaz de alimentare.
 1. rezervor de oxigen lichid, 2. evaporator de oxigen, 3. generator de ozon, 4. compresor, 5. rășchier de ozon cu inele Rasching, 6. pompă de apă, 7. contactor, 8. uscător refrigerent, 9. uscător desicant.

azotic ar avea o acțiune corosivă foarte puternică.

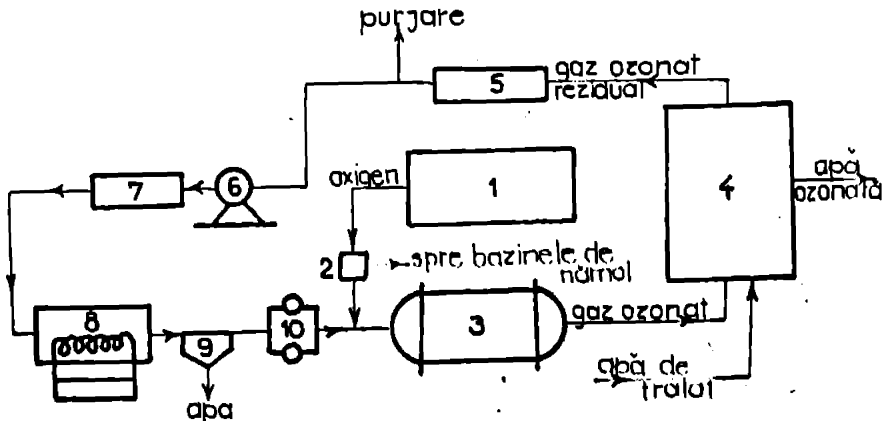


Fig.2.7. Schema sistemului de ozonare folosind oxigenul ca gaz de alimentare (la o stație de epurare).
 1. generator de oxigen, 2. regulator, 3. generator de ozon, 4. contactor, 5. distractor, 6. compresor, 7. schimbător de căldură, 8. uscător refrigerent, 9. eliminarea apei de condens, 10. uscător desicant.

Acordarea unei deosebite atenții gospodăriei de gaz, proceselor esențiale produse aici: filtrarea, uscarea, răcirea gazului de alimentare, este justificată de cerințele tehnice de funcționare ale generatorului de ozon și de costul ozonului produs. Funcționarea întregului sistem de ozonizare este condiționată de calitatea gazului de alimentare a generatorului de ozon.

2.3. Alimentarea cu energie electrică a generatorului de ozon

"Punctul critic" al tuturor sistemelor de ozonizare îl constituie alimentarea cu energie electrică. Elementele sistemului de alimentare cu energie electrică trebuie să fie judicios amplasate în cadrul stațiilor de tratare, luându-se toate măsurile de izolare, protecție și bună funcționare.

Beneficiarul principal, și cel mai important, al sistemului de alimentare cu energie electrică (celălalte componente putând fi bransate la rețeaua "obișnuită" a stației de tratare) este generatorul de ozon.

Puterea P de alimentare a generatorului de ozon este în funcție de caracteristicile curentului electric: f - frecvența și U tensiunea dintre electrozi, și de caracteristicile constructive ale generatorului: C_g - capacitatea dielectricului și C_a - capacitatea spațiului de descărcare, deci :

$$P = F(f, U, C_g, C_a) \quad (2.1)$$

Pentru un ozonizor dat, C_g și C_a sînt constante, depinzînd de materialul folosit și respectiv de alcătuire și nu depind de caracteristicile curentului. Rezultă că puterea consumată de generator depinde de valorile tensiunii și frecvenței.

Producția de ozon poate fi controlată, pentru un ozonizator dat, în două moduri: modificînd tensiune, sau modificînd frecvența.

Schematic, în figurile 2.8, 2.9, 2.10 se prezintă sistemele de control ale alimentării/furnizării de putere electrică pentru producerea ozonului.

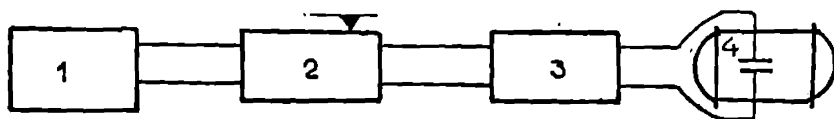


Fig.2.8. Schema de control cu joasă frecvență constantă și tensiune variabilă
1. sursă de energie, 2. transformator variabil, 3. transformator (ridicător) de înaltă tensiune, 4. generator de ozon.

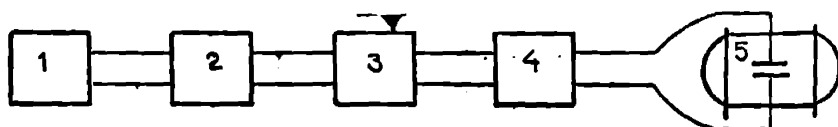


Fig.2.9. Schema de control cu frecvență medie constantă (600 Hz) și tensiune variabilă
1. sursă de energie, 2. consumator de frecvență, 3. transformator variabil, 4. transformator (ridicător de înaltă tensiune, 5. generator de ozon).

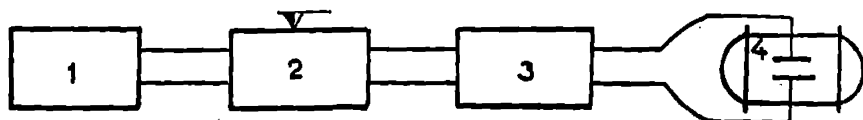


Fig.2.10. Schema de control cu tensiune constantă și frecvență variabilă.
1. sursă de energie, 2. convertor variabil de frecvență, 3. transformator (ridicător) de înaltă tensiune, 4. generator de ozon.

Curentul de frecvență joasă și constantă (50 Hz) este frecvent folosit la producerea ozonului. Producția de ozon, deci este controlată prin modificarea/variația tensiunii la generator.

O producție de ozon (necesară) mai mare ca 10 kg ozon pe oră justifică folosirea frecvenței variabile pentru generatorul de ozon. Folosirea unui convertor de frecvență pentru creșterea acesteia de la 50 Hz la 2000 Hz la primarul transformatorului es-

te mai răspîndită din cauza avantajelor sistemului de control.

Generatorul de ozon alimentat la o frecvență de 600 Hz produce o cantitate aproape dublă de ozon față de alimentarea la 50 Hz, dar cu un consum de putere sporit pe unitatea de greutate a ozonului produs.

În tabelul 2.1. sînt prezentate caracteristicile de alimentare cu energie electrică pentru tipurile de generatoare de ozon utilizate în prezent [108].

Caracteristicile curentului electric,
pe tipuri de ozonizare.

Tabelul 2.1.

Tipul generatorului	Tensiunea, în V	Frecvența, în Hz
Plăci Otto	7500 ... 20000	50 ... 500
Tuburi Siemens	15000 ... 20000	50 ... 600
Plăci Lowther	9000	60 ... 2000

2.4. Generatoare de ozon

Descărcările electrice silențioase sînt considerate a fi singurele acceptate, ca metodă practică, de producere a ozonului la scară industrială [108, 41].

În natură se produce ozon în mod continuu datorită acțiunii energiei luminoase a soarelui asupra oxigenului atmosferic, sau intermitent la trecerea fulgerelor prin aer. Omul reproduce aceste fenomene naturale și le controlează, în generatoarele de ozon, prin producerea dirijată de descărcări electrice, sau mari energii de radiație; într-un mediu de aer curat sau de oxigen.

Generatoarele de ozon se amplasează cît mai aproape de locul de punere în operă a gazului ozonat.

În generatoarele de ozon, datorită descărcărilor electrice (procedul aplicat) se produc, ca efecte secundare, radiații luminoase și căldură. Din energia electrică necesară producerii descărcărilor electrice pînă la 90% este consumată de procesele secundare. Se subliniază faptul că în producerea de ozon căldura are un rol negativ, fiind responsabilă de scăderea stabilității ozonului, deci, în final micșorează randamentul instalației. Se poate ajunge la situația, nedorită, ca datorită căldurii produse

În procesul de ozonare a gazului ozonul rezultat să se descompună în momentul imediat următor. De aceea se iau măsuri stricte de limitare a ridicării temperaturii instalației de producere a ozonului (generatorului de ozon), cât mai eficiente posibil, în vederea asigurării randamentului optim al instalației. Acest lucru se realizează, în mod curent, cu apă, aer, respectiv răcirea prin transfer de căldură de la dielectric la un (alt) fluid.

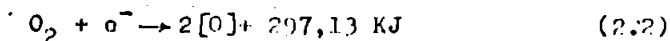
Prin măsurile luate, de limitare a căldurii degajate în procesul formării ozonului, eficiența generatoarelor de ozon a sporit continuu. Astfel, uzina de apă Bon Voyage din Nisa, cu aparatura originală/inițială are un consum energetic de 73 kwh/kg ozon produs, în schimb consumul energetic specific al uzinei Charlea J. des Bailllets din Montreal este de numai 23,6 kwh/kg ozon produs [108].

Dacă pentru producerea ozonului se utilizează ca gaz de alimentare al generatorului aerul (curat, uscat, rece), rezultă un gaz ozonat (amestec de aer și ozon) conținând 1...3% ozon pentru consumul de putere minim la un debit maxim rațional al aerului de alimentare. Mărind debitul aerului de alimentare prin generator - pe unitatea de timp și pe unitatea de energie electrică aplicată - se va micșora concentrația ozonului în aerul ozonat produs. Reducând debitul de alimentare cu aer al generatorului, va crește concentrația ozonului în aerul ozonat pe unitatea de putere electrică aplicată, dar se va micșora cantitatea de ozon produsă pe kwh și/sau se va reduce cantitatea de ozon produsă în unitatea de timp. Prin stabilirea atentă și reglarea corespunzătoare a parametrilor instalației (putere, debit aer de alimentare) de va asigura producerea cantității optime de ozon cu cheltuieli minime de energie.

Folosind oxigenul ca gaz de alimentare al generatorului de ozon în locul aerului, producția de ozon se dublează, adică rezultă un amestec de 2...6% ozon în oxigen. Dar, la alegerea acestei variante trebuie avute în vedere și cheltuielile cu producerea oxigenului (eventual și transportul) care nu sînt deloc neglija-bile. De asemenea spațiul ocupat de instalațiile de producere a oxigenului este mai mare decît cel al gospodăriei de aer (în cazul folosirii aerului ca gaz de ozonare) și deci și cheltuielile de construcții și montaj sînt mai mari.

Oricare element individual generator de ozon este alcătuit,

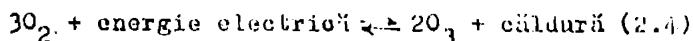
în esență, dintr-o pereche de electrozi separați printr-un spațiu prin care circulă gazul de alimentare și un strat izolator (dielectric), cum este sticla. Gazului de alimentare, cu un conținut variabil de oxigen, după natura sa, trecut prin spațiul dintre electrozi, i se aplică un curent alternativ de înaltă tensiune. Generatorul de ozon (elementul generator) se comportă ca un condensator care permite energiei să-l străpungă. În spațiul de gaz se produce astfel o descărcare coronală (radială). O parte din oxigenul gazului de alimentare este transformată în ozon :



și



Sub formă generalizată ecuațiile 2.2 și 2.3 se pot scrie :



Este important de remarcat faptul că reacția din relația (2.4) reprezintă o reacție de echilibru, însemnând că reacția reversibilă se produce în același timp cu reacția principală (de bază).

Se produce ozon atât timp cât oxigenul este prezent în gazul de alimentare. Electronii liberi rezultați din ionizarea gazului sînt accelerați datorită tensiunii aplicate și deci pot ciocni moleculele de oxigen. Dacă electronul excitat posedă suficientă energie la ciocnire moleculele de oxigen se desfac în atomi de oxigen. În acest fel fiecare atom de oxigen disponibil are posibilitatea de a se combina cu : 1) o moleculă de oxigen și formează o moleculă de ozon, sau 2) cu un atom de oxigen reformînd molecula acoutuin.

Gazul de alimentare este în mod continuu ionizat sau deionizat, în interiorul spațiului de gaz, datorită și sub acțiunea curentului alternativ. Electronii liberi rezultați trecînd de la un electrod la altul, după cum se inversează polaritatea, se ciocnesc pe traiectorie cu moleculele de oxigen din gazul de amestecare. Frecvența acestor ciocniri, evident, este mai mare în cazul utilizării oxigenului ca gaz de alimentare. De asemenea, cu mărirea frecvenței curentului electric se mărește probabilitatea ciocnirilor.

Efectele posibile ale ciocnirilor dintre electroni și moleculele de oxigen sînt prezentate schematic în figura 2.11 [108].

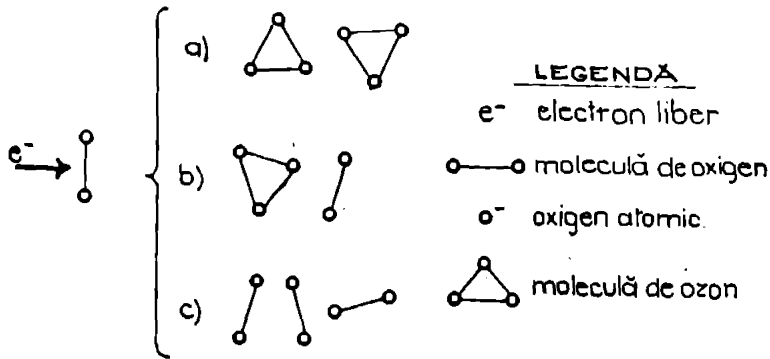


Fig.2.11. Ciocniri - electroni liberi-molecule de oxigen

De fapt, la temperatura de aproximativ 40°C reacția reversibilă este foarte accentuată, producția de ozon tinzând spre zero.

Schema fundamentală a generatorului de ozon bazat funcțional pe alimentarea cu energie electrică este prezentată în figura 2.12.

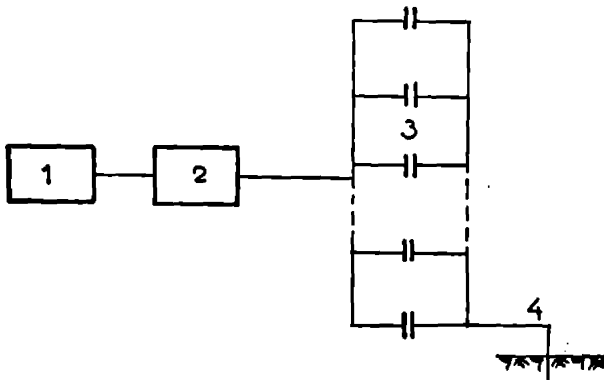


Fig.2.12. Generator de ozon - schemă funcțională fundamentală.

1. alimentare cu energie electrică, 2. regulator de frecvență și/sau tensiune, 3. "n" plăci paralele sau dielectrici tubulari legați în paralel, 4. împământare.

Deci, generatorul de ozon este un ansamblu de capacitatori legați în paralel (tuburi sau perechi de plăci plane paralele). Un singur element de capacitate, ca principiu funcțional, este

prezentat în figura 2.13.

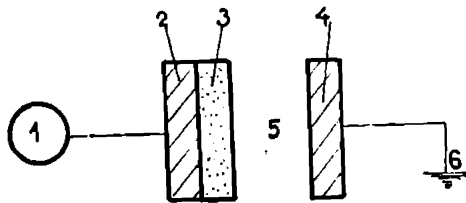


Fig.2.13. Element de capacitate.

1. instalație de alimentare cu energie electrică, 2. electrod de înaltă tensiune, 3. dielectric, 4. electrod de joasă tensiune, 5. spațiu de gaz, 6. împământare.

2.5. Contactoare de ozon.

În fluxul tehnologic al tratării apei cu ozon contactoarele sînt elementele principale. Ele sînt instalațiile care facilitează și realizează contactul intim între masa apei de tratat și masa gazului ozonat, asigurînd transferul ozonului din fază gaz în fază lichid, în vederea oxidării substanțelor organice, bacteriilor, chisturilor, virusurilor, etc. conținuți în apă și menținînd acest contact pe durata timpului necesar producerii efectului dorit din partea ozonului.

2.5.1. Elemente constructive și funcționale

Contactoarele de ozon sînt construcții etanșe realizate din beton armat, avînd următoarele elemente/repere esențiale :

- sistemul de introducere a influentului (apa de tratat) ;
- sistemul de introducere a gazului ozonat ;
- spațiul util, caracterizat prin volum și înălțime, de asigurare a contactului între influent și gazul ozonat ;
- spațiul de colectare a gazului ozonat rezidual ;
- sistemul de colectare și evacuare a gazului ozonat rezidual
- sistemul de evacuare a apei ozonizate care poate fi combinat cu un sistem de dezozonizare ;

O importanță deosebită trebuie acordată realizării etanșeității, pentru a elimina ori ce posibilitate de scurgere a gazului o-

zonat (de proces sau rezidual) în mediul ambiant al construcției care adăpostește contactoarele de ozon. Pentru siguranța personalului de exploatare această încăpere trebuie să fie prevăzută cu un sistem de ventilare eficient.

Introducerea apei de tratat și a gazului ozonat poate fi realizată atât pe la partea inferioară cât și pe la cea superioară a contactorului, în aceeași secțiune sau în secțiuni opuse.

Deci, circulația celor două faze, lichidă și gazoasă, este realizată fie în același sens, fie în contracurent.

Din punct de vedere hidraulic spațiul util de asigurare a contactului lichid-gaz trebuie să satisfacă relațiile:

$$V_u = Q \cdot t_c / 60 \quad (2.5)$$

$$H_u = v \cdot t_c / 60 \quad (2.6)$$

în care : V_u - este volumul util al contactorului, în m^3 ;
 H_u - înălțimea utilă a contactorului, în m ;
 Q - debitul apei de tratat în m^3/h ;
 v - viteza apei în contactor în m/h ;
 t_c - timpul de contact, în minute.

Din motive funcționale și constructive, cum sînt: realizarea sistemului de introducere cât mai uniformă a gazului ozonat, a sistemului de evacuare a apei ozonizate, a limitării dezvoltării construcției pe verticală, a reducerii consumului specific de beton și de energie de vehiculare a apei, respectiva gazului ozonat, dimensiunile în plan și pe verticală ale contactoarelor sînt limitate în aceste condiții, numărul contactoarelor de ozon în funcțiune se determină folosind relațiile :

$$\frac{V_u}{H_u} = S \quad (2.7)$$

$$n = \frac{S}{S_1} \quad (2.8)$$

în care: S - este suprafața totală a contactoarelor, în m^2 ;
 S_1 - suprafața orizontală a unui contactor, în m^2 .

Pentru reducerea consumului de material contactoarele se construiesc grupat simplu sau dublu.

In funcție de modul de grupare al contactoarelor se optimizează sistemul de conducte care le deservește.

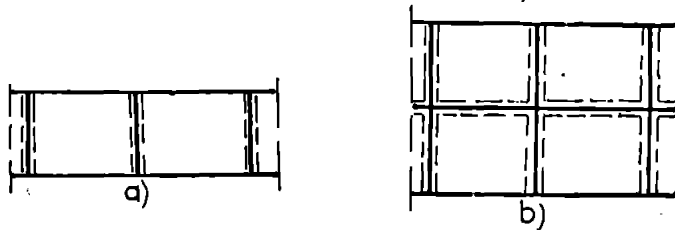


Fig.2.14. Gruparea contactoarelor .
a) grupare simplă ; b) grupare dublă.

Contactoarele de ozon funcționează la o suprapresiune de minimum 10. mm CA când gazul ozonat rezidual este captat, sau la o depresiune creată de utilajul de aspirație al gazului ozonat rezidual.

2.6. Critica procedeelor de ozonare

Aplicarea ozonizării în traterea apelor reprezintă un proces, respectiv o succesiune de procese, de mare complexitate, presupunând asigurarea și tratarea gazului de ozonat, producerea ozonului, asigurarea contactului și transferului de masă dintre gazul ozonat și masa apei de tratat, precum și operațiile de neutralizare a gazului ozonat rezidual în vederea asigurării condițiilor normale de lucru în spațiile de muncă (pentru personal și utilaje).

Cunoașterea parametrilor funcționali, la fiecare treaptă a procesului și controlul acestor parametri conduce la o exploatare rațională și sigură. Prin intervențiile personalului de exploatare se poate asigura funcționarea optimizată a întregului sistem de ozonizare.

In cele ce urmează se semnalează parametrii instalațiilor ce asigură procesul de ozonizare.

1. pentru filtrul de aer - orientarea și asamblarea prizei de aer ;
- starea de funcționare (gradul de îmbăcsire) - deci, eficiența ;
- temperatura aerului ;
- pierderea de presiune prin filtru,

2. pentru schimbătoarele de căldură
 - principiul general de funcționare ;
 - temperatura aerului la intrare și la ieșire ;
 - indicații asupra curentului răcit (debit, presiune)
3. pentru instalația de vehiculare a aerului (sufletă sau compresor)
 - debitul și presiunea de refulare ;
 - consumul de energie electrică ;
 - principiul de funcționare ;
 - temperatura gazului vehiculat ;
4. pentru uscătorul de gaz
 - modul general al funcționării ;
 - modificările de temperatură ;
 - pierderea de presiune în instalație ;
 - presiunea la ieșire ;
 - temperatura punctului de rouă, la ieșire ;
5. pentru generatorul de ozon
 - tipul generatorului și modul de funcționare ;
 - temperatura de admisie a gazului ;
 - debitul gazului ozonat ;
 - debitul agentului (apei) de răcire ;
 - temperatura agentului de răcire la intrare ;
 - temperatura agentului de răcire la evacuare ;
 - presiunea agentului de răcire ;
 - caracteristicile curentului de alimentare : tensiune, amperaj, frecvență, putere ;
 - concentrația în ozon a gazului ozonat ;
6. pentru contactorul de ozon
 - debitul influentului ;
 - debitul gazului ozonat ;
 - concentrația ozonului în gazul ozonat ;
 - temperatura influentului ;
 - doza de ozon ;
 - timpul de contact ;
 - debitul și concentrația în ozon a gazului ozonat rezidual ;
 - presiunea de lucru ;
 - caracteristicile influentului și ale tratatului (turbiditate, pH, substanțe organice, etc.) ;

7. pentru incintele de lucru

- temperatura mediului ambiant ;
- starea de funcționare a instalației de ventilație și parametrii acesteia ;
- conținutul de ozon din mediul ambiant ;
- starea de sănătate a personalului muncitor ;
- pregătirea pentru intervenții a personalului muncitor.

Sistemul de exploatare al ozonizării este caracterizat de modul de determinare a parametrilor și de modul de acționare al instalațiilor componente, putând fi :

- a) manual - manual ;
- b) automat - manual ;
- c) automat - automat ;
- d) automat - computerizat.

În figura 2.15 se propune schema de principiu a determinării automate a parametrilor și controlul automat al instalațiilor.

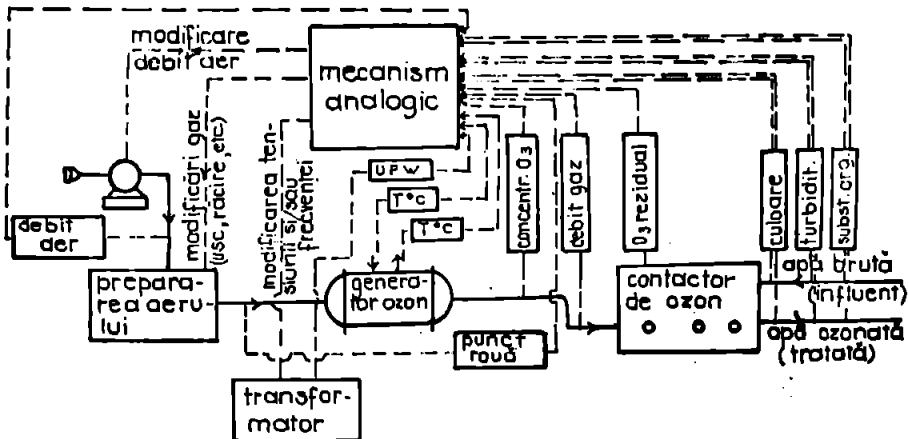


Fig.2.15. Sistem de exploatare automat - automat.

Sistemul cel mai sigur și mai comod de exploatare este cel automat-computerizat, prezentat schematic în figura 2.16.

Folosirea oricărui sistem de exploatare presupune personal muncitor de înaltă calificare, fie pentru acțiuni și intervenții directe, fie pentru controlul și supravegherea funcționării.

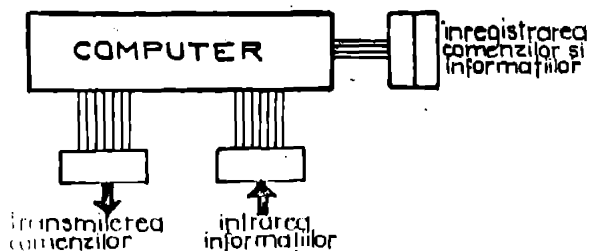


Fig.2.16. Sistem de exploatare automat-computerizat.

Cu cât sistemul de exploatare este mai complex cu atât numărul parametrilor măsurați și controlați, precum și frecvența acestor operații, este mai mare, deci funcționarea ozonizării este mai rațională, fiind optimizată, și implicit cheltuielile de exploatare sînt mai mici.

2.7. Concluzii

1. Sistemul de ozonizare cuprinde patru repere de bază: gaz, podârria de gaz, alimentarea cu energie electrică, generatorul de ozon și contactorul.
2. Gazul care stă la baza producerii ozonului este aerul atmosferic. Pentru a alimenta generatorul de ozon gazul utilizat trebuie să fie curat, uscat și rece, și se asigură după caz, la înaltă, medie sau joasă presiune. Gazul care alimentează generatorul de ozon poate fi oxigenul tehnic aerul bogat în oxigen sau aerul atmosferic, după ce li s-au asigurat caracteristicile cerute.
3. Prin alimentarea cu energie electrică se asigură funcționarea la parametri normali a generatorului de ozon și a celorlalte repere ale stației care funcționează pe bază energie electrică (compresoare, suflante, desicatoare, etc.). Puterea de alimentare a generatorului de ozon depinde de caracteristicile curentului: tensiune și frecvență, precum și de caracteristicile constructive ale aparatului.

capacitatea dielectricului și capacitatea intervalului de descărcare. Producția de ozon poate fi controlată, pentru un generator dat, prin modificarea tensiunii sau frecvenței curentului de alimentare, păstrînd caracteristicile gazului de alimentare constante.

4. Generatoarele de ozon sînt aparate complexe care asigură producerea ozonului prin descărcări electrice silențioase, avînd ca efecte secundare producerea de radiații luminoase și căldură. Căldura produsă trebuie captată și evacuată pentru a mări producția de ozon. Un element generator de ozon este alcătuit, în principiu, dintr-o pereche de electrozi separați printr-un spațiu prin care circulă gazul de alimentare și un strat izolator.
5. Datorită descărcării coronale (radiale) din spațiul de gaz, o parte din oxigenul gazului de alimentare este transformată în ozon, conform relației (2.4) care reprezintă o reacție de echilibru. Se produce ozon atît timp cît oxigenul este prezent în spațiul de descărcare și cît temperatura gazului este mai mică de 40°C .
6. Contactoarele de ozon sînt instalațiile care facilitează și realizează contactul intim între masa apei de tratat și masa gazului ozonat, asigurînd transferul ozonului din faza gaz în faza lichid în vederea manifestării proprietății de puternic oxidant a ozonului pe durata timpului de contact (anterior determinat). Contactoarele de ozon sînt construcții etanșe avînd următoarele elemente esențiale: sistemul de introducere al influentului și al gazului ozonat, spațiul util, sistemul de colectare și evacuare al apei ozonizate și al gazului ozonat rezidual.
7. Spațiul util al contactorului de ozon se determină în funcție de debitul apei de tratat, de viteza apei în contactor și de timpul de contact, conform relațiilor (2.5) și (2.6).
8. Producerea ozonului se face cît mai aproape de utilizator, adică de contactorul de ozon.
9. Întregul proces de ozonizare, de la captarea aerului atmosferic pînă la neutralizarea gazului ozonat rezidual trebuie să fie riguros controlat și coordonat.

10. Problemele cu caracter de noutate prezentate în prezentul capitol, în enunțuri, constau în :

- prezentarea schemelor generale, de principiu, de utilizare a ozonului ;
- precizarea aspectelor tehnice ale gospodăriei de ozon ;
- aprecierea puterii de alimentare a generatorului de ozon și prezentarea sistemelor de control ale alimentării/furnizării de putere electrică pentru producerea ozonului ;
- explicarea mecanismului de formare a ozonului în generator ;
- definirea contactoarelor de ozon și precizarea elementelor sale constructive și funcționale ;
- propunerea relațiilor de calcul pentru stabilirea volumului și înălțimii utile a contactorului, precum și a numărului de contactoare necesar unui proces ;
- precizarea parametrilor instalațiilor ce asigură procesul de ozonizare și al modului de exploatare al acestora.

C A P I T O L U L 3

CERCETARI PRIVIND OPTIMIZAREA PARAMETRILOR GAZULUI DE OZONAT

Oricare ar fi gazul de ozonare, oxigenul, aerul oxigenat sau aerul atmosferic, pentru a fi utilizat în generatorul de ozon trebuie să fie supus unui întreg ciclu de pregătiri prealabile, în scopul asigurării unui randament maxim procesului de producere a ozonului.

Se consideră de preferință, ca materie primă pentru producerea gazului ozonat, aerul atmosferic deoarece are cea mai mare arie de răspândire în procesele de tratare a apei cu ozon, și pentru că necesită instalațiile cele mai simple.

Pentru producerea aerului ozonat aerul introdus în generatorul de ozon trebuie să fie lipsit de impurități, uscat și cât mai rece.

3.1. Filtrarea aerului

Filtrarea aerului este un proces de mare răspundere, prin care se asigură reținerea prafului, fumului, polenului, etc. în proporții cât mai mari. În funcție de natura impurificatorilor aerului, de concentrația lor în aer și de gradul de curățire cerut se stabilesc tipurile constructive și funcționale ale filtrelor de aer [32.1] - Compoziția impurificatorilor (prafului) atmosferici este foarte variabilă, depinzând de o multitudine de factori, dintre care se precizează, ca fiind esențiali : amplasarea geografică a prizei de aer, anotimpul, înălțimea de la sol și poziția față de construcțiile învecinate ale prizei, distanța față de unitățile industriale din zonă, vegetația din regiune și din imediata apropiere a prizei.

Filtrele de praf pot fi clasificate după mai multe criterii - după mărimea particulelor de praf și după gradul de reținere se deosebesc filtrele grosiere, normale, fine și foarte fine ;

- după tipul constructiv se deosebesc filtre din țesături, uscate, metalice cu peliculă de ulei, mecanice, electrice, cu cărbune activ, pentru aerosoli, etc. ;
- după natura reținerilor sînt filtre pentru praf, grăsimi, acizi, uleiuri, etc.

Pentru mărirea efectului de filtrare filtrele pot fi realizate în trepte.

La filtrarea aerului necesar în procesul de ozonare, avînd în vedere condițiile de amplasament a prizelor de aer, se iau în considerare filtrele uscate din țesătură și, eventual electrofiltrele.

3.1.1. Filtre uscate din țesături

Instalațiile clasice de filtrare urmăresc reținerea prafului din aerul atmosferic prin trecerea sa printr-un material poros. Această operație are la bază următorul mecanism [32.1] :

- a) efectul mecanic, care constă în reținerea particulelor de praf cu dimensiuni mai mari decît porii filtrului ;
- b) fenomenul de adsorbție, prin care sînt reținute particule cu dimensiuni mai mici decît porii filtrului.

În masa poroasă a materialului filtrant aerul este obligat să parcurgă un traseu de canale cu o sinuozitate deosebit de pronunțată. Particulele de praf mai mari rămîn fixate nereușind să străbată materialul filtrant, în acest mod realizîndu-se un efect de cernere. O altă parte a particulelor de praf sînt interceptate de elementele componente ale masei filtrante, rămînînd blocate, iar datorită inerției particulele antrenate în mișcarea curentului de aer aderă parțial la pereții de care se ciocnesc la fiecare schimbare de direcție. Parametrul inerțial poate fi calculat cu ajutorul relației propuse de Chen C.Y. [139] la studiul aerosolilor :

$$R_i = \frac{\rho_p \cdot d_p \cdot v}{\mu \cdot d_f} \quad (3.1)$$

unde: P_i este probabilitatea de trecere a unei particule de diametru d_p pe un canal cu diametru d_f ; ρ_p este densitatea prafului (particulei) ; v este viteza ; μ este coeficientul dinamic de viscozitate al aerului.

Cînd stratul filtrant are o anumită grosime și spațiile libere din masa sa au dimensiuni mari în comparație cu mărimea particulelor de praf se manifestă și un fenomen de decantare sub acțiunea gravitației.

Aerul care trece prin pori prezintă un gradient de concentrație al particulelor deoarece pe suprafața exterioară a filtrului concentrația particulelor (mici) este nulă. Particulele foarte fine se deplasează prin difuzie după acest gradient și precipită pe suprafețele de colectare. Punînd condiția omogenității materialului filtrant pe direcția z, de mișcare generală a aerului, înseamnă că se poate admite constanta vitezei. În aceste condiții ecuația de bază a procesului de filtrare este de forma :

$$-\frac{dk}{dz} = a \cdot b \cdot k \quad (3.2)$$

în care : K este concentrația prafului ; z direcția principală de mișcare a aerului ; dk/dz reprezintă gradientul concentrației ; a este un factor ce caracterizează capacitatea de reținere a materialului filtrant ; b este factorul ce caracterizează natura și proprietățile prafului.

Se consideră [32.1] că separarea din aer a particulelor cu dimensiuni peste 25μ este determinată , în special, de efectul de cernere, particulele cu dimensiunea de $1...10\mu$ sînt separate cu precădere datorită inerției, iar pentru particulele sub 1μ difuzia și forțele electrostatice, ce pot apărea, devin importante.

În cele ce urmează sînt analizați parametrii care caracterizează performanțele unui filtru de praf.

3.1.1.1. Gradul de separare al prafului sau eficiența filtrului E_f .

$$E_f = \frac{k_i - k_e}{k_i} \cdot 100 \quad (3.3)$$

unde $K_{i,e}$ reprezintă concentrația prafului în aer înainte și respectiv după filtru (poate fi exprimată în mg/m^3 sau în număr particule $/m^3$).

Gradul de separare crește cu grosimea stratului filtrant după o lege exponențială obținută prin integrarea relației (3.2),

adică :

$$K_e \cdot K_i e^{-\beta_1(z)} \quad (3.4)$$

în care β_1 reprezintă parametrul filtrării aerului, fiind funcție de grosimea materialului filtrant (δ) și determinat de relația :

$$\beta_1 = a \cdot b \cdot \delta \quad (3.5)$$

Pe măsura reținerii prafului de către materialul filtrant porii se îngustează iar gradientul de separare crește, deci, pînă la o anumită limită se poate spune că praful acumulat îmbunătățește proprietățile filtrului. Dar această îmbunătățire a proprietăților filtrante trebuie corelată cu creșterea rezistenței aerului care limitează exploatarea favorabilă a filtrelor.

3.1.1.2. Viteza de trecere a aerului prin masa filtrantă, v , pentru un material/mediu filtrant dat, de o anumită grosime și rezistență, variază linear cu gradul de separare [32.1], care scade la creșterea vitezei, dar numai cînd particulele prafului sînt mai mari de 1μ [163]. Dimpotrivă, pentru praful cu particule sub 1μ raportul filtrului crește cu viteza, ceea ce înseamnă că separarea particulelor foarte mici (sub 1μ) se datorează vitezei.

Capacitatea de acumulare a prafului în funcție de viteză se realizează în mod deosebit la filtrele uscate și la cele cu adezi- vi. La mediile filtrante uscate cu porii mici, folosite pentru re- ținerea prafului fin, vitezele mari ale aerului pot dezlipi parti- oulele depuse pe pereți, micșorînd în consecință gradul de separa- re. Practica a demonstrat că valoarea vitezei, pentru aceste filtre, trebuie să fie în domeniul 0,5 la 2,5 m/s.

3.1.1.3. Rezistența aerului crește cu încărcarea filtrelor (gradul de separație) și se exprimă [163] cu relația empirică :

$$\Delta p = \Delta p_0 + Z \cdot V_p \quad (3.6)$$

în care: Δp - este pierderea de presiune la încărcarea filtrului ; Δp_0 este pierderea de presiune a filtrului nou/curat ; Z este para- metrul încărcării filtrului ; V_p este volumul prafului depus.

Din punct de vedere teoretic se acceptă că în procesul fil- trării aerului particulele de praf se depun pe toată circumferința fibrei filtrante, figura 3.1., fiind caracterizat, funcție de raza fibrei r_f , de raza aerodinamică a depunerilor r și de raza medie geometrică a depunerilor r' .

Admițind că l este lungimea fibrei și V_f este volumul filtrului materialului filtrant, densitatea fibrei în filtru, S_f , va fi:

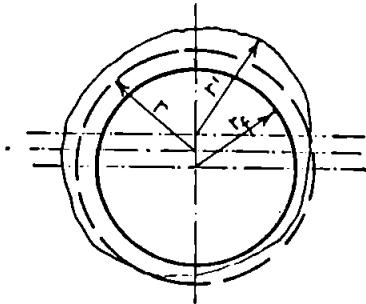


Fig.3.1. Model de depunere a prafului pe suprafața unei fibre

$$S_f \cdot \frac{l \pi r_f^2}{V_f} \quad (3.7)$$

Volumul de praf V_p depus pe fibră se determină cu relația :

$$V_p \cdot l (\pi r'^2 - \pi r_f^2) \quad (3.8)$$

Din relația (3.7) se exprimă lungimea fibrei,

$$l = \frac{S_f \cdot V_f}{\pi \cdot r_f^2} \quad (3.9)$$

pe care o înlocuim în (3.8) obținind :

$$V_p = S_f V_f \left(\frac{r'^2}{r_f^2} - 1 \right) \quad (3.10)$$

Raza medie geometrică a depunerilor se explicitază din relația (3.10):

$$r' = r_f \sqrt{\frac{V_p}{S_f V_f} + 1} \quad (3.11)$$

Se introduce o nouă mărime : coeficientul de uniformitate al depunerilor în jurul fibrei $a = r/r'$, de care se ține seama în relația (3.11) și prin rezolvare se exprimă raza aerodinamică a depunerilor:

$$r^2 = a^2 r_f^2 \left(\frac{V_p}{S_f V_f} + 1 \right) \quad (3.12)$$

După o perioadă de funcționare a filtrului densitatea relativă a fibrei de filtru, ținând seama și de praful depus, devine S_F și se exprimă cu relația :

$$S_F = \frac{l \pi r_f^2}{V_f} + \frac{V_p}{V_f} \cdot S_f \left(1 + \frac{V_p}{S_f V_f} \right) \quad (3.13)$$

După Fuchs și Stechkina [163] rezistența aerodinamică a filtrului nou/curat are expresia :

$$\Delta p_0 = \frac{4 \mu \delta v \cdot S_f}{r_f^2 \left(-\frac{1}{2} \ln S_f - C_0 \right)} \quad (3.14)$$

în care s-au mai introdus notațiile : μ - coeficientul dinamic de vâscozitate ; v_0 - viteza aerului la intrarea în filtru ; C_0 - constantă experimentală, funcție de natura și modul de realizare a materialului filtrant.

După o anumită perioadă de funcționare a filtrului, prin analogie cu (3.14), rezistența nominală devine :

$$\Delta p = \frac{4\mu \delta v_0 S_f}{r^2 \left(-\frac{1}{2} \ln S_f - C_0\right)} \quad (3.15)$$

Cu valoarea lui S_f din (3.13) și ținând seama relațiile (3.12), (3.13) și (3.14), în urma efectuării calculelor relația (3.15) se transformă în:

$$\Delta p = \Delta p_0 \frac{\ln S_f + C}{\alpha^2 (\ln S_f + C)} \quad (3.16)$$

în care $C = 2C_0$.

Deoarece este practic imposibilă măsurarea valorii lui V_p pe cale experimentală se introduce masa m a prafului depus și noțiunea de porozitate a prafului depus ε , care are expresia :

$$\varepsilon = 1 - \frac{m}{\delta_p V_p} \quad (3.17)$$

unde δ_p reprezintă densitatea relativă a prafului.

Din (3.17) se explicitază V_p .

$$V_p = \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta_p} \quad (3.18)$$

valoare, care introdusă în (3.16), și ținând seama de (3.13), conduce la :

$$\Delta p = \Delta p_0 \frac{\ln S_f + C}{\alpha^2 \left[\ln \left(S_f + \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta_p V_p} \right) + C \right]} \quad (3.19)$$

care exprimă teoretic pierderea de presiune în filtru determinată de înălcroarea cu praf.

3.1.1.3.1. Contribuții la alegerea materialului filtrant.

În exploatarea filtrelor de praf se pune problema realizării pierderilor de sarcină minime, pentru aceiași eficiență a reținerii. Deci, pentru un material filtrant caracterizat prin densitatea fibrei în filtru S_f , funcționarea optimă se obține pentru :

$$\frac{d(\Delta p)}{dS_f} = 0 \quad (3.20)$$

Derivând expresia (3.19) în raport cu densitatea fibrei S_f , și

după efectuarea calculelor se ajunge la :

$$\frac{d(\Delta p)}{d S_f} = \frac{4\mu \delta v_0 (\ln S_f + 2C + 1)}{r_f^2 (-\frac{1}{2} \ln S_f - C) a^2 [\ln (S_f + \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta p V_f}) + 2C]} \quad (3.21)$$

$$\frac{4\mu \delta v_0 \{ \ln [S_f + \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta p V_f}] + 2C \} - [m + (1-\varepsilon)\delta p V_f] - \delta \mu \delta p v_0 (1-\varepsilon)\delta p V_f (-\frac{1}{2} \ln S_f - C)}{a^2 r_f^2 (-\frac{1}{2} \ln S_f - C) \{ \ln [S_f + \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta p V_f}] + 2C \}^2 [m + (1-\varepsilon)\delta p V_f]}$$

Pentru ca $\frac{d(\Delta p)}{d S_f} = 0$, trebuie să fie adevărată expresia :

$$\ln (S_f + \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta p V_f}) [1 + \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta p V_f}] + \frac{2mC}{(1-\varepsilon)\delta p V_f} + 4 \ln S_f + 10C = 0 \quad (3.22)$$

După prelucrarea ecuației (3.22) se ajunge la relația importantă :

$$\ln [S_f + \frac{m}{(1-\varepsilon)\delta p V_f}] + \frac{4(1-\varepsilon)\delta p V_f}{m + (1-\varepsilon)\delta p V_f} \ln S_f - 2C = 0 \quad (3.23)$$

Din relația (3.17) rezultă $m = (1 - \varepsilon) / \delta p V_p$, valoare care se introduce în relația (3.23), și după efectuarea calculelor se obține :

$$\ln (S_f + \frac{1}{\delta p^2 V_p V_f}) + \frac{4}{\delta p^2 V_p V_f + 1} \ln S_f + 2C = 0 \quad (3.24)$$

În condițiile acumulării unei cantități oit mai mari de praf în masa materialului filtrant (condiție de uzinaj normală) se admite că:

$$\frac{1}{\delta p^2 V_p V_f} \cong 0 \quad (3.25)$$

atunci relația (3.24) devine :

$$\ln S_f + 4 \ln S_f = -2C \quad (3.26)$$

și prin integrare se obține soluția :

$$S_f = e^{-\frac{2}{5}C} \quad (3.27)$$

Se introduce noțiunea de complex constructiv al filtrului λ_f , definit de relația:

$$\lambda_f = \ell \cdot r_f^2 \quad (3.28)$$

și ținînd seama de relațiile (3.7) și (3.27) rezultă :

$$\lambda_f = \frac{1}{\pi} e^{-\frac{2}{5}C} \quad (3.29)$$

Deci, între lungimea firului și raza sa r_f , pentru ca eficiența filtrului să fie maximă, trebuie îndeplinită condiția :

$$r_f = \sqrt{\frac{\lambda_f}{\ell}} \quad (3.30)$$

3.1.1.4. Debitul specific de aer al filtrului, q_f , reprezintă debitul de aer proaspăt ce poate fi filtrat de $1m^2$ de filtru, în condiții medii de îmbicsire, astfel ca rezistența aerului să nu depășească limita/valoarea normală. Suprafața necesară filtrului se determină cu relația :

$$S = \frac{q_n a}{q_f} \quad (3.31)$$

în care q_n este debitul de aer ce trebuie filtrat.

3.1.2. Filtre electrice

Filtrele electrice sînt precipitatorre electrostatice, asigurînd un grad mare de separare, putînd fi asimilate ca principiu de funcționare cu mașinile cu propulsie ionică [163].

Procesul de separare dintr-un electrofiltru (precipitator) presupune [163] parcursul a trei etape fundamentale :

- 1 - particulele în suspensie (impuritățile sau praful) sînt încărcate electri de către ionii fluidului (aerului) ;
- 2 - o forță electrică (a câmpului electric) este aplicată particulelor de praf și le conduce pe suprafața (placa) de colectare ;
- 3 - particulele precipitate sînt separate de placa de colectare printr-un sistem de smulgere sau de spălare.

Schema funcțională, de principiu, a unui filtru electric este prezentată în figura 3.2., unde cu 1 s-a notat sursa de tensiune

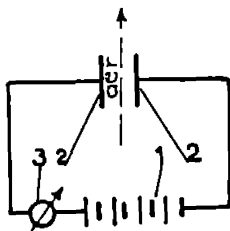


Fig.3.2. Schema funcțională a filtrului electric

cu 2 electrozii, iar cu 3 galvanometrul, care indică trecerea unui curent de la un electrod la altul. Între electrozi se produce ionizarea aerului, fenomen datorită căruia are loc și producerea unei cantități foarte mici de ozon care contribuie la înlăturarea eventualelor urme de miros ale aerului.

În funcționarea filtrelor electrice se folosește curentul continuu, pentru ca particulele aflate în suspensie în aer, să se deplaseze într-o singură direcție.

Ionizarea aerului între electrozi poate avea loc în următoarele condiții [163] :

- 1 - în mod dependent , sub acțiunea razelor unor substanțe radioactive, raze Röntgen, etc.;

2- în mod independent, prin mărirea tensiunii în circuitul electric pînă la valori care depășesc constanta dielectrică a aerului/gazului dat,

Modul independent de producere a ionizării aerului este cel folosit în scopuri tehnice de purificare pentru filtrele electrice tubulare sau cu plăci orizontale ori verticale, ca și pentru filtrele electrice cu ionizare prealabilă. Mărind diferența de potențial dintre electrozi pînă la atingerea valorii critice, numită tensiune de străpungere pentru aer, stratul de aer va fi străpuns și intensitatea curentului va crește brusc, iar ca urmare între electrozi va apărea o scînteie, fenomen caracterizat prin apariția unei luminescențe în jurul suprafeței electrozului, și care poartă numele de "efectul corona". Filtrele electrice folosesc efectul corona negativ.

Tensiunea critică a cîmpului electric la care apare efectul care generează o intensitate a cîmpului E_0 , în KV/cm, este dată în relația :

$$E_0 = a_1 + \frac{b_1}{\sqrt{r_0}} \quad (3.32)$$

în care r_0 este raza electrodului, în cm ; a_1 și b_1 sînt constante ce depind de polaritatea efectului corona - în cazul efectului corona negativ (cel folosit la filtrele electrice):

$a_1 = 33$ și $b_1 = 9,54 \sqrt{S_a}$, S_a fiind densitatea aerului.

Tensiunea critică la suprafața unui electrod U_0 , în kV, este :

$$U_0 = E_0 r_0 \ln \frac{R}{r_0} \quad (3.33)$$

unde R este raza tubului (în care se află electrodul), Aceiași formulă poate fi aplicată în primă aproximatie și pentru electrozii cu formă plată cînd R se înlocuiește cu d , care reprezintă distanța între plăci, (r_0 avînd semnificația de grosime a plăcii).

Forța (electrică) F , în N, care conduce la separarea particulelor de praf din curentul de aer este:

$$F = n \cdot e \cdot E_c \quad (3.34)$$

în care E_c este intensitatea cîmpului electric ; $E_0 = (2+3)E_c$; e este sarcina electrică elementară ($4,8 \cdot 10^{-10}$ unități electrostatice); n este numărul sarcinilor elementare ale unei particule :

$$n = (1+2 \frac{k-1}{k+2}) \frac{E_c d^2 p}{40} \quad (3.35)$$

unde : k este constanta dielectrică, iar d_p este diametrul particulelor.

Particulele aflate în suspensie în aer, în camera filtrelor electrice sînt supuse acțiunii forțelor de gravitație, de inerție forțelor cîmpului electric și ale vîntului electric. În comparație cu mărimea forței cîmpului electric, forțele de gravitație, de inerție și a vîntului electric ce acționează asupra particulei pot fi neglijate.

Rezistența opusă de aer la deplasarea între electrozi a particulei este dată de legea lui Stokes, fiind :

$$F' = 3\pi \eta d_p w_0 \quad (3.36)$$

unde η este coeficientul de vîscozitate cinematică a aerului și w_0 viteza de depunere a particulei.

În cazul regimului staționar de mișcare a particulei :

$$F = F' \quad , \text{ adică } 3\pi \eta d_p w_0 = n e E_c \quad (3.37)$$

din care rezultă :

$$w_0 = \frac{n e E_c}{3\pi \eta d_p} \quad (3.38)$$

Cunoscîndu-se viteza de depunere w_0 se determină timpul în care particula parcurge spațiul x pentru depunere. Astfel, impunînd condițiile de margine pentru un filtru electric tubular la care $x_1 = r$ și $x_2 = R$, sau pentru un filtru electric cu electrozi plăți la care $x_1 = 0$ și $x_2 = d$, rezultă:

$$t = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{w_0} \approx \frac{1}{w_0} |x|_{x_1}^{x_2} \quad (3.39)$$

sau :

$$t = \frac{1}{w_0} (R - r) \quad , \text{ respectiv } t = \frac{d}{w_0} \quad (3.39)$$

În practică timpul menținerii aerului în cîmpul electric se stabilește în mod experimental ținînd seama de proprietățile și cantitatea impurităților din aer, precum și de gradul de separare necesar. Legătura între timpul de depunere și gradul de separare este de forma [163] .

$$1 - \eta = k_1 t \quad (3.40)$$

în care : k_1 este o constantă a filtrului electric și a tipului de praf (pentru prafuluri bune conducătoare de electricitate $k = 0,05 \dots 0,5$).

iar η este randamentul separării prafului, calculat cu relația :

$$\eta = 1 - e^{-\frac{S_c}{q} W_0} \quad (3.41)$$

unde : S_c este suprafața de colectare ;

q - debitul de aer.

Timpu de menținere a aerului în câmpul electric este, de asemenea, legat de lungimea electrozilor și viteza de deplasare a aerului. Pentru o distanță de 3...4 m, viteza aerului este de 0,8...1,5 m/s pentru filtrele electrice tubulare și de 0,5...1 m/s pentru cele cu plăci.

Impunând valoarea pentru gradul de separare, în funcție de conținutul de praf din atmosferă în zona captării pentru ozonizare din integrarea și prelucrarea relației (3.41) se determină mărimea suprafeței colectoare :

$$S_c = \frac{q}{W_0 \ln(1-\eta)} \quad (3.42)$$

Dimensiunile particulelor de praf fiind diferite, N fiind coeficientul de participare pe diametrii d_p ai particulelor de praf ($\sum N=1$), suprafața colectoare are expresia :

$$S_c = \frac{q}{W_0 \ln(1-\eta)} \sum \frac{N_i}{W_{0,i}} \quad (3.42')$$

admițînd că repartitia prafului în aerul captat este uniformă.

Puterea electrică necesară unui filtru se determină [163] cu relația :

$$P = \frac{0,707 U K_t I_0 m_c}{10^3 \eta_1} + \frac{0,5}{\eta_2} \quad (3.43)$$

în care: U este tensiunea la partea de joasă tensiune a transformatorului ; I_0 - intensitatea curentului electric ; K_t - coeficient de transformare ; m_c - coeficientul formei curbei curentului electric (1,42...2,26) $\eta_{1,2}$ - randamentul agregatului electric și respectiv al motorului electric al redresorului (0,7...0,8)

Rezistența aerului la filtrele electrice este mică avînd valori [115] de 4...6 mm H_2O în funcție de viteza de deplasare a aerului, rămînînd practic constantă pentru un regim pe durata funcționării agregatului.

3.2. Răcirea aerului

Pentru a obține un efect de răcire corespunzător se folosesc schimbătoarele de căldură răcitor (baterii de răcire a aerului) în sistemul de preparare a gazului de înaltă și medie presiune, respectiv răcitoare frigorifice cu gaz în sistemul de preparare a gazului de medie și joasă presiune. Pentru obținerea unui efect de răcire mai pronunțat cele două tipuri se pot utiliza concomitent în sistemul cel mai frecvent utilizat în prepararea gazului, anume în cel de medie presiune.

În bateriile de răcire reducerea temperaturii aerului se poate produce în două moduri esențial diferite : a) fără condensarea vaporilor de apă și b) cu condensarea vaporilor de apă.

Răcirea aerului fără condensare se produce prin contactul indirect între agentul de răcire și aer, în baterii din țevi cu aripioare (figura 3.3).

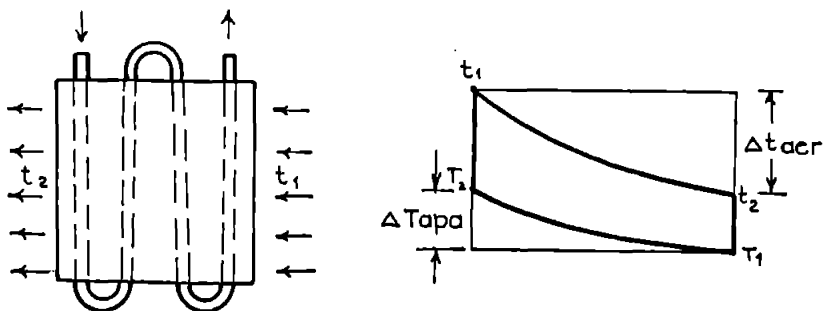


Fig. 3.3. Schema bateriei de răcire și diagrama temperaturilor

Pentru răcirea aerului de la temperatura t_1 la temperatura t_2 trebuie extras un debit de căldură L_{aer} dat de expresia :

$$L_{aer} = Q_a (i_1 - i_2) \quad (3.44)$$

debit de căldură ce trebuie să fie preluat integral de agentul de răcire (apă) care se va încălzi de la temperatura T_1 la temperatura T_2 ,

$$L_{ap\grave{a}} = k_t S_c \Delta t_m = \frac{1}{3.6} Q_a \cdot c_a (T_2 - T_1) \quad (3.45)$$

în care $L_{aer,ap\grave{a}}$ - debitul de căldură, în W, ce trebuie extras din aer, respectiv preluat de apă ; q_a - debitul de aer, în kg/h ; $i_{1,2}$ - entalpia inițială respectiv finală a aerului, în kJ/kg;

k_t - coeficientul global de transfer termic, în $W/KK.m^2$; S_G - suprafața de schimb de căldură a bateriei, în m^2 ; t_m - diferența medie de temperatură dintre aer și apă în $^{\circ}C$; Q_n - debitul apei de răcire, în kg/h ; c_n - căldura specifică a apei, în $kJ/kg^{\circ}K$.

Determinarea coeficientului k_c este mai dificilă, dar în mod aproximativ [115] se folosește relația :

$$k_t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \cdot \frac{S_e}{S_i} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (3.46)$$

unde :

$$\alpha_i = 2040(1 + 0,015 T_a) v^{0,87} \cdot d_i^{-0,13} \quad (3.47)$$

în care: α_i - coeficientul de schimb superficial la interior, în $W/m^2 \cdot ^{\circ}K$; S_e - suprafața exterioră a elementelor de încălzire (țevi + aripioare), în m^2 ; S_i - suprafața interioară a elementelor de încălzire, în m^2 ; α_e - coeficientul de schimb superficial la exterior (pe partea de aer), în $W/m^2 \cdot ^{\circ}K$; T_a - temperatura medie a apei care circulă prin țevi, în $^{\circ}C$; v - viteza apei în țevi, în m/s ; d_i - diametrul interior al țevii, în m .

Pentru calculele practice se recomandă a se considera :
 $V > 1,0$ m/s ; $T_a = 10...15^{\circ}C$; $d_i = 0,012...0,015$ m ;

$$\frac{S_e}{S_i} = 15 \dots 20 ; \alpha_e = 30... 60 W/m^2 \cdot K.$$

Condensarea vaporilor de apă se produce atunci când temperatura superficială exterioră a bateriei de răcire este mai mică decât temperatura punctului de rouă a aerului la intrarea în baterie [115]. Apa de răcire se încălzește datorită căldurii perceptibile (Q_p) urmare a diferenței de temperatură, și datorită căldurii latente (Q_L) prin condensarea vaporilor de apă din aerul de răcit, în conformitate cu relația :

$$L_{ap\acute{a}} = Q_p + Q_L = \alpha S (t_a - t_p) + G \cdot S \cdot r (x_a - x_p) \quad (3.48)$$

unde : α - coeficientul de schimb superficial pentru căldura perceptibilă, în $W/^{\circ}K m^2$; t_p - temperatura superficială exterioră a bateriei, în $^{\circ}C$; t_a - temperatura aerului în $^{\circ}C$; G - coeficientul de evaporare în $kg/m^2 \cdot h$; x_a - conținutul în umiditate al aerului, în kg/kg ; x_p - conținutul în umiditate al aerului din stratul limită al țevii, în kg/kg ; r - căldura

latentă masică de vaporizare, în kj/kg.

După efectuarea calculelor și ținând seama că $G = \alpha / \alpha' = 4 \alpha$, expresia debitului de căldură preluat de apă devine :

$$L_{\text{apă}} = 4 \alpha S (t_d - t_p) \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (3.40)$$

Pierderile de sarcină ale aerului în bateriile de răcire fără condensare, ΔP în general nu depășesc 200 mm col. H₂O [115], și pentru tipurile fabricate sînt date diagrame din care se determină în funcție de numărul rîndurilor de țevi și de viteza gravimetrică w_G , în kg/m².s, a aerului.

În cazul răcirii cu condensare pierderea de sarcină, datorită reducerii secțiunii de trecere a aerului ca urmare a condensării

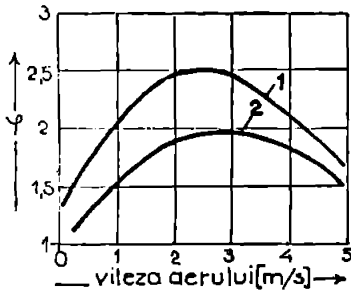


Fig. 3.4. Factorul de legătură între ΔP și $\Delta P'$ [115]. 1- pasul aripioarelor 2mm, 2- idem, 3 mm.

vaporilor de apă, este mai mare decât în cazul răcirii fără condensare. În graficul din figura 3.4. se prezintă variația coeficientului care face legătura între pierderea de sarcină în bateriile de răcire fără condensare, ΔP , iar în cele cu condensare, $\Delta P'$.

$$\Delta P' = \psi \Delta P \quad (3.50)$$

3.3. Uscarea aerului.

Uscarea aerului înainte de a intra în generatorul de ozon este o operație cheie, de mare însemnătate și răspundere a procesului complex de preparare a aerului pentru a fi ozonat. Uscarea este necesară pentru reducerea umidității aerului pînă la atingerea punctului de rouă de minus 40 la minus 60°C. Temperatura punctului de rouă t_r reprezintă temperatura la care începe condensarea vaporilor de apă la răcirea izobară, cu conținut de umiditate constant, a aerului umed, sau este temperatura pentru care presiunea vaporilor de apă din aerul umed de o anumită temperatură și conținut de umiditate, răcit izobar, devine egală cu presiunea lor de saturație.

Dependența umidității absolute în funcție de temperatura punctului de rouă se prezintă în graficul din figura 3.5.

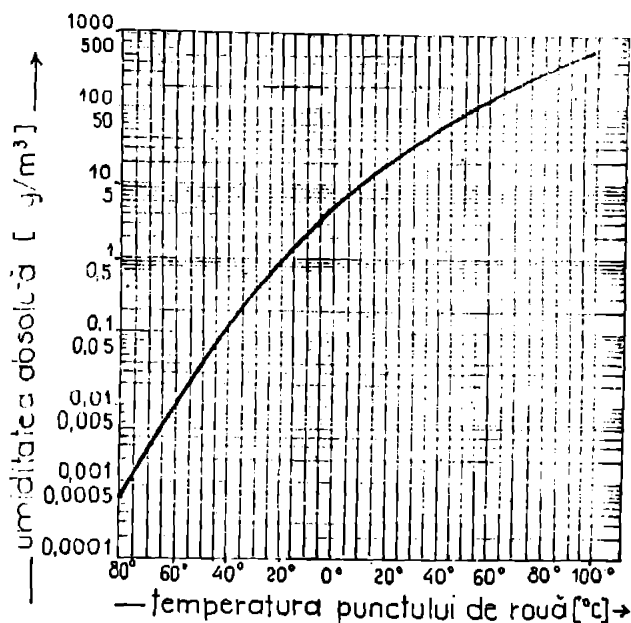


Fig. 3.5. Umiditatea absolută a aerului atmosferic la saturație, în funcție de punctul de rouă [108]

Un agregat de uscare a aerului se compune din două compartimente, unul activ de micșorare a umidității și celălalt fiind în procesul de regenerare a materialului adsorbant. Diferența esențială între agregatele de uscare a aerului o constituie modul de regenerare, pe baza utilizării căldurii sau fără căldură (sobre exemplu variația presiunii).

Ca material adsorbant al umidității din aer se folosește silicagelul, alumina calcinată, schimbătorii de ioni (cristale de zeoliți) și sitele moleculare, acestea în combinație cu silicagelul sau alumina calcinată. Cea mai răspândită utilizare o are silicagelul care poate fi impregnat cu un colorant (spre exemplu CoCl_2) care-și modifică culoarea la epuizarea capacității de adsorbție.

În figura 3.6 este prezentat în principiu un uscător de aer la care regenerarea materialului adsorbant se face cu ajutorul căldurii.

După desăvîrșirea regenerării este necesară răcoirea materialului adsorbant pentru a putea realiza, în condiții optime, ciclul următor de uscare.

Regenerarea materialului fără căldură se bazează pe folo-

sirea unui curent de aer la presiune inferioară celui din trompa

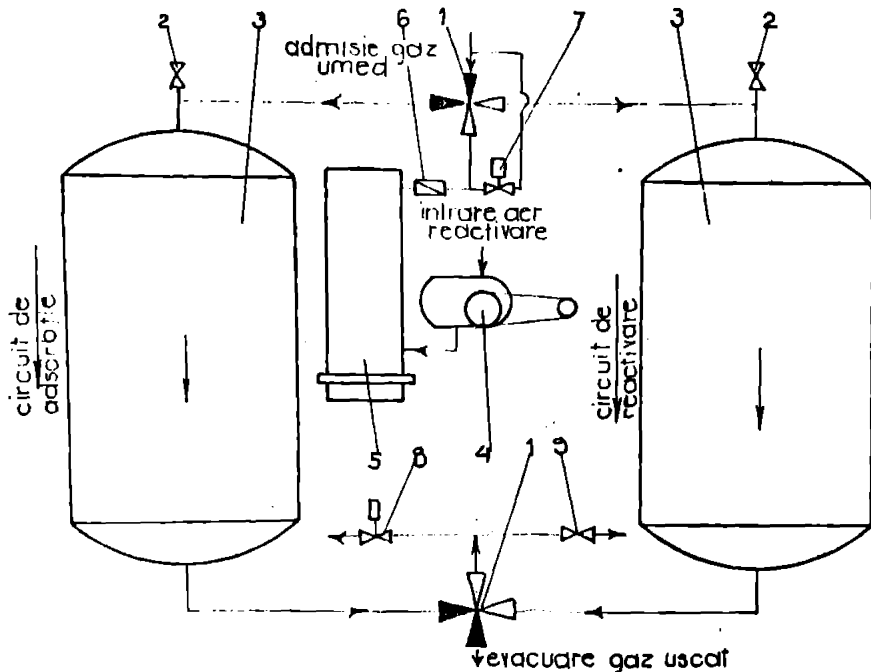


Fig.3.6. Agregat de uscare a aerului cu regenerare prin agent termic

de adsorbție. Un asemenea uscător de aer este prezentat schematic în figura 3.7.

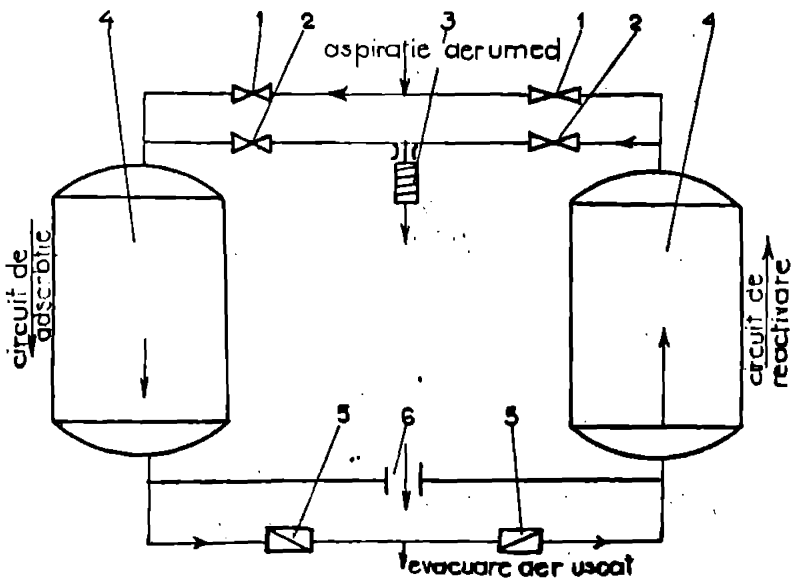


Fig.3.7. Agregat de uscare a aerului cu regenerare prin micșorarea presiunii curentului de aer

La acest tip de agregate de uscare durata între cicluri se recomandă a fi de pînă la 5 minute. La uscătoarele de aer avînd regenerarea prin agent termic durata regenerării (regenerare propriuzisă plus răcirea) este de 2,5...5 ore, iar a ciclului activ, de adsorbție, de 6...7 ore [110.2].

3.3.1. Fenomenul uscării aerului

Uscarea aerului pe baza fenomenului de adsorbție a vaporilor de apă pe un pat fix dehidratant, realizat din material granular presupune parcurgerea mul multor procese fizice [110.2], cele mai semnificative fiind :

- transferul de masă din faza amestecului aer-vapori de apă la interfața solid-gaz, denumit difuzie externă ;
- transferul de masă a fazei condensate (apă) în corpul solid-capilar poros- denumit difuzie internă ;
- uniformizarea concentrației apei în diversele zone ale patului solid, denumită adsorbție cinetică ;
- evaporarea moleculelor de apă adsorbite, denumită desorbție, cu preluarea de către agentul de regenerare.

Evoluția procesului de adsorbție, considerînd zona de transfer de masă care se deplasează prin stratul adsorbant, în baza ipotezei lui Treybal [110.2], este prezentată sub formă grafică, alături de variația concentrației de vapori a aerului, în figura 3.8, unde cu C s-au notat concentrațiile vaporilor de apă în aer

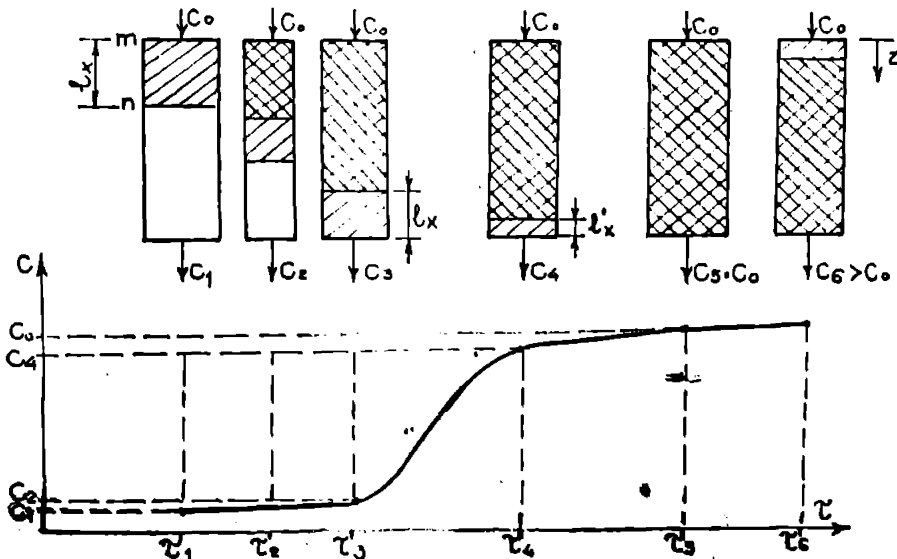


Fig. 3.8. Evoluția procesului de adsorbție .

și cu \tilde{t} timpul ; cifrele indicii indică poziția zonei de transfer (1- reprezintă momentul inițial, la ieșirea aerului din uscător; C_0 este concentrația în vapori de apă a aerului supus uscării).

La momentul inițial \tilde{t}_1 , materialul nu este saturat, adsorbția avînd loc în zona m-n de lungime l_x . Pînă la momentul \tilde{t}_3 zona transferului de masă s-a deplasat fără a ieși din aparat, iar concentrația vaporilor de apă din aerul evacuat are o creștere foarte mică, practic nesemnificativă. Acest moment corespunde " punctului de rupere " iar concentrația C_3 este denumită "de rupere". Din acest moment zona nesaturată se micșorează ($l'_x < l_x$), concentrația de vapori a aerului evacuat crește apropiindu-se de cea inițială, valoare atinsă la momentul \tilde{t}_5 , cînd practic adsorbția încetează. După opulzarea capacității de adsorbție (\tilde{t}_5), datorită desorbției concentrația în vapori a aerului depășește valoarea celei a aerului intradus.

Fenomenul uscării aerului este determinat de adsorbția umidității conținute în aer de către materialul patului deshidratant, în care adsorbția este adiabatică (procesul desfășurîndu-se în trepte pînă la saturarea materialului, adică pînă la pierderea capacității de adsorbție). În timpul procesului de uscare se degajă căldură de proces, iar pierderile de căldură prin pereții instalației se neglijează. Între materialul adsorbant și curentul de aer există un schimb de căldură și de masă convectiv, care se localizează în stratul limită, datorită dimensiunilor reduse ale materialului (sub 10 mm) și vitezelor de filtrare ale aerului prin materialul adsorbant relativ mici.

În aceste condiții creșterea căldurii uscate a aerului este egală cu schimbul termic convectiv, respectiv cu răcirea (cantitatea de căldură pierdută) materialului suport, iar scăderea cantității de vapori din aer este egală cu schimbul masic de proces, respectiv cu creșterea umidității materialului. Aceste fenomene sînt descrise de ecuațiile :

$$m_L \cdot c_{pL} \cdot \Delta t_L \cdot \Delta \tilde{t} = \alpha (t_s - t_L) \Delta A \cdot \Delta \tilde{t} = -\Delta m_S \cdot c_{pS} \cdot \Delta t_S \quad (3.50)$$

pentru schimbul de căldură, iar pentru schimbul masic de:

$$-m_L \cdot \Delta x_L \cdot \Delta \tilde{t} = G(x_L - x_S) \Delta A \cdot \Delta \tilde{t} = \Delta m_S \cdot \Delta x_S \quad (3.51)$$

în care: m_L este debitul masic de aer, în kg/s ; $c_{pL,S}$ - căldura

specifică a aerului respectiv materialului , în $\text{gJ/kg}^\circ\text{K}$;
 $\Delta t_{L,S}$ - diferența de temperatură a aerului respectiv a materialului, în $^\circ\text{K}$; $\Delta \tau$ - pasul de timp, în s ; α - coeficientul de convecție în $\text{W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$; $t_{L,S}$ - temperatura aerului respectiv materialului , în $^\circ\text{K}$; ΔA - pasul suprafeței laterale (de adsorbție) a materialului , în m^2 ; $\Delta m_B = m_B/n$ - masa elementară de material (corespunzătoare lui ΔA), în kg ; m_B - masa materialului, în kg ; n - numărul de pași în lungul instalației ; $\Delta x_{L,S}$ - variația umidității aerului respectiv materialului, în g vapor/kg aer, respectiv material ; G - coeficientul de schimb de masă (condensare sau evaporare) în $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$; $x_{L,S}$ - umiditatea aerului, respectiv la suprafața materialului, în g/kg.

Pentru determinarea caracteristicilor funcționale ale instalației de uscare a aerului se propune modelul fizic prezentat în figura 3.9.

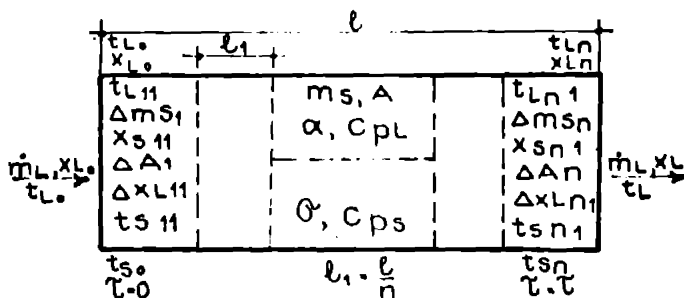


Fig.3.9. Model pentru zona de transfer de masă și căldură

Corespunzător relațiilor :

$$\Delta m_s = m_s/n \quad \text{și} \quad \Delta A = A/n \quad (3.52)$$

rezultă :

$$\Delta m_{s1} = \Delta m_{s2} = \dots = \Delta m_{sn} \quad \text{și} \quad (3.53)$$

$$\Delta A_1 = \Delta A_2 = \dots = \Delta A_n$$

Din ecuațiile (3.50) se determină variațiile temperaturii :

rii :

a) în spațiu, adică în lungul instalației :

$$\frac{\Delta t_L}{t_L - t_s} = - \frac{\alpha}{m_L \cdot C_{pl}} \cdot \Delta A \quad (3.54)$$

Inlocuind elementele finite mici cu elemente diferențiale rezultă

$$\frac{dt_L}{t_L - t_s} = - \frac{\alpha}{m_L \cdot c_{pL}} dA \quad (3.54)$$

După integrare și determinarea constantei din condiții de margine $A = 0$, $t_L = t_{L_0}$ (cunoscută) rezultă :

$$\ln \frac{t_L - t_s}{t_{L_0} - t_s} = - \frac{\alpha A}{m_L c_{pL}} \quad (3.55)$$

care se pune sub forma convenabilă :

$$t_L = t_s + (t_{L_0} - t_s) e^{-\frac{\alpha A}{m_L \cdot c_{pL}}} \quad (3.56)$$

b) în timp :

$$\frac{\Delta t_s}{t_s - t_L} = - \frac{\alpha \Delta A \cdot \Delta \tau}{\Delta m_s \cdot c_{ps}} \quad (3.57)$$

Prin același procedeu se integrează ecuația (3.57). Constanta de integrare se determină din condiția că la începutul procesului ($\tau = 0$) temperatura materialului din instalație este cunoscută ($t_s = t_{s_0}$). Deci, expresia temperaturii finale a materialului se stabilește cu relația :

$$t_{s\tau} = t_L + (t_{s\tau_0} - t_L) e^{-\frac{\alpha A}{m_s \cdot c_{ps}} \tau} \quad (3.58)$$

Din relațiile (3.51) se determină variația umidității :

a) în spațiu, pentru aer, pornind de la :

$$\frac{\Delta x_L}{x_L - x_s} = - \frac{G}{m_L} \Delta A \quad (3.59)$$

Integrând și punind condiția de margine, ca la intrarea în instalație

$A = 0$ și $x_L = x_{L_0}$, se obține după efectuarea calculului :

$$x_L = x_s + (x_{L_0} - x_s) e^{-\frac{GA}{m_L}} \quad (3.60)$$

b) în timp, pentru materialul adsorbant :

$$\frac{\Delta x_s}{x_{s\tau} - x_L} = - \frac{G \Delta A}{\Delta m_s} \quad (3.61)$$

Folosind același procedeu, pentru $\tau = 0$, $x_s = x_{s_0}$, se ajunge la :

$$x_{s\tau} = x_L + (x_{s\tau_0} - x_L) e^{-\frac{GA}{m_s} \tau} \quad (3.62)$$

Caracteristicile geometrice și structurale ale materialului

adsorbant trebuie să fie cunoscute. Astfel, volumul V , în m^3 , al instalației se determină cu relația :

$$V \cdot S \ell = \frac{\pi D_d^2}{4} \ell \quad (3.63)$$

unde: S este suprafața secțiunii transversale, în m^2 ; ℓ - lungimea respectiv înălțimea instalației, în m ; D_d - diametrul (secțiunea circulară fiind optimă), în m .

Suprafața laterală a particulelor (suprafață laterală totală) A , în m^2 , care reprezintă suprafața de transfer, este dată de relația:

$$A = \varphi_m V \quad (3.64)$$

în care φ_m este suprafața specifică a materialului, în m^2/m^3 , care se determină prin metoda Brunauer - Emmelt - Teller (B.E.T), și constă în măsurarea volumelor de azot gazos adsorbit, la temperatura de fierbere ($-196,0^\circ C$) la diferite presiuni. Dependența între volumul de azot adsorbit și presiune se exprimă cu relația [197]:

$$\frac{p}{(V_g/m)(p_s - p)} = \frac{1}{(V_g/m)' k_g} + \frac{k_g - 1}{(V_g/m)' - k_g} \cdot \frac{p}{p_s} \quad (3.65)$$

în care: V_g/m este volumul de gaz adsorbit de unitatea de masă adsorbantă, la presiunea p , în m^3/g ; $(V_g/m)'$ - volumul de gaz adsorbit de unitatea de masă adsorbantă, astfel încît aceasta să fie acoperită de un strat monomolecular, în m^3/g ; p, p_s - presiunea gazului, respectiv presiunea vaporilor saturați; k_g - constanta caracteristică gazului adsorbit.

Reprezentarea grafică a relației (3.65) în coordonate $p / \frac{V_g}{m} (p_s - p)$ și p/p_s conduce la trasarea unei drepte a cărei pantă și intersecție cu axa ordonatelor permite deducerea valorilor $(V_g/m)'$.

Notată cu x_g/m masa de azot adsorbită în stratul moleculelor pe suprafața materialului, în g/g , se determină din :

$$\frac{x_g}{m} = S_N \left[\left(\frac{V_g}{m} \right)' - \frac{V_g}{m} \right] \quad (3.66)$$

Suprafața specifică a materialului se determină utili-

sînd relația

$$\rho_m = \frac{x_g/m \cdot S_x \cdot N_0}{M} \quad (3.67)$$

în care a_x este aria secțiunii stratului moleculelor de azot avînd valoarea $(16,2 \cdot 10^{-20}) \text{ m}^2/\text{moleculă}$; N_0 - numărul lui Avogadro $(6,023 \cdot 10^{23})$ molecule/mol; M - masa moleculară a adsorbantului (azotului), 28 g/mol .

Porozitatea materialului adsorbant este caracterizată de volumul fazei solide, V_s , volumul porilor, V_p , volumul golurilor dintre granule, V_g , conform figurii 3.10. Volumul granulei este

$V_{gr} = V_s + V_p$, iar volumul total, volumul instalației este:

$$V_L = V_s + V_p + V_g$$

Volumul specific al porilor, V_{sp} poate fi dedus luînd în considerare densitatea reală ρ și densitatea aparentă ρ_g , cu relația:

$$V_{sp} = \frac{\rho - \rho_g}{\rho \cdot \rho_g} \quad (3.68)$$

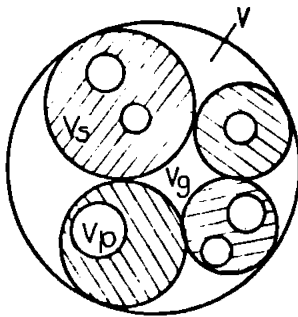


Fig. 3.10. Structura stratului de material adsorbant

Pentru determinarea structurii poroase a materialelor se folosesc una (sau mai multe) din metodele: microscopie optică și electronică, dispersia razelor X sub unghiuri mici; penetrarea mercurului sub presiune; metoda densimetrică; metoda "adsorbție-desorbție" (care folosește fenomenul condensării capilare). Utilizînd metoda "adsorbție-desorbție" cu azot, și considerînd ecuația lui Kelvin, rezultă raza porilor r , în m , conform relației:

$$r = \frac{2\sigma_N \cdot M}{\rho_N \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_a}{p_s}} \quad (3.69)$$

în care: σ_N este tensiunea superficială a azotului, în N/m ; M - masa moleculară a azotului, în g/mol ; ρ_N - densitatea azotului lichid, în g/m^3 ; p, p_a - presiunile la echilibru și respectiv la saturația vaporilor de azot.

Pentru un material adsorbant dat, cunoscîndu-se parametrii aerului la intrare (t_{L0}, x_{L0}, m_L), coeficienții și σ , conți-

nutul maxim de umiditate ($x_{g adm}$), în funcție de temperatură, calculul evoluției procesului de uscare a aerului, conform relațiilor (3.56), (3.58), (3.60) și (3.62) se poate determina folosind programul de calcul al cărui algoritm este prezentat în figura 3.11.

3.3.2. Regenerarea materialului adsorbant

La epuizarea capacității materialului adsorbant de a reține vaporii de apă din aer, când se atinge $x_{s adm}(\tau_3)$, circuitul aerului, prin agregatul/installația activă de uscare trebuie întrerupt, dar materialul adsorbant trebuie să fie regenerat.

Atunci când regenerarea se face cu aer încălzit (schemă din fig.3.6) temperatura aerului de regenerare optimă este cuprinsă în intervalul $120^\circ \dots 230^\circ C$ [110.2]. Pentru acest proces, similar ca și conținut, dar opus ca desfășurare a procesului de uscare a aerului, relațiile care caracterizează schimbul masic și de căldură din instalație sînt :

$$m_{LC} c_{pL} \Delta t_L \Delta \tau = \alpha (t_L - t_s) A A \Delta \tau \cdot \Delta m_s \cdot c_{ps} \Delta t_s \quad (3.70)$$

$$m_{LC} \Delta x_L \Delta \tau = G (x_s - x_L) A A \Delta \tau = - \Delta m_s \cdot \Delta x_s \quad (3.71)$$

în care m_{LC} este debitul masic de aer cald, în kg/h, utilizat pentru regenerarea materialului adsorbant, restul notațiilor pîstrîndu-și semnificația ca și la relațiile (3.50) și (3.51).

Urmînd același procedeu de calcul ca în cazul uscării aerului rezultă :

a) variația temperaturii

$$- \text{în spațiu} : t_L = t_s + (t_{L0} - t_s) e^{-\frac{\alpha A}{m_{LC} c_{pL}}} \quad (3.70 a)$$

$$- \text{în timp} : t_{s\tau} = t_L + (t_s - t_L) e^{-\frac{\alpha A}{m_s c_{ps} \tau}} \quad (3.70 b)$$

b) variația umidității

$$- \text{în spațiu} : x_L = x_s + (x_{L0} - x_s) e^{-\frac{GA}{m_{LC}}} \quad (3.71 a)$$

$$- \text{în timp} : x_{s\tau} = x_L + (x_s - x_L) e^{-\frac{GA}{m_s \tau}} \quad (3.71 b)$$

Procedeu de regenerare a materialului adsorbant cu aer încălzit se utilizează, cu precădere, cînd presiunea aerului la ieșirea din instalație nu trebuie să fie mare (sub 5 m col. H₂O).

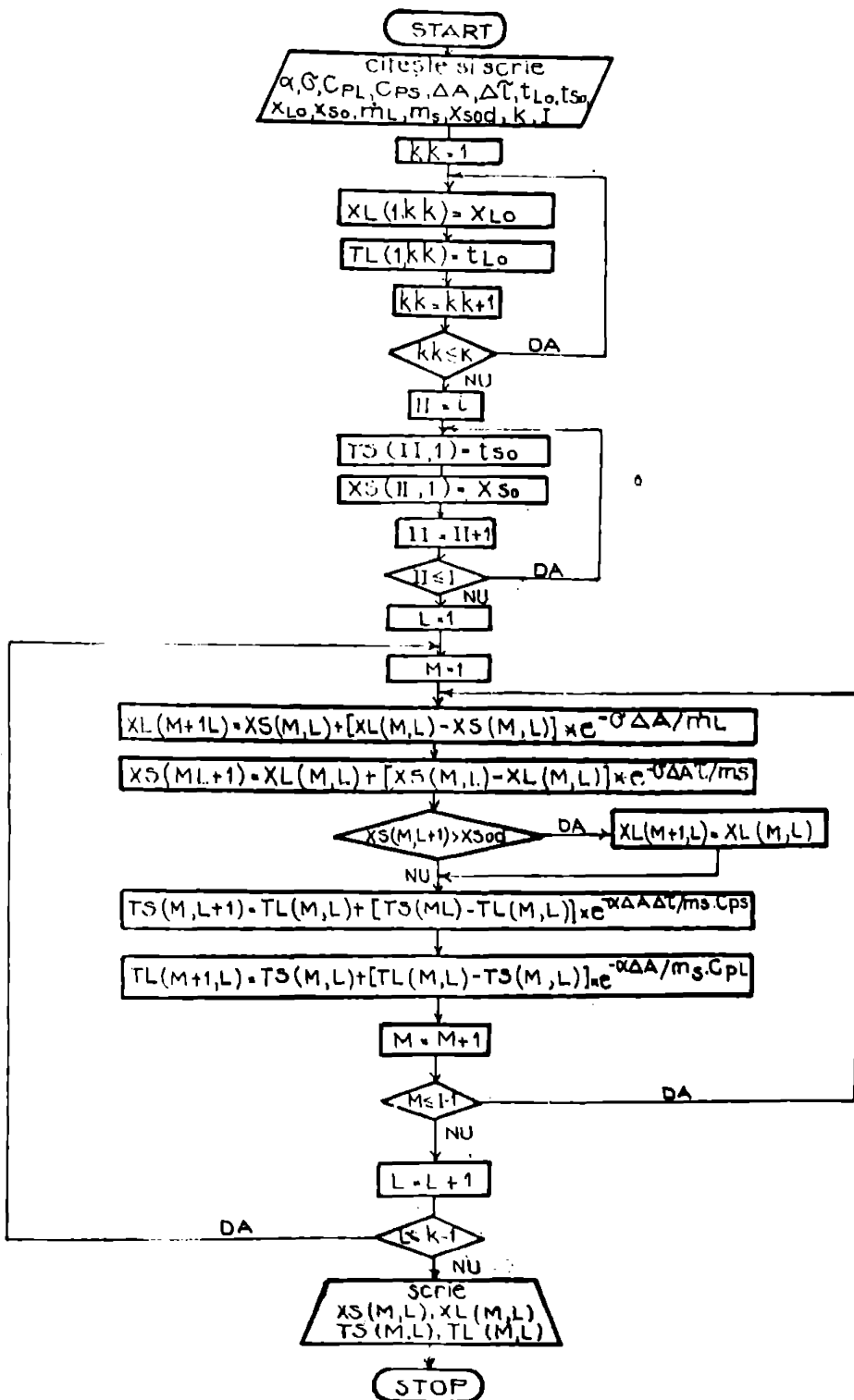


fig. 3.11.

În procesul regenerării materialului adsorbant, acesta își ridică temperatura, motiv pentru care următoarea etapă a procesului o constituie răcirea dinamică cu aer rece insuflat.

Pentru o funcționare rațională a instalației trebuie să fie respectată relația :

$$\tau_U + \tau_R \leq \tau \quad (3.72)$$

în care: τ_U este timpul uscării materialului adsorbant (timpul de regenerare) ; τ_R - timpul de răcire ; τ - timpul necesar uscării aerului pentru asigurarea parametrilor necesari.

În situația în care la ieșirea din instalația de uscare se solicită presiuni mai mari (peste 7 m col. H₂O), pentru regenerarea materialului adsorbant se recomandă metoda fără răcire, bazată pe folosirea unui curent de aer la presiune mai mică ($\leq 40\%$) decât a celui din trepte de adsorbție , conform schemei prezentate în figura 3.7. Curentul de aer trecut deasupra materialului adsorbant preia vaporii datorită fenomenului de convecție. Acești vapori trebuie , în momentul inițial al uscării materialului, să străbată stratul limită prin difuzie. Pentru transferul de masă este valabilă legea lui Fick, adică :

$$q_d = - D_1 \frac{dC_v}{dz} \quad (3.73)$$

unde : q_d este densitatea curentului difuziei, în kg/m².h ; C_v - concentrația vaporilor de apă, în kg/m³ ; D_1 - coeficientul de difuzie, în m²/h ; z - direcția de propagare a aerului (înălțimea) , în m. Concentrația C_v , poate fi determinată/exprimată cu ecuația :

$$C_v = \frac{p_v}{R_v t_L} \quad (3.74)$$

în care: p_v este presiunea parțială a vaporilor , în N/m² ; R_v - constanta caracteristică a vaporilor ($R_v = 462 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$) ; t_L - temperatura aerului, în $^\circ\text{K}$.

Introducând relația (3.74) în legea lui Fick rezultă :

$$q_d = - \frac{D}{R_v t_L} \cdot \frac{dp_v}{dz} \quad (3.75)$$

Deoarece presiunea parțială a vaporilor de apă se completează cu presiunea parțială a aerului, la presiunea totală p considerată constantă în secțiunea de calcul, unei cedări de

vapori de apă din masa materialului adsorbant îi corespunde o cădere a presiunii parțiale a aerului, în direcția opusă. Deoarece relația (3.75) trebuie să fie valabilă și pentru aer, înseamnă că un curent de aer m_{Ld} contradifuzență curentului de vaporii q_d .

Cantitatea de vaporii care este transportată în unitatea de timp prin unitatea de suprafață cu viteza V este $V \cdot C_d$. Se obține, deci, pentru curentul total de vaporii pe unitatea de măsură a suprafeței ecuația :

$$q_d = -\frac{D}{Rv t_L} \cdot \frac{dp_v}{dz} + v \frac{p_d}{Rv t_L} \quad (3.76)$$

O relație de același tip cu (3.75) trebuie să fie valabilă și pentru curentul de aer. Dar, după cum a demonstrat Eckert [117.1] curentul de aer trebuie să fie nul, condiție care conduce la :

$$m_{Ld} = -\frac{D}{R_L t_L} \cdot \frac{dp_L}{dz} + v \frac{p_L}{R_L t_L} = 0 \quad (3.77)$$

de unde se determină :

$$v = \frac{D}{p_L} \cdot \frac{dp_L}{dz} \quad (3.78)$$

Introducînd expresia vitezei în relația (3.75) se ajunge la legea lui Stefan exprimată de relația :

$$q_d = \frac{D}{Rv t_L} \cdot \frac{p}{p_v} \frac{dp_v}{dz} \quad (3.79)$$

în care s-a ținut seama de expresiile :

$$p_L = p - p_v \text{ și } dp_L/dz = -dp_v/dz \quad (3.80)$$

Atunci cînd instalația de uscare este de secțiune constantă densitatea curentului de vaporii, în stare de regim stabilizat, este independentă de înălțimea z , și după separarea variabilelor, din (3.79) se ajunge la :

$$\frac{dp_v}{p - p_v} = \frac{q_d}{D} \cdot \frac{p dt_L}{p} dz \quad (3.81)$$

iar prin integrare, în limitele $z=0$ la $z=h$ pentru înălțimea, și p_{v1} respectiv p_{v2} pentru presiunile parțiale a vaporilor la intrarea și respectiv la ieșirea din instalație rezultă :

$$\ln \frac{p - p_{v1}}{p - p_{v2}} = q_d \frac{h}{D} \frac{Rv t_L}{p} \quad (3.82)$$

din care:

$$q_d = \frac{D}{h} \frac{p}{Rv t_L} \ln \frac{p - p_{v1}}{p - p_{v2}} \quad (3.82')$$

În cursul procesului de uscare a materialului adsorbant acesta pierde apa reținută anterior - în ciclul activ de reținere - până când se ajunge la situația limită $p_{v1} = p_{v2}$, ceea ce înseamnă că s-a atins un echilibru și că din acest moment materialul adsorbant va reține vaporii din aerul de uscare mărindu-și conținutul de apă, proces ilustrat în graficul din figura 3.13.

Timpul T între două porniri (începutul procesului de uscare a aerului) pentru instalația de uscare a aerului (desiccator) este:

$$T = \tau + \tau_u \tag{3.83}$$

în care: τ reprezintă durata de reținere a umidității din aerul de proces (ciclul activ al uscării aerului); τ_u este durata de uscare (regenerare) a materialului adsorbant.

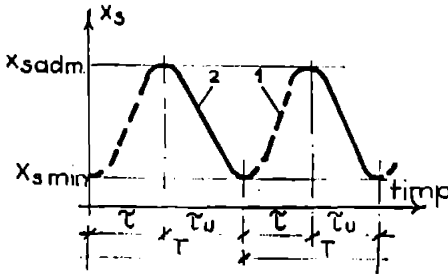


Fig. 3.13. Dependența x_s - în uscarea cu regenerare prin variația presiunii. 1- uscare aer; 2- regenerare material adsorbant

În situația în care $\tau = \tau_u$ înseamnă că funcționarea instalației este optimizată.

Pe timpul regenerării materialului adsorbant cantitatea de vaporii/umezeală antrenată

de curentul de aer corespunde umidității admise a materialului adsorbant la uscarea aerului, adică:

$$\frac{q_d A \tau_u}{m_s} = x_s \text{ adm} \tag{3.84}$$

Punând condiția funcționării optimizate a instalației, exprimând pe τ din relația (3.62) și pe τ_u din relația (3.84) rezultă condiția:

$$\ln \frac{x_s \tau_0 - x_L}{x_s \tau - x_L} \cdot \frac{G}{D} \cdot \frac{h \cdot R_v \tau_L}{p} \cdot \frac{x_s \text{ adm}}{\ln \frac{p - p_{v1}}{p - p_{v2}}} \tag{3.85}$$

din care se determină condiția de funcționalitate h/p a instalației:

$$\frac{h}{p} = \frac{D}{G} \cdot \frac{\ln \frac{p - p_{v1}}{p - p_{v2}}}{x_s \text{ adm} \cdot R_v \tau_L} \cdot \ln \frac{x_s \tau_0 - x_L}{x_s \tau - x_L} \tag{3.86}$$

În funcție de caracteristicile materialului adsorbant folosit și cele ale aerului de regenerare (care este tocmai aerul ce trebuie să fie uscat, dar la presiune mai mică decât în coloana activă a instalației) exprimarea grafică calitativă a condiției

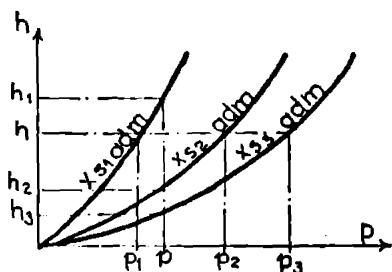


Fig. 3.14. Dependenta h-p în situația regenerării prin variația presiunii

funcționale este redată în graficul din figura 3.14. Se observă importanța corelării geometriei coloanei de uscare și parametrilor funcționali ai materialului adsorbant sau parametrilor de lucru ai instalației de uscare, dintre care, în acest caz, presiunea este parametrul esențial atât în ciclul activ al coloanei cât și în cel de regenerare al materialului adsorbant.

3.1.3. Căderea de presiune în instalația de uscare a aerului

Pentru determinarea căderii de presiune Δp în desicator se ține seama pe lângă modul de alcătuire al unei coloane a instalației - prezentat în fig. 3.15 - , de traseul aerului și de rezistențele locale pe care le întâlneste . Astfel:

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 \quad (3.87)$$

unde: $\Delta p_{1,2,3}$ reprezintă respectiv pierderile de presiune la intrare, în lungul și la ieșirea din desicator.

Pierderea de presiune în lungul desicatorului depinde de viteza și proprietățile fizice ale aerului și de caracteristicile geometrice ale materialului de umplură, considerând stratul granular de umplură ca o sumă de corpuri solide inversate în aer. În aceste condiții expresia pierderii de presiune în lungul desicatorului este :

$$\Delta p_2 = \lambda \frac{h}{d_e} \frac{w^2}{2} \rho \quad (3.88)$$

în care: λ este coeficientul de frecare care ține seama căderea de presiune datorită frecării aer-material, precum și de modificările vitezei pe direcția de curgere a aerului prin canalele for-

măte de particulele materialului desicator și este în funcție de regimul de curgere al aerului ; h - lungimea stratului de umplutură ; d_e - diametrul echivalent al secțiunii de curgere ; W - viteza reală a aerului ; ρ - densitatea aerului ;

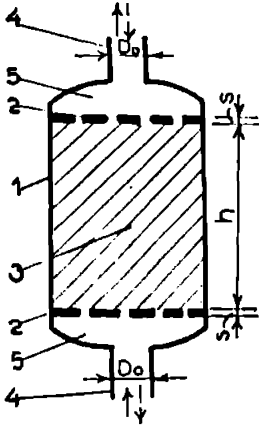


Fig.3.15. Schemă constructivă a coloanei instalației de uscare 1- corpul coloanei; 2- suport dreunat; 3-material adsorbant 4- gtuț racord; 5- spațiu de omogenizare

Diametrul echivalent al umpluturii/secțiunii de curgere d_e depinde de tipul materialului adsorbant și se determină ou relația :

$$d_e = \frac{4E}{\rho} \quad (3.88')$$

în care: E este porozitatea exterioră a materialului adsorbant, iar ρ suprafața specifică a acestuia.

Pentru determinarea lui λ se pot folosi :

- relația lui Ergun; valabilă pentru regimul laminar și turbulent

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34 \quad (3.89)$$

- relațiile Javoronkov, pentru umplutură de formă neregulată :

$$\lambda = \frac{140}{Re}, \text{ în regim laminar } Re < 40 \quad (3.90)$$

$$\lambda = \frac{16}{Re^{0,92}}, \text{ în regim turbulent } Re > 40 \quad (3.91)$$

În relațiile (3.89) , (3.90) și (3.91) Re poate fi calculat cu una din relațiile [77] :

$$Re = \frac{w d_e \rho}{\eta} = \frac{4 w_f \rho}{\eta s_u} \quad (3.92)$$

unde :

$$Re = \frac{4 q_m}{\eta s_u} \quad (3.93)$$

unde: η - coeficientul dinamic de vîscozitate al aerului ; w_f - viteza aparentă/fictivă, $w_f = W \cdot E$, în care E reprezintă porozitatea

tatea materialului (fracția de zoluri) ; s_u - suprafața specifică a umpluturii (m^2/m^3) ; q_m - debitul masic specific de aer ($kg/m^2 \cdot s$) ;
 $q_m = w_f \cdot \rho$;

Aceste relații sînt aplicabile atunci cînd p_2 pentru fluid (aer) este mic (pînă la 10% din valoarea presiunii inițiale [77] situație în care se încadrează fenomenul analizat.

Ținînd seama de faptul că în desicator aerul introduce și micșorează conținutul în umiditate, deci și modifică (mărește) densitatea și admitînd că variația densității este lineară în lungul desicatorului, valoarea lui ρ din relațiile (3.88) la (3.93) se determină cu relația :

$$\rho = \frac{\rho_0 + \rho_a}{2} = \rho_0 + 0,00645 \frac{p \cdot v}{T} = \rho_0 - 0,00645 \frac{p \cdot v}{T} \quad (3.94)$$

Deci căderea de presiune în lungul desicatorului depinde de viteza precum și de presiunea aerului la intrare (p), fapt ilustrat grafic în diagrama din figura 3.16.

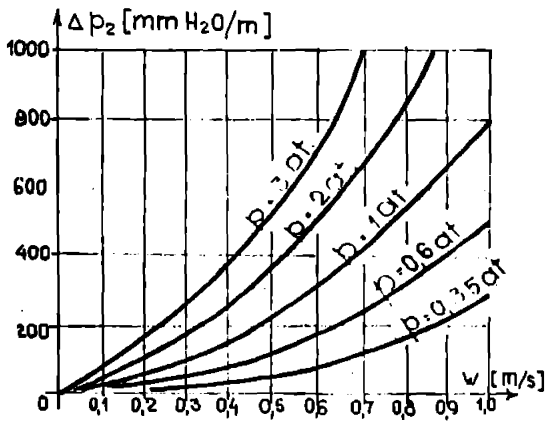


Fig.3.16. Căderea de presiune în desicator

Se introduce noțiunea de încărcare aerolică \bar{q}_a care reprezintă debitul de aer pe unitatea de suprafață a secțiunii transversale a desicatorului [$dm^3/s \cdot m^2$] , față de care pierderea de presiune se determină cu relația :

$$\Delta p_2 = K \frac{\bar{q}_a \cdot h \cdot \rho}{d_e^2 \cdot D \cdot d} \quad (3.95)$$

în care K este o constantă ce se determină experimental pentru fiecare material adsorbant, iar ρ

este vîscozitatea cinematică a aerului.

Pierderea de sarcină la intrarea respectiv ieșirea din coloana de uscare este compusă din pierderile de sarcină la lărgirea respectiv îngustarea secțiunii la care se adaugă cea dată de suportul drenat , deci :

$$\Delta p_{1,3} = \xi_{1,3} \frac{\rho w_{1,3}^2}{2} + \xi \frac{\rho w_d^2}{2} \quad (3.96)$$

în care $\xi_{1,3,d}$ este coeficientul de rezistență locală la îngustarea, îngustarea de secțiune, respectiv a suportului drenant ;

$w_{1,3,d}$ - viteza medie a secțiunii din amonte de intrare, ieșire, suport drenant.

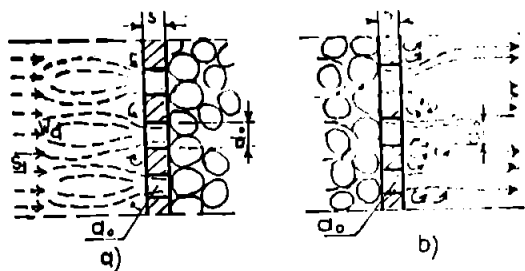


Fig.3.17. Curgerea aerului prin suportul drenant a) intrare; b) ieșire

Aerul care urmează a fi uscat, sau cel ce va regenera materialul adsorbant, la nivelul suportului drenant este contractat în cazul intrării, figura 3.17 a, iar în ipoteza ieșirii din coloana de uscare (figura 3.17 b, poate fi contractat sau destins după cum $S_1/S_0 \gtrless 1$, avînd, în consecință, viteza mai mare respectiv mai mică după trecerea prin suportul dre-

nant. S-a notat cu S_1 secțiunea de trecere a aerului amonte de suportul drenant, iar cu S_0 suma suprafețelor golurilor acestui suport ($S_0 = \sum a_0$).

Coeficientul pierderii de sarcină al suportului drenant, considerat subțire deoarece $d_0 \sim a$, depinde de coeficientul secțiunii vii $\bar{a} = S_0/S_1$, de numărul Reynolds, $Re = W_0 \cdot d_0 / \nu$, precum și de forma marginilor orificiilor, adică :

$$\xi_d = f(s/d_0, \bar{a}, Re, r/d_0) = \Delta p / \frac{\rho W_1^2}{2} \quad (3.97)$$

Pentru relația (3.97) s-au mai folosit notațiile " W_0 - viteza aerului prin orificiile suportului drenant ; d_0 - diametrul orificiului ; W_1 - viteza aerului în secțiunea amonte de suportul drenant ; ν - coeficientul cinematic de vîscozitate ; Δp - pierderea de presiune prin suportul drenant ; r - raza de curbură a marginilor orificiilor.

În calculul coeficientului de rezistență al suportului drenant pentru numere Reynolds mari ($Re > 1000$) se recomandă utilizarea relației:

$$\xi_d = k_1 \left[k_0 \left(1 - \frac{S_0}{S_1} \right) + \left(\frac{S_1}{S_0} - 1 \right)^2 \right] \quad (3.98)$$

în care : $k_0 = 1 \dots 2$, în funcție de natura materialului;

k_1 - coeficient care ține seama de uniformitatea de pătrundere

a aerului în golurile suportului drenant ($k_1 = 1, \dots, 1$, după cum diametrul echivalent al particulelor materialului $d_{ech} < (n \dots 1,5)d_0$).

La proiectarea suportului drenant se ține seama de legătura dintre numărul orificiilor, distanța dintre orificii (similar fig. 5.15) și coeficientul secțiunii vii a suportului \bar{a} . Când axele orificiilor sînt paralele (iar centrele orificiilor sînt considerate în vîrfurile unui dreptunghi) :

$$d_1' = \frac{0,785 d_0^2}{d_2 \bar{a}} \quad \text{și} \quad d_2 = \frac{0,785 d_0^2}{d_1' \bar{a}} \quad (3.99)$$

unde $d_1' = d_1 + d_0$ conform figurii 5.15, și cînd pasul d_2 , respectiv d_1' se presupun cunoscute (de exemplu, distanța dintre orif. trebuie cunoscută/impusă, rezultînd pe direcția perpendiculară).

Cînd $d_1' = d_2$, rezultă :

$$d_1' = \frac{0,89 d_0}{\sqrt{\bar{a}}} \quad (3.100)$$

În cazul realizării în romb a axelor orificiilor suportului, cu înclinarea θ , distanțele între centrele orificiilor vor fi, corespunzător notațiilor din figura 3.18 :

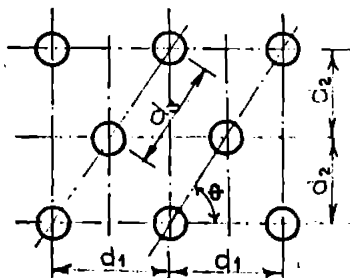


Fig. 3.18. Suport drenant cu orificii intercalate

$$d_1' = \frac{1,25 d_0}{\sqrt{\bar{a}} \operatorname{tg} \theta} \quad (3.101)$$

$$d_2 = \frac{0,63 d_0 \sqrt{\operatorname{tg} \theta}}{\sqrt{\bar{a}}} \quad (3.102)$$

În cazul particular al distanțelor egale între orificii ($d_1' = d_2$; $\theta = 60^\circ$) se obține:

$$d_1' = \frac{0,95 d_0}{\sqrt{\bar{a}}} \quad (3.103)$$

$$d_2 = \frac{0,82 d_0}{\sqrt{\bar{a}}} \quad (3.103')$$

Numărul de orificii n al suportului drenant este dat de relația :

$$n = \frac{1,27 \bar{a} S_1'}{d_0^2} \quad (3.104)$$

unde S_1' reprezintă suprafața totală a suportului drenant (inclusiv golurile).

3.4. Concluzii

1. Materia primă pentru producerea ozonului o constituie aerul. Pentru producerea aerului ozonat aerul introdus în generatorul de ozon trebuie să fie curat, adică lipsit de impurități, uscat și cât mai rece.

2. Parametrii care caracterizează performanțele unui filtru de praf sînt: gradul de separare sau eficiența ; viteza de trecere a aerului prin masa filtrantă; rezistența aerodinamică; debitul specific de aer al filtrului, în cazul filtrelor uscate din țesături, iar în cazul filtrelor electrice : tensiunea critică a cîmpului electric ; viteza de depunere, timpul menținerii aerului în cîmpul electric, puterea electrică necesară ; gradul de separare, rezistența aerodinamică.

3. Pentru asigurarea unei temperaturi cît mai scăzute a aerului se folosesc baterii de răcire a aerului în sistemul de preparare a gazului de medie și înaltă presiune, respectiv răcitoare frigorifice cu gaz în sistemul de preparare a gazului de medie și joasă presiune. Pentru mărirea efectului de răcire cele două tipuri se pot inseria.

4. Uscarea aerului se face pentru atingerea punctului de rouă de minus 40 pînă la minus 60°C. Pentru aceasta se utilizează substanțe adsorbante cum sînt silicagelul, alumina calcinată, schimbători de ioni, site moleculare, care constituie elementul activ al agregatelor de uscare, pînă la epuizarea capacităților de adsorbție a umidității din aer. În acest moment se impune regenerarea materialului adsorbant.

5. Adsorbția vaporilor de apă din aer se produce în timp și spațiu, fiind un proces complex de transfer de masă și schimb termic.

6. Agregatele de uscare funcționează pe același principiu, adsorbția vaporilor de apă, în compartimentul activ al instalației și regenerarea materialului adsorbant în paralel.

7. În funcție de principiul funcțional al regenerării, agregatele de uscare pot fi cu regenerare prin agent termic sau prin micșorarea presiunii curențului de aer.

8. Între materialul adsorbant și curențul de aer există un schimb de căldură și de masă convectiv care este localizat în stratul limită, creșterea căldurii uscate a aerului fiind egală cu schimbul termic convectiv respectiv cu răcirea materialului

suport, iar scăderea umidității aerului este egală cu schimbul masic de proces, respectiv cu creșterea umidității adsorbantului, fenomene descrise de ecuațiile (3.56) și (3.51).

9. Evoluția procesului de adsorbție este prezentat grafic în figura 3.8, iar modelul fizic de funcționare al instalației de transfer de masă și căldură este prezentat în figura 3.9.

10. Variația temperaturii în lungul instalației și în timp este exprimată de relațiile (3.56) respectiv (3.58), iar variația umidității în spațiu (în lungul instalației) și în timp este exprimată respectiv de relațiile (3.60) și (3.62).

11. Caracteristicile geometrice și structurale ale materialului adsorbant, cum sînt volumul instalației, suprafața laterală sau suprafața de transfer, suprafața specifică a materialului, suprafața specifică raportată la unitatea de masă, volumul specific al porilor, raza porilor, sînt exprimate prin relațiile (3.63) la (3.69).

12. Calculul evoluției procesului de uscare a aerului, în funcție de parametrii care-l determină poate fi realizat automat utilizînd calculatorul, algoritmul de calcul este prezentat în figura 3.11.

13. Procesul de regenerare al materialului adsorbant cu aer încălzit este descris de ecuațiile (3.70) și (3.71), iar cel cu presiune scăzută a aerului pentru uscare de relația 3.79 și respectiv (3.82') cînd secțiunea transversală a instalației este constantă. Optimizarea funcționării regenerării la presiuni diferite este dată de relația (3.85) din care rezultă condiția de funcționalitate a instalației h/p exprimată de relația (3.86).

14. Căderea de presiune în instalația de uscare se produce la intrarea, în lungul și la ieșirea din instalație. Ecuațiile (3.88) și/sau (3.95) exprimă pierderea de presiune în lungul instalației, iar expresia (3.96) pierderea de sarcină la intrarea respectiv ieșirea din instalație, și se compune din pierderea de sarcină prin lărgimea sau îngustarea (bruscă) de secțiune și din pierderea de sarcină prin suportul drenant.

15. Contribuțiile autorului constau în: tratarea unitară a procesului de pregătire a aerului pentru ozonizare; introducerea noțiunii de complex constructiv al filtrului λ_f definit de rela-

ția (3.29) ; indicarea răcirii în trepte a aerului pentru obținerea unui randament al răcirii sporit ; propunerea unui model fizic pentru uscarea aerului ; stabilirea relațiilor , în timp și spațiu (în lungul instalației de uscare), de variație a temperaturii și umidității în procesul de uscare a aerului ; realizarea unui program de calcul automat pentru evoluția procesului de uscare a aerului ; explicarea mecanismului regenerării materialului adsorbant și stabilirea relațiilor pentru regenerarea utilizând aer cald și cea a utilizării unei presiuni reduse ; introducerea și explicitarea condiției de funcționalitate h/p a instalației de uscare în cazul regenerării cu presiune redusă ; determinarea căderii de presiune în instalația de uscare ; explicitarea coeficientului de rezistență a suportului drenant pentru numere Reynolds mai mari de 1000 ; metoda de determinare a distanței dintre centrele orificiilor suportului drenant.

C A P I T O L U L 4

STUDIU ASUPRA GENERATORULUI DE OZON

Generatorul de ozon reprezintă instalația de a cărei bună funcționare depinde întreg sistemul de ozonizare al apei. Cu cât generatorul de ozon are o construcție mai robustă, mai sigură și mai ușor de exploatat și de întreținut, cu atât sistemul de ozonizare, în ansamblu, funcționează mai bine, asigurând realizarea performanțelor cerute de calitatea apei.

4.1. Tipuri de generatoare de ozon

Luând în considerare principiile funcționale și constructive, prezentate în paragraful 2.4, generatoarele de ozon pot fi clasificate în următoarele tipuri principale :

- tuburi orizontale având răcirea cu apă ;
- tuburi verticale cu răcire prin intermediul apei ;
- tuburi verticale având dublă răcire, cu ulei și apă ;
- plăci tip Otto a căror răcire se face cu apă ;
- plăci tip Lowther a căror răcire se face cu aer.

Generatoarele menționate sînt de tip industrial, care se fabrică în serie. La scară de laborator au fost realizate și alte tipuri de generatoare de ozon care, însă, nu s-au impus încă în tehnică.

4.1.1. Generatoarele de ozon cu tuburi orizontale avînd răcirea cu apă au o construcție relativ simplă, prezentată schematic în figura 4.1. și cu o mare răspîndire în practică. Folosesc aerul drept gaz de ozonat și sînt realizate într-o gamă largă a capacității de producție, de la 0,4 kg O_3 /h pînă la 27,5 kg O_3 /h.

Cu scopul menținerii consumului energetic minim pentru producția de ozon, gram de ozon pe oră, acest tip de generator este exploatat, deci pus să funcționeze, cu numai 50...75% din capacitate.

Producția specifică de ozon (a unui tub) este de cea 12 g/h, asigurînd o concentrație a ozonului în gazul ozonat de 15...20 g O_3 /gaz ozonat, iar în condiții de exploatare deosebite se poate ajunge la o concentrație de 40 g O_3 /m³ gaz ozonat. Caracteristicile sursei de energie electrică utilizate sînt: tensiunea 15.000 + 20.000 frecvența 50 + 600 Hz. Randamentul maxim se asigură dacă aerul de

alimentare are temperatura punctului de rouă de minus 60°C . Presiunea relativă a aerului de alimentare, normală pentru funcționarea acestui tip de generator, este de $0,5 \dots 0,7$ at, motiv

pentru care contactoarele pe care le alimentează asigură difuzia gazului ozonat prin dispozitive funcționând sub presiune - de exemplu prin materiale poroase.

Temperatura apei pentru răcirea generatorului se recomandă să fie de 15°C .

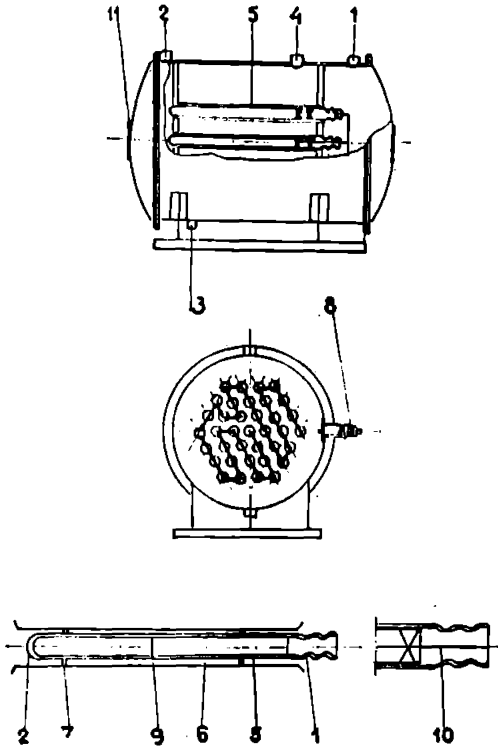


Fig.4.1. Generator de ozon cu tuburi orizontale 1 - intrare aer, 2- ieșire aer ozonat, 3- admisie apă de răcire, 4- evacuare apă de răcire, 5- tub dielectric, 6- zona descărcărilor electrice, 7- suport tub, 8- terminal, 9- înveliș metalic, 10- contact electric, 11- capac de acces.

tuburi verticale. Gazul de ozonat intră în generatorul de ozon la presiune scăzută, astfel că pentru a fi amestecat cu apa de tratat este nevoie să fie aspirat de sistemul de amestec a celor două fașe ale contactorului.

4.1.2. Generatorul de ozon cu tuburi verticale este realizat în varianta răcire cu apă, prezentată în figura 4.2., sau în varianta cu dublă răcire prin intermediul uleiului și al apei, prezentată în figura 4.3.

4.1.2.1. Conform figurii 4.2. tubul vertical generator de ozon având în figurată răcirea cu apă, realizat pe trei niveluri este grupat cu alte asemenea elemente formând generatorul cu

Caracteristicile sursei de alimentare cu energie electrică a generatorului sînt similare cu cele de la generatorul de ozon cu tuburi orizontale.

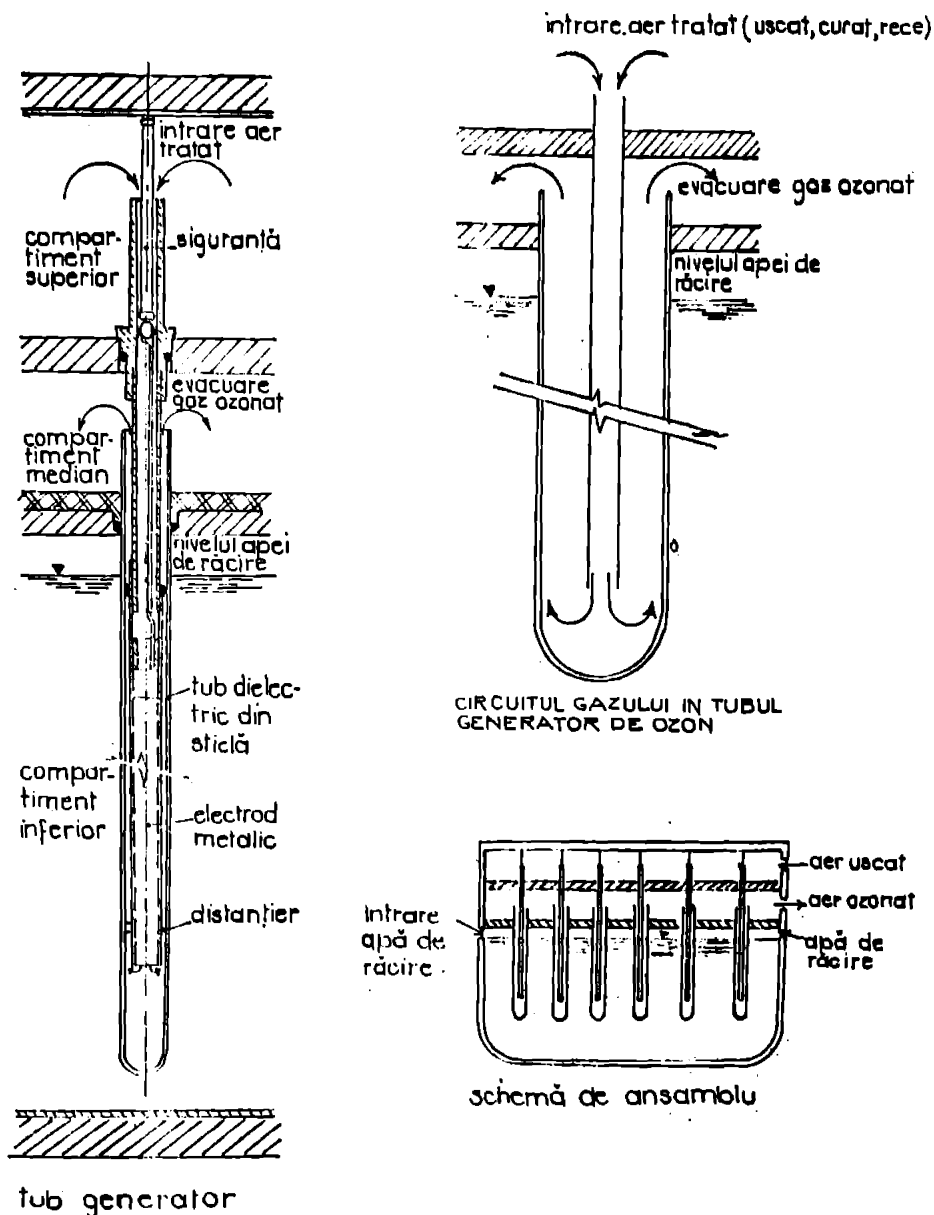


Fig.4.2. Generator de ozon cu tuburi verticale avînd răcirea cu apă

4.1.2.2. Generatorul de ozon cu tuburi verticale și dublă răcire (figura 4.3) cu ulei și apă lucrează la o tensiune constantă de 10.000V. Controlul producției de ozon se asigură prin modificarea frecvenței în intervalul 50...2000 Hz.

Construcția acestui tip de generator, mai pretențioasă și mai costisitoare, are avantajul [108] unei producții de oca 6 ori mai mare decât cea a generatorilor convenționale. Concentrația ozonului în gazul ozonat este de 2% în cazul utilizării aerului ca gaz de alimentare și de 3% în cazul utilizării oxigenului.

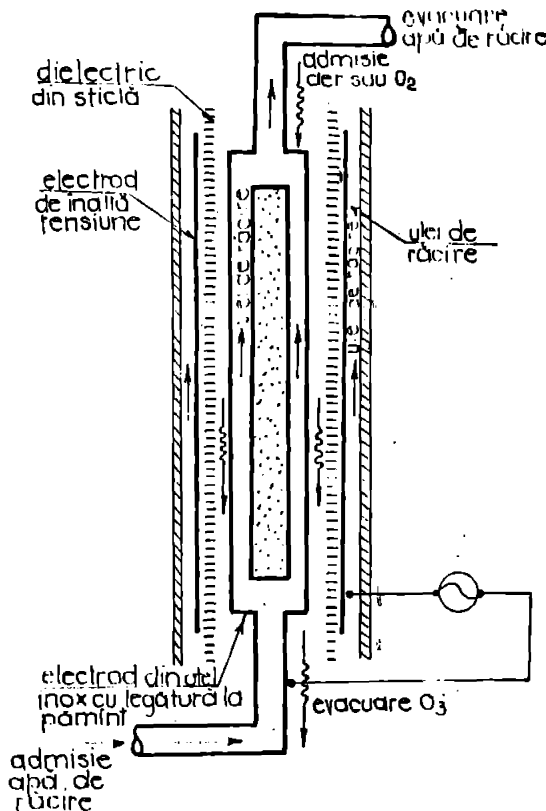


Fig.4.3. Generator de ozon cu tuburi verticale cu dublă răcire de ulei și apă

4.1.3. Generatorul de ozon cu plăci tip Otto, prezentat schematic în figura 4.4, lucrează cu gazul de alimentare la presiunea atmosferică, sau mai mică. Acest tip de generator poate lucra cu gazul de alimentare având temperatura punctului de rouă de numai minus 30°C, dar cu o micșorare a productivității în această situație. Condiția funcțională pe care o impune construcția generatorului, este ca umiditatea maximă a aerului de alimentare să nu depășească $0,1 \text{ g/m}^3$ ($t_r = -40^\circ\text{C}$) la funcționarea normală.

Un element standard cu plăci tip Otto produce $20 \text{ gO}_3/\text{h}$ consumând pentru

o tensiune de 450 V; caracteristicile de alimentare fiind: tensiunea 10.000V și frecvența 50 Hz; temperatura apei de răcire 15°C.

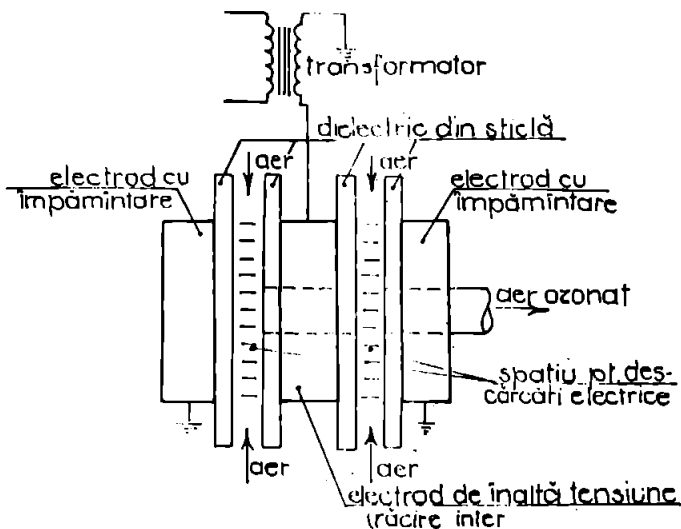


Fig.4.4. Generator de ozon cu plăci tip Otto

4.1.4. Generatorul de ozon tip Lowther a cărui schemă funcțională se prezintă în figura 4.5, este o realizare de dată mai recentă, și are răcirea cu aer preluat din mediul ambiant. Grupînd

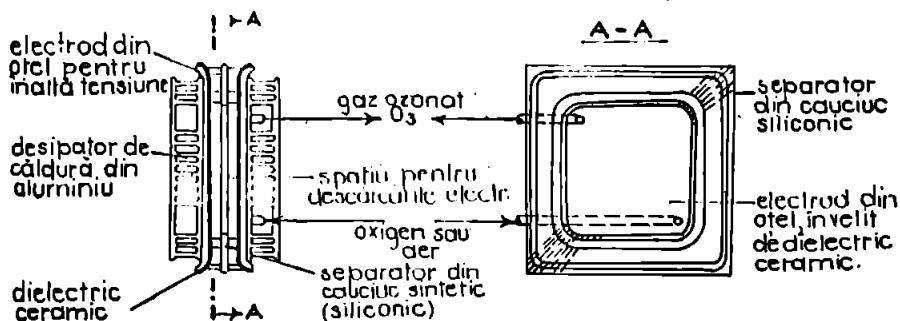


Fig.4.5. Celulă generatoare de ozon cu plăci tip Lowther

3 sau 4 celule (elemente) se realizează module ale generatorului cu plăci tip Lowther, care din punct de vedere funcțional prezintă avantajul unei mai bune exploatare (în special asigurarea răcirii cu aer), fiind capabil să producă pînă la $5 \text{ kgO}_3/\text{h}$.

Sursa de alimentare a acestui tip de generator de ozon are caracteristicile: tensiunea 9000 V și frecvența 2000 Hz . Presiune-

nea gazului de alimentare este de 1,0...1,10 at.

4.1.5. La noi în țară I.P.E. Bistrița în colaborare cu I.C.P.E. București realizează generatoare de ozon, în două variante, inclusiv instalațiile conexe (pentru prepararea aerului). Principalele caracteristici ale generatoarelor de ozon sînt redate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1.

Caracteristicile ale generatoarelor de ozon românești.

Caracteristica	Tipul generatorului	
	GO - 500	GO - 1000
Puterea instalată *	50 KVA	100 KVA
Puterea absorbită *	40 KVA	80 KVA
Tensiune de alimentare	3 x 380 V	
Tensiunea de lucru în generator	0 + 15 KV	
Frecvența de lucru la generator	200+ 400 Hz	
Producția de ozon	400+500 gO ₃ /h	800+1000gO ₃ /h
Presiunea aerului ozonat la ieșirea din generator	max 0,6 bar	
Debitul apei de răcire	max 0,5 dm ³ /s	max 1 dm ³ /s
Temperatura și umiditatea relativă de care este garantată funcționarea instalației	+2 + +35°C ;	80% la 20°C
Gazul de lucru (mediul în care se produce ozonul)	aer	
Templ. de lucru	-10°C	

* Puterea instalației complexe (inclusiv pentru gospodăria de aer).

4.2. Caracteristici funcționale ale generatorului de ozon

Cunoașterea caracteristicilor și principiilor de funcționare a generatorului de ozon este de mare însemnătate în vederea unei corecte întrețineri și exploatare.

Puterea electrică necesară generatorului de ozon, P, se exprimă [41, 108] cu ajutorul relației empirice :

$$P = 4f \cdot C'_g \cdot U_0^2 \left(U_m - \frac{C'_a}{C'_i} \right) \quad (4.1)$$

în care: f este frecvența curentului electric ; C'_g - capacitatea dielectricului (izolatorului); C'_a - capacitatea intervalului de descărcare (gazului); C' = C'_A · C'_E / (C'_A + C'_E) reprezintă capacitatea echivalentă ; U₀ - tensiunea de descărcare din interval ; U_m - valoarea maximă a tensiunii dintre electrozi.

Modul de acționare pentru controlul puterii consumate de generatorul de ozon a fost prezentat în paragraful 2.3., iar schema fundamentală, de principiu, a generatorului de ozon în paragraful 2.4.

4.2.1. Proprietățile electrice ale elementului capacitiv sînt ilustrate schematic în schițele din figura 4.6, care reprezintă : a) sistemul înainte de a se ajunge la potențialul de ionizare al gazului de alimentare (aer, aer oxigenat, oxigen) în spațiul de gaz și b) cînd se atinge nivelul ionizării gazului din

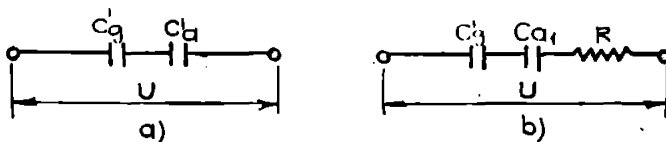


Fig.4.6. Schema echivalentă a spațiului dintre electrozi
 C_d - capacitatea dielectricului (sticlă), C_g și C_g' - capacitatea gazului de alimentare înainte și după ionizare, R - rezistența electrică, U - diferența de potențial de la bornele generatorului

spațiul respectiv, acesta devenind conductor de electricitate, echivalent cu o rezistență a cărei valoare depinde de proprietățile spațiului dintre electrozi.

Deoarece alimentarea generatorului de ozon se face, cu curent alternativ, în circuit se produce curent electric cînd s-au depășit nivelele de ionizare, conform schemei din figura 4.7.

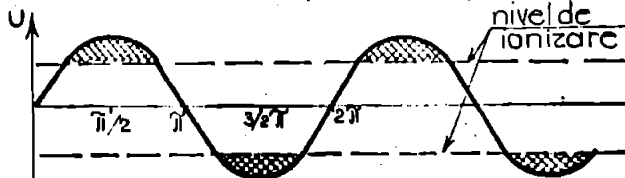


Fig.4.7. Caracteristica curentului de alimentare

Gazul de alimentare rămîne ionizat parțial și tensiunea coboară sub potențialul de ionizare, drept urmare forma undei pentru dife-

rența de potențial din spațiul de gaz arată oă în figura 4.8.

Producția specifică de ozon a unui generator convențional este funcție de caracteristicile curentului electric și de construcția generatorului [108], precum și de caracteristicile gazului de alimentare, fiind dată de relația :

$$P_o = S \cdot F \left(\frac{f E \cdot U^2}{A_a D_c} \right) \quad (4.2)$$

în care: P_o este producția de ozon ; S - aria suprafeței electrozilor ; f - frecvența curentului electric ; ϵ - permitivitatea dielectrică ; U - tensiunea aplicată ; A_a - caracteristica gazului de alimentare ; D_e - distanța dintre electrozi.

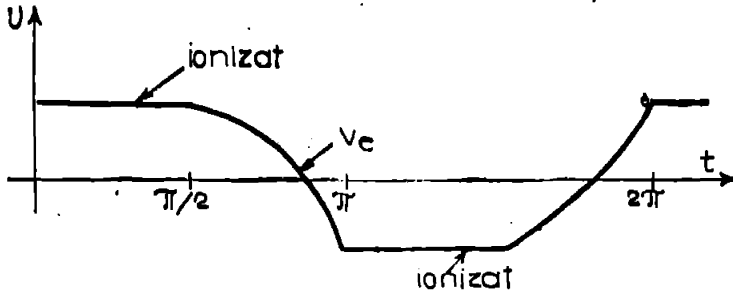


Fig.4.8. Căderea de tensiune în spațiul de descărcare în stare ionizată [108] .

Pentru un tip de generator dat, cu natură și configurația electrozilor cunoscută, tensiunea de ionizare U_i este în funcție de presiunea și debitul gazului de ozonat din intervalul de descărcare, dar și de debitul acestuia:

$$U_i = F_1(p \cdot g/q) \quad (4.3)$$

unde : p este presiunea gazului ; g - intervalul de descărcare ; q - debitul gazului.

Tensiunile mari aplicate generatorului sînt favorabile producției de ozon, prin mărirea energiei electronilor, dar sînt un mediu dielectric unei deteriorări mai accentuate în timp. Frecvența curentului electric mărește productivitatea de ozon a generatorului, dar este limitată funcțional ; numai în cazul generatoarelor cu plăci tip Lowthey frecvența poate ajunge pînă la 2000 Hz, la celelalte tipuri frecvențele maxime se opresc la valori de 5-600 Hz. Peste aceste valori ale frecvenței nu se obțin sporuri ale producției de ozon [108] semnificative.

4.3. Recomandări privind realizarea construcțiilor care adăpostesc generatoarele de ozon

.Clădirea care adăpostește generatoarele de ozon, adăpostește și instalațiile aferente preparării gazului (aerului, aerului oxigenat) de ozonat ; cînd oxigenul este gazul de alimentare se preferă aducerea sa de la stațiile existente în localitate

tate, în recipiente speciale de oxigen, instalația de utilizare reducându-se la aparatura de depresurizare în vederea admisiei în generatorul de ozon. În această situație este recomandabil ca gospodăria de oxigen să fie adăpostită de o construcție separată având un perete comun cu cea care adăpostește generatoarele de ozon.

Instalațiile de producere a ozonului se amplasează în clădiri supraterane, iar dimensiunile se stabilesc în funcție de condițiile de montare, exploatare și întreținere a instalațiilor și utilajelor, precum și de gabaritul acestora.

În clădirea stație de preparare a ozonului nu se vor desfășura alte activități (permanente sau temporare) în afara celor direct legate de exploatarea și întreținerea instalațiilor și utilajelor acestuia.

În interiorul stației se va amplasa o cabină de comandă pentru operatorul care supraveghează buna funcționare a tuturor instalațiilor și utilajelor din stație. În cabina de comandă se vor monta elemente de comandă și control necesare acționării de la distanță și supravegherii utilajelor și instalațiilor. Cabina de comandă se va monta deasupra pardoselii stației, astfel ca să asigure o bună vizibilitate operatorului. Cabina de comandă, prevăzută cu ușă de acces, din interiorul stației, se prevede cu geamuri perfect transparente.

Stația de producere a ozonului se va prevedea cu instalații de ventilare mecanică pentru eliminarea aerului nociv și introducerea aerului proaspăt. Cabina de comandă are instalație de ventilare proprie, aerul proaspăt se introduce mecanic, iar evacuarea eventualului aer nociv se realizează pe baza suprapresiunii create de instalația de introducere a aerului proaspăt.

Principala noxă ce poate apărea în stație este constituită din ozonul (gazul ozonat) ce poate apărea datorită scâlpărilor sau accidentelor în funcționare. Concentrația maximă admisă (C.M.A) este de $0,2 \text{ mg O}_3/\text{m}^3$ aer, iar concentrația medie admisă (C.m.A) este de $0,1 \text{ mg O}_3/\text{m}^3$ aer, care nu se admite pe intervalul de timp al unui schimb (ci numai pe max. 2..13 ore).

Introducerea aerului proaspăt se face în zona "curată" a stației, iar aspirația aerului poluat se realizează în zona de amplasare a generatoarelor de ozon. Evacuarea aerului poluat se face pe la partea inferioară a stației, fiind condus spre zone ale sta-

ției de preparare a apei în care nu se desfășoară procese productive, iar aerul aspirat/proaspăt se introduce pe la partea superioară a clădirii stației de preparare a ozonului. Evacuarea aerului poluat se face direct în atmosferă printr-un dispozitiv de evacuare cu jet vertical, al cărui amplasament va depăși cu minim 1 m înălțimea construcției lângă care se montează (în general evacuarea se face deasupra stației de preparare a ozonului). Ventilatorul instalației de evacuare a aerului poluat se va amplasa în exteriorul clădirii și va asigura vehicularea unui debit minim de aer corespunzător la trei schimburi complete pe oră. Instalația de ventilare va asigura în stația de preparare a ozonului o depresiune de 1...2 mm H₂O.

Pentru încălzirea clădirii stației de preparare a ozonului și pentru compensarea temperaturii aerului evacuat se recomandă utilizarea aerotermelor.

Priza de aer tehnologic și gurile de introducere a aerului proaspăt se amplasează pe aceeași latură a clădirii stației. Priza de aer proaspăt se prevede cu plasa din sîrmă pentru a împiedica pătrunderea de corpuri străine. Înainte de introducerea în cabina de comandă aerul proaspăt se filtrează în două trepte, prima pentru reținerea prafului atmosferic, iar a doua pentru neutralizarea eventualelor urme de ozon.

În perioadele reci ale anului aerul proaspăt introdus în cabina de comandă va fi încălzit. Recircularea aerului în cabina de comandă ne interzice cu demerit.

Întreaga instalație de ventilare va fi protejată anticoroziv la interior și la exterior.

4.3.1. Măsură tehnico-organizatorică

Darea în folosință a stației de producere a ozonului se constituie într-o succesiune de operații :

- a) - verificarea instalațiilor și a montării circuitelor de aer, de apă, electrice, etc ;
- b) - pornirea instalațiilor, conform fluxului tehnologic;
- c) - reglarea instalațiilor ;
- d) - verificarea eficienței globale.

Sistemele de ventilare se verifică zilnic, înlăturînd imediat eventualele defecțiuni apărute.

Funcționarea generatorelor de ozon se interzice dacă prezintă neetancheritatea sau dacă acestea apar pe circuitul de gaz ozonat deservit, precum și atunci când nu funcționează instalația de ventilare.

Pentru pornirea generatorului de ozon, după verificările menționate anterior, se pornesc circuitele de răcire, apoi se deschide admisia gazului de ozonizat și numai după realizarea acestor operații se va realiza cuplarea la sursa de energie electrică.

Oprirea unui generator de ozon presupune întreruperea alimentării cu energie electrică și numai după 15...30 min (funcție de mărimea generatorului) va fi oprită alimentarea cu gazul de ozonat. În felul acesta se evită atingerea în instalație a ozonului și răspîndirea lui în incintă. Circuitele de răcire ale generatorului de ozon se opresc odată cu admisia gazului de ozonat. Dacă fiecărui generator de ozon îi corespunde un ventilator, acesta se va opri la 30 minute de la scoaterea din funcțiune a generatorului.

În cabina de comandă se vor monta sisteme de acționare și semnalizare a funcționării ventilatoarelor.

În caz de avarii sau dezastruri importante de ozon în atmosferă stației, înainte de evacuarea operativă a personalului, se va proceda la oprirea instalațiilor generatoare de ozon și se vor deschide toate ușile și ferestrele. Reluarea activității se va face numai după dispariția ozonului din zona de muncă.

Avînd în vedere specificul muncii în stația de producere a ozonului, aceasta va fi deservită numai de personal muncitor cu înaltă calificare, pe schimburi, durata maximă a schimbului recomandîndu-se a fi de 6 ore.

4.3.2. Măsuri igienico-sanitare

Se vor efectua controale sistematice ale atmosferei în zona de muncă, atât în stația de preparare a ozonului cît și în cabina de comandă, cel puțin odată pe schimb, și se vor lua măsuri prompte de remediere a eventualelor deficiențe constatate.

Personalul muncitor va purta echipament de protecție constituit din salopetă din doc ignifugat, cască și încălțăminte din piele sau material sintetic nedegradabil de către ozon.

Echipamentul de lucru și lenjeria de corp se aerisesc zilnic prin scuturare în aer liber înainte de a fi puse în dulapul din vestiar.

La ieşirea din schimb personalul muncitor care deserveşte staţia de preparare a ozonului va face obligatoriu duş cald, apoi va îmbrăca hainele de stradă, inclusiv lenjeria aferentă. Grupurile social-sanitare, vestiarele, duşurile, sala de mese sînt amplasate în exteriorul staţiei de preparare a ozonului.

La apariţia unor semne de intoxicaţie ca: iritaţii ale căilor respiratorii, autenie, cefalee, iritaţii oculare (lăcrimare, congestia conjunctivitelor) personalul muncitor va ieşi la aer curat şi revine numai după aerisirea staţiei.

Personalul muncitor va respecta măsurile de igienă individuală şi colectivă, spălîndu-se cît mai des pe mîini şi mai ales înainte de masă, care se va servi numai în săli speciale amenajate, menţinînd o curăţenie desvîrşită la locul de muncă cît şi în celelalte spaţii neproductive.

Se vor amenaja locuri speciale pentru fumat, dar personalul muncitor este sfătuit să nu fumeze, sau să nu fumeze pe parcursul orelor de serviciu.

Femeile gravide nu vor fi admise în locurile de muncă cu ozon.

Măsurile de prim ajutor se acordă după evacuarea din atmosfera nocivă a victimei, apoi se întinde, se înveleşte, i se asigură o inhalatie de oxigen la presiune uşoară, în caz de inconştienţă i se aplică respiraţia artificială foarte uşoară, pentru a nu leza plămîinii, se evită ori ce răcire a atmosferei în care se duce victima. După ce aceasta îşi revine va evita ori ce efort şi va fi condusă la medic.

4.4. Concluzii

1. Se cunosc cinci tipuri de generatoare de ozon industriale avînd tuburi sau plăci pentru asigurarea spaţiului de descărcări electrice, răcite cu apă, apă şi ulei sau numai cu aer, conform tipului constructiv.

2. Generatoarele de ozon cu tuburi orizontale şi răcire cu apă au randamentul maxim dacă aerul de alimentare are temperatura punctului de rouă de minus 60°C la minus 40°C.

3. Generatorul de ozon cu tuburi verticale şi răcire cu apă funcţionează la o presiune scăzută fiind nevoie să fie aspirat pentru a fi pus în contact intim cu apa de tratat.

4. Generatorul de ozon cu tuburi verticale și dublă răcire, cu ulei și apă, avînd o construcție mai pretențioasă și mai costisitoare are avantajul unei producții de cca 6 ori mai mare, decît cea a generatoarelor convenționale.

5. Generatorul de ozon cu plăci tip Otto poate funcționa, asigurînd o producție rentabilă și în cazul cînd gazul/aerul de ozonat are o temperatură a punctului de rouă de numai minus 30°C ; condiția funcțională impusă este ca umiditatea aerului de ozonare să nu depășească $0,1 \text{ g/m}^3$.

6. Singurul tip de generator de ozon a cărui răcire se realizează cu aer este generatorul cu plăci tip Lowther, fiind capabil să producă pînă la $5 \text{ kg O}_3/\text{h}$, presiunea gazului de alimentare fiind de $1,0 \dots 1,1 \text{ at}$.

7. Puterea de alimentare a generatorului de ozon se exprimă în funcție de caracteristicile curentului electric de alimentare și de caracteristicile constructive cu relația (4.1).

8. Proprietățile electrice ale elementului capacitiv au fost exprimate grafic în figura 4.6., prezentînd sistemul înainte de a se ajunge la potențialul de ionizare al gazului de ozonat precum și la atingerea nivelului de ionizare al acestuia.

9. Caracteristicile curentului de alimentare și căderea de tensiune în spațiul de descărcare în stare ionizată sînt prezentate în figurile 4.7 și respectiv 4.8.

10. Autorul propune relația (4.2) pentru producția specifică de ozon a generatorului de ozon, în funcție de aria suprafeței electrodilor, frecvența și tensiunea curentului aplicat, caracteristica gazului de alimentare, permitivitatea dielectrică și distanța dintre electrozi, precum și relația (4.3) pentru tensiunea de ionizare, în funcție de presiunea și debitul gazului de ozonat și intervalul de descărcare.

11. Se fac, de cître autor, recomandări privind realizarea construcțiilor care adăpostesc generatoarele de ozon, a sistemului de ventilație, privind măsurile tehnico-organizatorice de funcționare și exploatare a stației de producere a ozonului și în ceea ce privesc măsurile igienico-sanitare ce trebuie să fie respectate de personalul muncitor de întreținere și exploatare.

CERCETARI PRIVIND STUDIUL CONTACTOARELOR DE OZON

Echipamentele speciale în care se asigură contactul intim între masa apei de tratat și masa de gaz ozonat pe durata timpului de contact sînt constituite de contactoarele de ozon, ca elemente principale ale procesului de ozonizare și din instalațiile anexă care asigură funcționarea, exploatarea și întreținerea acestora. Ansamblul acestor echipamente este adăpostit de o construcție specială, stalină contactoarelor de ozon.

5.1. Clasificarea contactoarelor de ozon

Criteriile de clasificare ale contactoarelor de ozon depind de locul pe care acestea îl ocupă în procesul complex de tratare a apei, de modul lor de realizare, funcționare și asigurare a contactului celor două faze, de presiunea gazului ozonat asigurată de la generator.

5.1.1. După calitatea apei introduse se disting contactoare care asigură contactul între gazul ozonat și :

- 1 - apa brută ;
- 2 - apa parțial limpezită ;
- 3 - apa limpezită.

Grupole 1 și 2 pot fi realizate ca și construcții speciale, sau pot fi realizate prin amenajarea unor instalații de tratare existente, a căror destinație inițială urmărea asigurarea altor scopuri. Din acest punct de vedere contactoarele de ozon pot fi clasificate în :

- a) contactoare pentru asigurarea ozonizării apei, și
- b) contactoare de ozon cu scopuri multiple.

În general contactoarele din grupa b) sînt acelea care utilizează gazul ozonat rezidual recuperat de la contactoarele din grupa a).

5.1.2. După circulația apei în două faze, lichidă și gazoasă, contactoarele de ozon pot fi :

- 1 - cu circulație pe verticală ,
 - a) în același sens, și
 - b) în contracurent;
- 2 - cu circulație pe orizontală,
 - a) în același sens,
 - b) în contracurent.

5.1.3. După modul de realizare și funcționare se cunosc următoarele tipuri fundamentale de contactoare :

- 1 - turnuri de stropire, unde lichidul influent este pulverizat în gazul ozonat ;
- 2 - contactoare cu structuri/colonne unice sau suprapuse, străbătute de ambele faze: lichid și gaz ;
- 3 - contactoare cu plăci din sită, plăci poroase sau membrană, acestea realizând o situație intermediară între 1 și 2 ;
- 4 - contactoare cu amestecare mecanică, la care agitația realizată facilitează contactul lichid-gaz ;
- 5 - contactoare funcționând prin injecționarea gazului ozonat în apa de tratat ;
- 6 - contactoare cu difuzoare la care contactul lichid-gaz este asigurat prin difuzie.

Fiecare din aceste tipuri de contactoare are mai multe variante, impuse de condițiile concrete existente, de posibilitățile tehnologice, de tradiție.

5.1.4. După modul de realizare a contactului între gazul ozonat și lichidul de tratat contactoarele pot fi :

- 1 - cu pulverizarea apei de tratat într-o atmosferă de gaz ozonat ;
- 2 - cu introducerea gazului ozonat în lichidul de tratat sub formă de bule, de mărime dorită ;
- 3 - cu desagregarea unei mase de bule sau a unui curent de gaz ozonat în masa lichidului de tratat.

5.1.5. După modul de realizare constructivă contactoarele pot fi :

- 1 - cu un spațiu de contact ;
- 2 - cu două sau mai multe spații de contact . La acest tipuri de contactoare se realizează :

- a) preozonizarea influentului ;
- b) ozonizarea propriuzisă a apei de tratat, și
- c) deozonizarea apei.

5.1.6. Din punctul de vedere al presiunii gazului ozonat la intrare, contactoarele pot fi :

- 1 - cu presiune negativă (la vid parțial sau înaintat) ;
- 2 - cu presiune pozitivă (sub presiune).

5.2. Exemple de contactoare

În exemplificări se pornește de la criteriul presiunii gazului ozonat la intrarea în contactor.

Contactoarele cu presiune scăzută presupun un consum suplimentar de energie pentru realizarea amestecului gaz ozonat-lichid de tratat. Două variante de contactoare, cu vacuum total și parțial, sînt prezentate în figurile 5.1 și respectiv, 5.2.

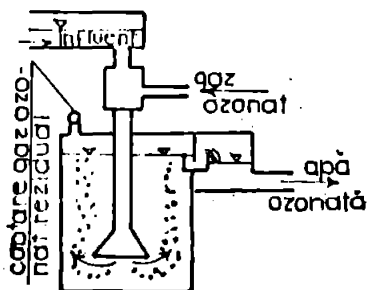


Fig.5.1. Contactor cu vacuum total

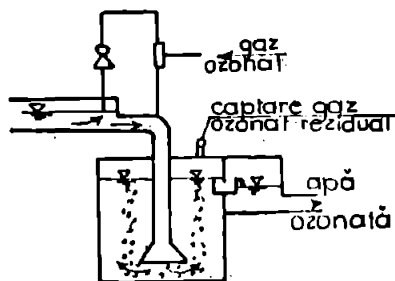


Fig.5.2. Contactor cu vacuum parțial

Un alt tip de contactor cu presiune scăzută este prezentat în figura 5.3., unde un motor electric acționează o turbină inductivă care absoarbe /aspiră gazul ozonat și o parte din apa de tratat și le dispersează în masa de lichid.

Contactoarele cu presiune sînt realizate într-un număr foarte mare de tipuri incluzînd sistemele cu difuzie prin medii poroase, exemplificate prin contactoarele tip Van de Made în figura 5.4., sau tip Welsbach în figura 5.5., contactoare cu două nivele -cel superior de preozonizare și cel inferior de ozonizare-conform figurii 5.6 la care membrana semipermeabilă regulează de pre-

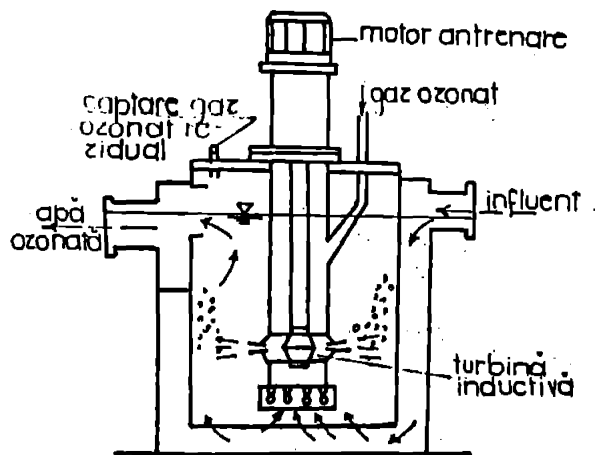


Fig. 5.3. Contactor ou turbină inductivă

rezidual ca treaptă de preozonizare și respectiv a gazului ozonat de proces.

siune asigură trecerea din compartimentul inferior in cel superior a gazului ozonat rezidual.

Figura 5.8. prezintă schema funcțională a contactorului tip Torioelli, reprezentind o combinație de injecție și difuzie prin medii poroase, în ceea ce privește introducerea gazului ozonat

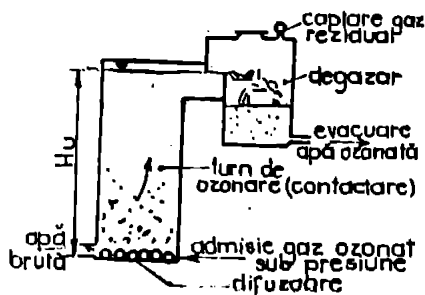


Fig. 5.4. Contactor tip Van de Made

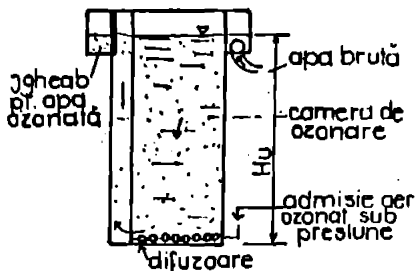


Fig. 5.5. Contactor tip Welsbach

Realizarea de contactoare cu camere de contact combinate sau cu funcții multiple, modelole fiind prezentate în figura 5.9, este o metodă frecvent întâlnită în practică mai ales atunci când debitul apei de tratat sunt importante și ozonizarea urmărește efecte multiple.

Pentru fiecare situație concretă dată, tipul contactorului este ales în funcție de mai mulți parametri, dintre care mai importanți sînt : calitatea influentului (dată de compoziția și natura impurificatorilor), debitul apei de tratat, scopul ozonizării

rii, tipul generatorului de ozon.

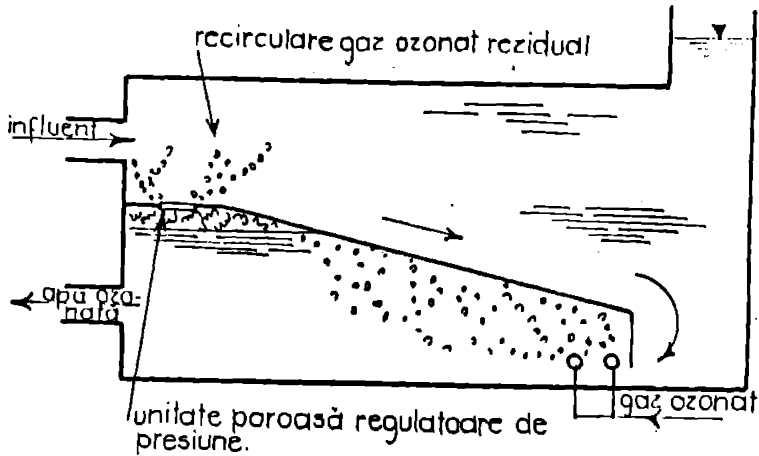


Fig.5.6. Contactor cu două niveluri

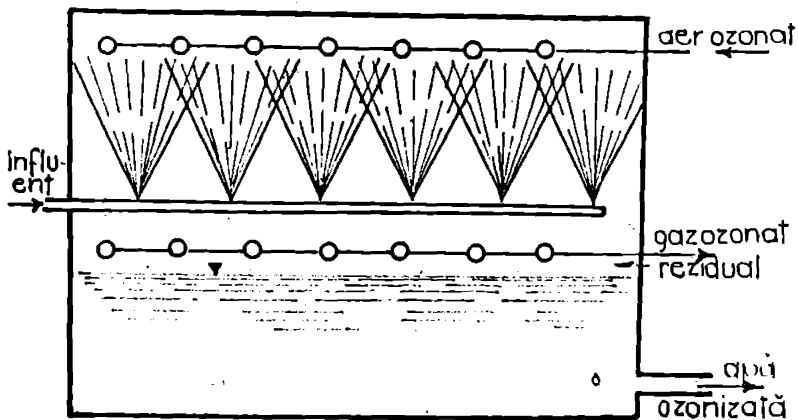


Fig.5.7. Contactor cu pulverizarea apei în atmosferă de gaz ozonat

O deosebită importanță în obținerea de randamente mari în procesul de ozonizare revine modului de introducere a gazului ozonat în contactor. Acest aspect trebuie avut în vedere pentru optimizarea funcționării contactorului urmărindu-se realizarea de sisteme simple și eficiente în funcționare și exploatare.

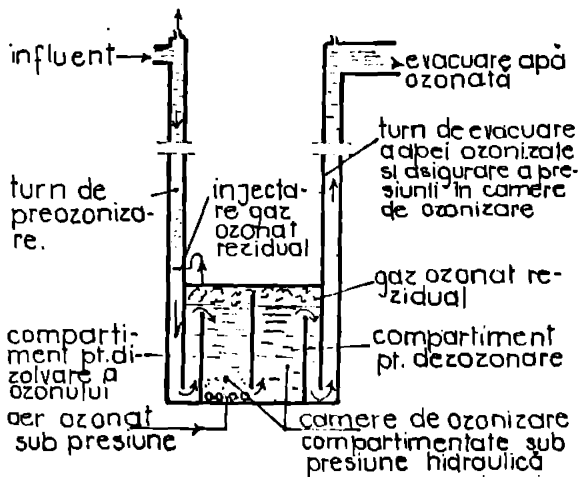


Fig.5.8. Contactor tip Toricelli

5.3. Introducerea gazului ozonat sub formă de bule în masa de apă

5.3.1. Considerații teoretice privind procesul de transfer de masă gaz - lichid

Contactoarele de ozon sînt instalații hidraulice care au rolul de a asigura transferul ozonului din gazul ozonat în masa de apă și de a asigura circulației apei o mișcare corespunzătoare astfel ca să asigure omogenizarea concentrației gazului ozonat introdus.

Dizolvarea ozonului din gazul ozonat în apă este un proces de transfer de masă care, în conformitate cu teoria peliculară a lui Lewis și Withman [151.1], se desfășoară în patru etape distincte figura 5.10, și anume :

- I - trecerea gazului (O_3) prin faza de vapori la interfață;
- II - moleculele de ozon trebuie să parcurgă filmul de gaz de la interfața celor două fluide, pe partea dinspre vapori ;
- III- moleculele de ozon trebuie să parcurgă filmul de lichid situat la interfața celor două fluide ;
- IV - ozonul trebuie să fie dispersat în masa de lichid.

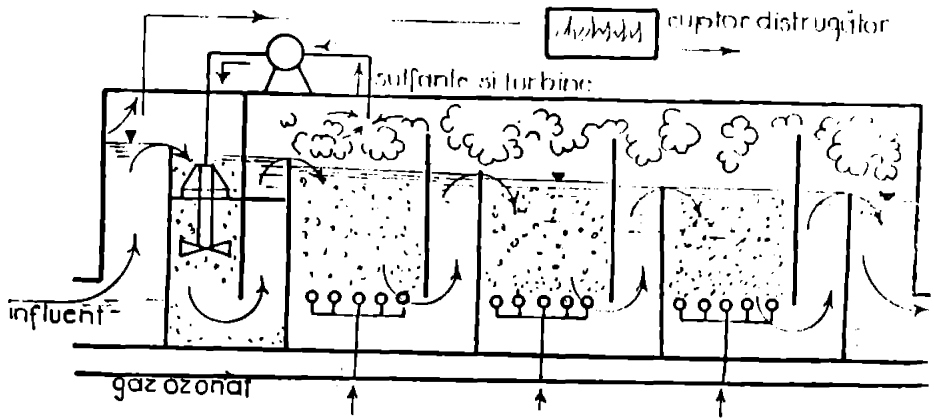


Fig.5.9. Contactor combinat, cu trepte multiple

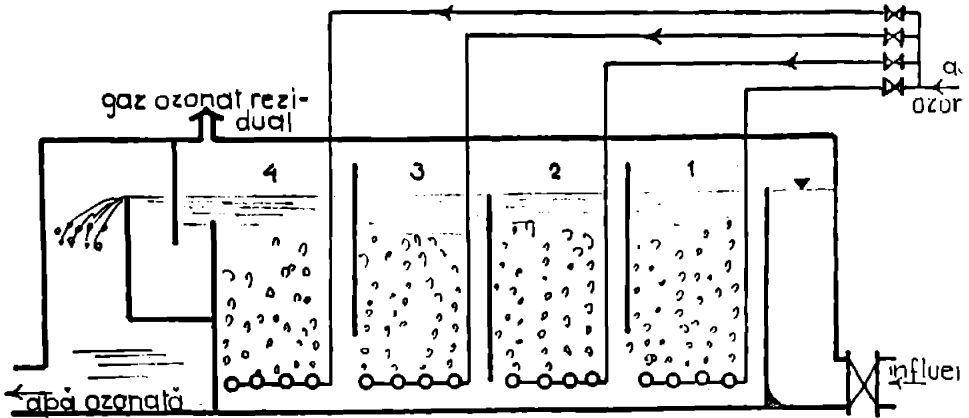


Fig.5.9. (completare)

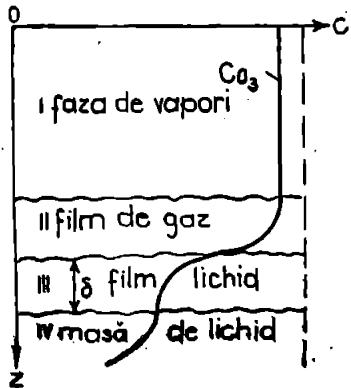


Fig.5.10. Etapele procesului de transfer de masă a ozonului în apă.

Transferul de masă se realizează în direcția descrescției concentrației, iar forța motrice a procesului de transfer este diferența de concentrație între două puncte sau zone din domeniul de curgere.

În condiții de repaus dispersia gazului ozonat (ozonului) în apă constituie faza lentă care condiționează viteza de desfășurare a

întregului proces. Deoă, însă, faza lichidă are o mișcare turbulentă pronunțată viteza procesului este determinată de difuzia moleculară în filmul de lichid.

Difuzia moleculară se supune legii lui Fick :

$$M \cdot m S = - D \frac{dC}{dz} S \quad (5.1)$$

$$m = - D \frac{dC}{dz} \quad (5.2)$$

în care : M este debitul maxim de ozon transferat ; m - debitul masic specific, pe unitatea de suprafață ; S - suprafața de transfer ; D - coeficientul de difuzie moleculară a ozonului ; C - concentrația ozonului ; z - direcția de curgere ; dC/dz - gradientul concentrației ozonului pe direcția de curgere.

Difuzia moleculară este corespunzătoare regimului de curgere unidirecțional, după direcția z.

În regim de mișcare nepermanent (nostaționar) tridimensional, transportul de masă convectiv molecular are expresia :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (5.3)$$

unde C este concentrația masei de ozon difuzată în lichidul (apa) în mișcare, iar u, v, w sînt componentele după direcțiile x, y și z ale vitezei lichidului.

Ecuația (5.3) se particularizează pentru diferite situații :

- a) transfer molecular în regim nestaționar unidirecțional, în care $u = v = 0$; $w \neq 0$, și din condiții constructive ale contactorului $w = \text{const}$, rezultă :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5.4)$$

- b) transfer molecular convectiv în regim staționar, obținînd:

$$\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (5.5)$$

- c) transfer molecular în regim staționar și lichidul în repaus, în care $\partial C / \partial t = 0$, $u = v = w = 0$, se obține :

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} = 0 \quad (5.6.)$$

d) transfer molecular unidirecțional, $w = \text{const}$, și staționar :

$$\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (5.7)$$

Transferul turbulent de masă, mai eficient decât cel molecular, datorită grupărilor mari de molecule, formațiilor microscopice de particule fluide, vârtejurilor locale generate de diferențe de concentrație, presiune și temperatură, este produs de mișcării bulelor de gaz în masa de apă. Dimensiunile bulelor de gaz sînt variabile în funcție de mai mulți parametri printre care și gradul de turbulență apreciat prin valorile numărului Reynolds.

În mod analog curgerii turbulente a fluidelor se consideră [151.1] că valoarea instantanee a concentrației C decurge din suprapunerea unei pulsații C' peste o valoare medie \bar{C} conform relației :

$$C = \bar{C} + C' \quad (5.8)$$

Transferul de masă turbulent se suprapune celui molecular, iar ecuația care caracterizează câmpul de distribuție al concentrației este de forma [151.1] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(wC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(zC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_t x \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_t y \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_t z \frac{\partial C}{\partial z} \right] \quad (5.9)$$

unde : D_t reprezintă difuzivitatea turbulentă, iar indicii x, y, z direcțiile de manifestare a acesteia.

Solubilitatea ozonului în apă urmează legea lui Henry :

$$\frac{dC_g}{dt} = k D_1 S (C_g - C_a) \quad (5.10)$$

în care $C_{g,a}$ reprezintă concentrația ozonului la interfața gaz și respectiv lichid ; k - constanta de dizolvare ; D_1 - coeficientul de difuzie ; S - suprafața de transfer.

Debitul masic de ozon transferat pe unitatea de volum este dat de relația :

$$(5.11)$$

unde $(C_g - C)$ constituie forța motoare a transferului de masă

reprezintă diferența concentrației față de valoarea de echilibru.

5.3.2. Transferul de ozon în masa de apă

Transferul ozonului din bula de gaz în apă are intensități diferite pe parcursul deplasării acesteia. La interfața gaz-lichid se formează un strat lichid

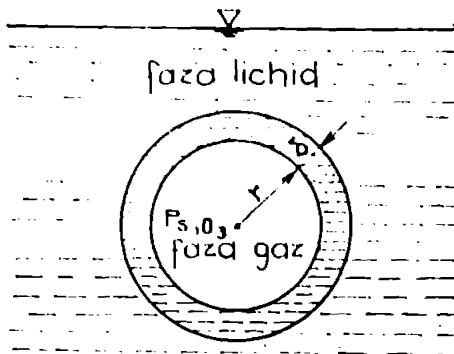


Fig.5.11. Transferul ozonului din bula de gaz în lichid

de grosime δ , fig.5.11, care opune rezistență maximă în procesul transferului de masă [151,151.1]. În acest strat (peliculă) are loc fenomenul de difuzie moleculară, proces care se desfășoară cu viteză scăzută:

Pentru valori mici δ/r și ale concentrației gazului, fluxul masei de ozon m_{O_3} în direcția normalei la suprafața de separație gaz-lichid este dat de relația :

$$m_{O_3} = D \left(-\frac{dC}{dn} \right) \quad (5.12)$$

în care dC/dn este gradientul concentrației după direcția normalei la suprafața de separație gaz-apă.

În cazul transferului de masă în regim permanent, fără reacții chimice, când ougerea este unidirecțională, ecuația (5.9) de transfer este o ecuație diferențială de ordinul 2, definită de relația :

$$\frac{d}{dz} \left[-D \frac{dC}{dz} \right] = 0 \quad (5.13)$$

Prin integrare se obține soluția generală :

$$C = \frac{L_1}{D} z + L_2 \quad (5.14)$$

unde L_1 și L_2 sînt constante de integrare care se determină din condițiile de margine : la $z = 0$, corespunde $C=C_g$ și pentru $z = \delta$ corespunde $C=C_o$, și se obține:

$$C = \frac{C_o - C_g}{\delta} z + C_g \quad (5.15)$$

din care rezultă expresia fluxului de ozon :

$$m_{O_3} = \frac{D}{\delta} (C_g - C_o) \quad (5.16)$$

Această situație se întâlnește în practică destul de rar, și numai pe distanțe foarte scurte ale parcursului bulei de gaz.

Cazul real, frecvent întâlnit în practica transferului masei de ozon din bulele de gaz în masa de lichid, când ozonul reacționează cu componente din soluția în care difuzează, presupunând coeficientul de difuzie constant, este caracterizat de o ecuație diferențială omogenă de ordinul 2, care are expresia :

$$D \frac{d^2 C}{dz^2} - RC = 0 \quad (5.17)$$

în care k reprezintă viteza de reacție a ozonului cu componentii din apă.

Ecuția caracteristică este :

$$Dr^2 - R = 0 \quad (5.18)$$

Pentru necunoscuta r se obțin soluțiile :

$$r_{1,2} = \pm \sqrt{R/D} \quad (5.19)$$

Soluția generală a ecuației este :

$$C = k_1 e^{\sqrt{R/D} \cdot z} + k_2 e^{-\sqrt{R/D} \cdot z} \quad (5.20)$$

unde k_1 și k_2 sînt constante de integrare care se determină din condițiile: $z=0$, $C=C_g$ și $z = \delta$, $C=C_0$, obținîndu-se :

$$k_2 = \frac{C_s e^{\sqrt{R/D} \cdot \delta}}{e^{\sqrt{R/D} \cdot \delta} - e^{-\sqrt{R/D} \cdot \delta}} = \frac{C_s e^{\sqrt{R/D} \cdot \delta}}{2 \operatorname{sh} \sqrt{R/D} \cdot \delta} \quad (5.21.1)$$

$$k_1 = - \frac{C_s e^{-\sqrt{R/D} \cdot \delta}}{e^{\sqrt{R/D} \cdot \delta} - e^{-\sqrt{R/D} \cdot \delta}} = - \frac{C_s e^{-\sqrt{R/D} \cdot \delta}}{2 \operatorname{sh} \sqrt{R/D} \cdot \delta} \quad (5.21.2)$$

Înlocuind expresiile lui k_1 și k_2 în (5.20) se obține soluția:

$$C = \frac{C_s}{2 \operatorname{sh} \sqrt{R/D} \cdot \delta} \left[e^{\sqrt{R/D}(\delta-z)} - e^{\sqrt{R/D}(z-\delta)} \right] \quad (5.22)$$

Dacă în ecuația (5.22) se ține seama că $\operatorname{ch} x = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x})$,

$\operatorname{sh} x = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x})$ și că x poate fi $\sqrt{R/D} \cdot z$ sau $\sqrt{R/D} \cdot \delta$, atunci:

$$C = \frac{C_s}{2(e^{\sqrt{R/D}\delta} - e^{-\sqrt{R/D}\delta})} \left[e^{\sqrt{R/D}z} e^{\sqrt{R/D}\delta} + e^{-\sqrt{R/D}z} e^{\sqrt{R/D}\delta} - e^{\sqrt{R/D}z} e^{-\sqrt{R/D}\delta} - e^{-\sqrt{R/D}z} e^{-\sqrt{R/D}\delta} - e^{-\sqrt{R/D}z} e^{\sqrt{R/D}\delta} - e^{\sqrt{R/D}z} e^{-\sqrt{R/D}\delta} + e^{-\sqrt{R/D}z} e^{-\sqrt{R/D}\delta} + e^{-\sqrt{R/D}z} e^{\sqrt{R/D}\delta} + e^{-\sqrt{R/D}z} e^{-\sqrt{R/D}\delta} \right]$$

relație care conduce la :

$$C = C_s \left[\frac{(e^{\sqrt{R/D}z} + e^{-\sqrt{R/D}z})}{2} - \frac{\frac{1}{2}(e^{\sqrt{R/D}z} - e^{-\sqrt{R/D}z}) \cdot \frac{1}{2}(e^{\sqrt{R/D}\delta} + e^{-\sqrt{R/D}\delta})}{\frac{1}{2}(e^{\sqrt{R/D}\delta} - e^{-\sqrt{R/D}\delta})} \right]$$

de unde rezultă :

$$C = C_s \operatorname{ch} \sqrt{\frac{R}{D}} \cdot z - C_s \frac{\operatorname{sh} \sqrt{\frac{R}{D}} \cdot z}{\operatorname{sh} \sqrt{\frac{R}{D}} \cdot \delta} \quad (5.22')$$

relație echivalentă cu (5.22).

Fluxul masei de ozon la suprafața lichidului ne determină avaluind gradientul dC/dz pentru $z=0$.

$$n_{O_3} \Big|_{z=0} = \frac{C_s \sqrt{R/D}}{\operatorname{th} \sqrt{R/D} \cdot \delta} \quad (5.23)$$

Cînd viteza de reacție $R \neq \text{const}$, se impune ca expresia sa să fie cunoscută. Studiile întreprinse de prof.dr.ing. Cocheș V. și colaboratorii au indicat pentru viteza de descompunere a ozonului ecuația :

$$-\frac{dC}{dt} = kC^n \quad (5.23'')$$

în care: k este constanta vitezei de reacție ; n - ordinul de reacție - care poate fi considerat $3/2$.

Ținînd seama de (5.23) ecuația (5.17) devine:

$$D \frac{d^2C}{dz^2} = kC^{n+1} \quad (5.24)$$

sau:

$$\frac{d^2C}{dz^2} = \frac{k}{D} C^{5/2} \quad (5.24')$$

care este o ecuație diferențială de ordinul 2 neliniară, care se rezolvă prin aproximații succesive luând în considerare condițiile inițiale : $z=0$, $C(0) = C_s$ și $z = \delta$, $C(\delta) = 0$.

Soluția de pornire în rezolvarea ecuației (5.24'), care ține seama de condițiile inițiale este:

$$C = C_s - z \frac{C_s}{\delta} \quad (5.25)$$

Din (5.24') se obține :

$$C'' = \frac{k}{D} \sqrt{C_s^3 (1-z/\delta)^5} \quad (5.26)$$

Prin integrarea ecuației (5.26) se obține :

$$C' = -\frac{2}{7} \frac{k}{D} \sqrt{C_s^3} \cdot \delta \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^{7/2} + A \quad (5.27)$$

După integrarea ecuației (5.27) rezultă :

$$C = A \cdot z + \frac{4}{63} \delta^2 \frac{k}{D} \sqrt{C_s^3} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^{9/2} + B \quad (5.28)$$

unde A și B sînt constante de integrare, și se determină din condițiile inițiale, obținînd :

$$B = C_s \left(1 - \frac{4}{63} \delta^2 \frac{k}{D} \sqrt{C_s^3}\right) \quad (5.29.1)$$

$$A = \frac{C_s}{\delta} \left(\frac{4}{63} \delta^2 \frac{k}{D} \sqrt{C_s^3} - 1\right) \quad (5.29.2)$$

deci, soluția ecuației (5.24') devine :

$$C = \frac{C_s}{\delta} (E \sqrt{C_s^3} - 1) z + E \cdot \delta \sqrt{C_s^3} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^{9/2} + C_s \left(1 - E \delta \sqrt{C_s^3}\right) \quad (5.30)$$

unde s-a notat : $E = 4/63 \cdot \delta \cdot k/D$.

Expresia fluxului masic de ozon la suprafața lichidului, după efectuarea calculului, este:

$$m_{O_3} \Big|_{z=0} = C_s \left[\frac{D}{\delta} - \frac{2}{7} \sqrt{C_s^3} \left(\delta^2 - \frac{2}{9}\right) \right] \quad (5.31)$$

5.3.3. Considerații privind similitudinea transferului de masă

Se consideră transferul de masă prin difuzie moleculelor

convectivă în regim staționar și curgerea unidirecțională după direcția z , caracterizat de ecuația :

$$w \frac{\partial C}{\partial z} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5.32)$$

unde w este componenta vitezei v după direcția z ,

Se scriu termenii în diferențe finite, sub forma :

$$w \frac{\partial C}{\partial z} \sim w \frac{\Delta C}{h} \quad \text{și} \quad D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \sim D \frac{\Delta C}{h^2} \quad (5.32')$$

din care rezultă numărul adimensional al lui Peclet.

$$Pe = \frac{wh}{D} \quad (5.33)$$

Pentru curgerea hidrodinamică raportul numerelor Peclet și Reynolds conduce la criteriul Prandtl pentru difuzie:

$$\frac{wh/D}{wh/\nu} = \frac{\nu}{D} = Pr \quad (5.34)$$

Pentru un curent de apă, cu adâncimea caracteristică h și viteza medie v , în care ozonul pătrunde prin procese de transfer de masă se consideră coeficientul de transfer de masă global al procesului :

$$k_L = K_L(v, h, D_L, \nu, g) \quad (5.35)$$

unde ν este coeficientul de vâscozitate cinematică a lichidului (apei), și g este accelerația gravitațională, iar D este difuzivitatea celor două medii fluide.

Aplicând funcției (5.35) teorema produselor adimensionale, P a lui Buckingham, rezultă :

$$\pi_1 = k_L \cdot h^2 / D_L = Nu \quad (\text{Nusselt}) \quad (5.36)$$

$$\pi_2 = h \cdot v / \nu = Re \quad (\text{Reynolds}) \quad (5.37)$$

$$\pi_3 = v^2 / g \cdot h = Fr \quad (\text{Froude}) \quad (5.38)$$

$$\pi_4 = \nu / D_L = Sc \quad (\text{Schmidt}) \quad (5.39)$$

Cu ajutorul produselor adimensionale se scrie ecuația criterială:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4) \quad (5.40)$$

sau:

$$\frac{k_L h^2}{D_L} = Z \left(\frac{h \cdot v}{\nu} \right)^x \left(\frac{v^2}{g h} \right)^y \left(\frac{\nu}{D_L} \right)^z \quad (5.40')$$

respectiv:
$$Nu = Z \cdot Re^x \cdot Fr^y \cdot Sc^z \quad (5.40'')$$

in care : Z, x, y, z sînt coeficienți care se determină experimental pentru fiecare situație concretă.

5.3.4. Formarea bulelor de gaz

Se consideră un orificiu vertical inversat în apă, conform schemei din figura 5.12, de diametru d_0 . In timpul formării bula de gaz ia succesiv forme de calote sferice și la desprindere formă de sferă. Desprinderea bulei de gaz ozonat se produce

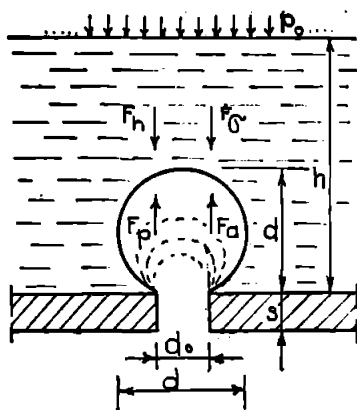


Fig.5.12.-Formarea bulei de gaz.

cînd forța ascensională, datorată acțiunii forțelor de presiune a gazului F_p și forței arhimedice F_a , egalază suma forțelor de tensiune superficială $F_σ$ și de presiune hidrostatică F_h a coloanei de apă de deasupra orificiului (drenaj de mare rezistență). In aceste condiții se poate scrie :

$$F_p + F_a = F_σ + F_h \quad (5.41)$$

Se dezvoltă ecuația (5,41) ținînd seama că $d \ll h$, și se obține :

$$p \frac{\pi d_0^2}{4} + \frac{\pi d^3}{6} (\rho_a - \rho) g = \pi d_0 \sigma \cos \theta + \frac{\pi d^2}{4} (\rho_0 + \rho_a g h) \quad (5.42)$$

in care : d este diametrul bulei sferice de gaz ozonat ; ρ - densitatea gazului ozonat ; ρ_a - densitatea apei de tratat ; g - accelerația gravitațională ; σ - coeficientul de tensiune superficială a apei ; θ - unghiul de contact la interfața lichid - solid - gaz (pentru orificiul imersat/complet udat $\theta = 0$) ; p_0 - presiunea exercitată asupra suprafeței apei ; h - înălțimea apei deasupra orificiului.

Presiunea p a gazului ozonat necesară la orificiul de formare al bulei se determină din condiția de echilibru a forțelor de presiune , a forțelor hidrostatice și de tensiune superficială la nivelul orificiului (de diametru d_0), rezultînd, la interfața

gaz - lichid, expresia :

$$p = \frac{4\sigma}{d_0} + \frac{d^2}{d_0^2} (p_0 + \rho_a g h) \quad (5.43)$$

Punând condiția $d_0 \neq d$ și neglijând primul termen ($4\sigma/d_0 \ll (p_0 + \rho_a g h) d^2/d_0^2$), rezultă :

$$p = (p_0 + \rho_a g h) \frac{d^2}{d_0^2} \quad (5.44)$$

expresie care introdusă în (5.42) conduce la :

$$\frac{\pi d^3}{6} (\rho_a - \rho) g = d_0 \sigma \quad (5.45)$$

de unde rezultă expresia (simplificată) a diametrului bulei de gaz:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6d_0\sigma}{(\rho_a - \rho)g}} \quad (5.46)$$

La relația (5.46) se ajunge și dacă se consideră că în regiul de dispersie bulă cu bulă, caracterizat printr-o dispersie continuă și uniformă a bulelor de gaz, fără a exista interacțiuni ale acestora, la desprindere fiind hotărâtoare forțele arhimedice și cele de tensiune superficială, la echilibru [77, 151], adică $F_a = F_\sigma$.

În situația limită, momentul incipient al formării bulei de gaz, $d=d_0$, relația (5.44) devine :

$$p = p_0 + \rho_a g h \quad (5.47)$$

adică, coloana de apă de deasupra orificiului echilibrează presiunea gazului.

Înlocuind valoarea presiunii gazului ozonat la orificiu astfel obținută în relația (5.42), pentru determinarea diametrului bulei de gaz, în momentul formării sale, se obține o ecuație de forma :

$$d^3 - ad^2 + ad_0^2 - bd_0 = 0 \quad (5.48)$$

în care:

$$a = \frac{3 \cdot (p_0 + \rho_a g h)}{(\rho_a - \rho)g} \quad \text{și} \quad b = \frac{6\sigma}{(\rho_a - \rho)g} \quad (5.49)$$

Deoarece $a \gg b$ ($a \sim 10^5 b$), se poate neglija termenul care-l con-

ține pe b, rezultând :

$$d^3 - ad^2 + ad_0^2 = 0 \quad (5.48')$$

Pentru determinarea valorii diametrului bulei de gaz se rezolvă ecuațiile (5.48) sau (5.48') utilizând calculatorul, folosind programul a cărui schemă logică este redată în Figura 5.13. Se observă că prin mărirea presiunii (de la suprafața apei) din contactor și prin mărirea coloanei de apă dimenșiunea bulelor se micșorează cu pînă la 3,5 % .

Presiunea p_1 a gazului ozonat necesară la intrarea în orificiul de formare al bulei, pe unitatea de suprafață, este dată de relația :

$$p_1 \cdot p + \Delta p = \Delta p_{loc} + \Delta p_G + \Delta p_h \quad (5.50)$$

în care: Δp_{loc} este pierderea de presiune la trecerea gazului ozonat prin materialul poros sau prin drenajul de mare rezistență ; Δp_G - presiunea necesară pentru învingerea forței de tensiune superficială ; Δp_h - presiunea necesară pentru învingerea presiunii de deasupra orificiului (coloană de apă și presiunea suplimentară care acționează asupra acesteia) .

În calculul lui Δp_{loc} se ține seama de: contractia jetului de gaz la intrarea în orificiu ; frecarea gazului de pereții orificiului ; lărgirea jetului la ieșirea din orificiu [151] obținându-se :

$$\Delta p_{loc} = k_1 \left[0,4 \left(0,125 - \frac{s_0}{s_c} \right) + \lambda_f \left(\frac{s}{d_0} \right) + \left(1 - \frac{s_0}{s_c} \right) \right] \frac{w_0^2}{2} \rho \quad (5.51)$$

unde: k_1 este un coeficient experimental funcție de raportul s/d_0 și de profilul canalului orificiului ; s_0 - suprafața totală a orificiilor ; s_c - suprafața secțiunii materialului poros/suprafața transversală a drenajului de mare rezistență ; λ_f - coeficient de frecare cu materialul uscat ; s - lungimea orificiului (grosimea materialului, drenant) ; w_0 - viteza gazului ozonat prin orificiu, care se determină din ecuația de continuitate , avînd expresia :

$$w_0 = \frac{q}{d_0} \sqrt{\frac{q}{n\pi}} = \frac{q}{s_0} \quad (5.52)$$

în care : q este debitul de gaz ozonat ; n - numărul orifi-

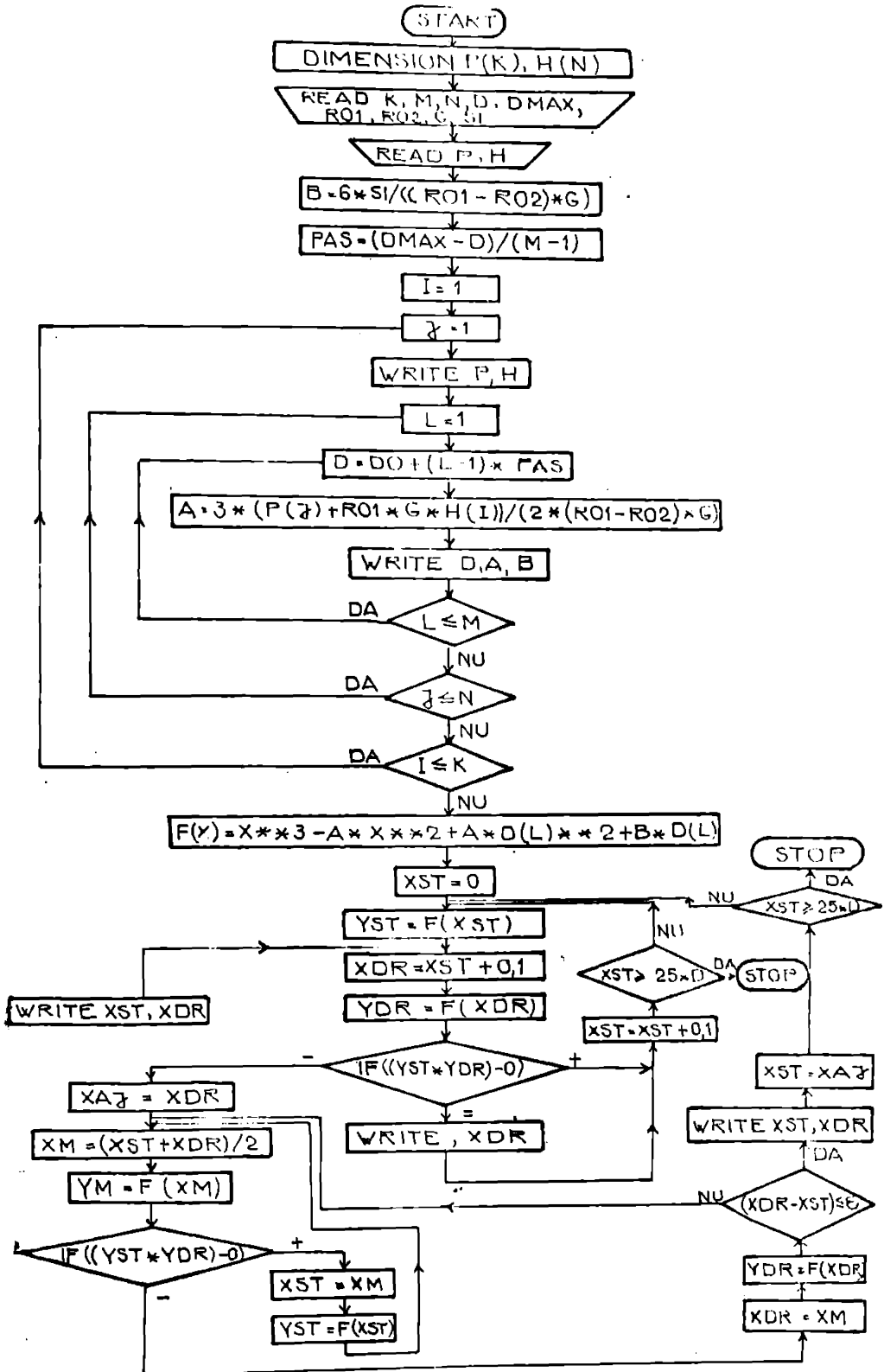


Fig. 5.13

ciilor.

Presiunea necesară pentru învingerea forței de tensiune superficială se obține din egalarea forței de tensiune superficială cu cea de presiune din tensiunea superficială, adică :

$$\pi d_0 \sigma = \frac{\pi d_0^2}{4} \Delta p_G \quad (5.53)$$

de unde rezultă :

$$\Delta p_G = \frac{4\sigma}{d_0} \quad (5.54)$$

Relația (5.54) este valabilă pentru $d_0 < 1$ mm, iar pentru orificii cu diametre mai mari [151] se recomandă utilizarea relației :

$$\Delta p_G = \frac{4\sigma}{1,3d_0 + 0,08d_0^2} \quad (5.54')$$

Expresia presiunii necesare pentru învingerea presiunii de deasupra orificiului, considerînd funcționarea contactorului de ozon în condiții normale este de forma :

$$\Delta p_h = p_0 + S_a q h \quad (5.47')$$

Se observă că diametrul bulei, de gaz rezultat din relația (5.46) sau prin rezolvarea ecuațiilor (5.48) sau (5.48') este independent de valoarea debitului de gaz ozonat. Frecvența de formare și detașare a bulelor de gaz, f , în s^{-1} , se exprimă cu relația :

$$f = \frac{q_0 (S_a - S) q}{\pi d_0 \sigma} \quad (5.55)$$

Un alt mod de determinare a diametrului bulei de gaz [151.1] cînd se ține seama și de efectul viscozității apei, în regim laminar de curgere, pe baza legii lui Stokes rezultă :

$$d = 1,307 (\sqrt{q_1})^{0,25} \quad (5.56)$$

În situația majorării debitului q peste limita formării bulelor individuale, crescînd frecvența de formare a acestora, se ajunge la regimul intermediar, cînd volumul bulelor se mărește, avînd diametrul [151.1] dat de relația :

$$d = 0,875 q^{0,4} \quad (5.57)$$

Dacă în continuare debitul se mărește se ajunge în cazul regimului de jet caracterizat prin fuzionarea bulelor de gaz datorită micșorării distanțelor dintre ele, când viteza de ridicare a bulelor este dependentă de debitul gazului ozonat, iar traiectoria lor se abate de la verticală, forma lor putând suferi deformații față de cea sferică. În aceste condiții se poate considera [151.1] că viteza de formare a bulelor este egală cu viteza de detașare a bulei precedente, iar valoarea debitului volumic de gaz ozonat pentru un orificiu este de forma :

$$q_v = \frac{\pi d_j^3}{4 w_j} \quad (5.58)$$

în care d_j este diametrul bulei de gaz respectiv w_j viteza unei bule izolate. Cunoșcând valoarea lui q_v se determină diametrul bulei în regimul de formare de jet cu relația :

$$d_j = \sqrt{\frac{4 q_v}{\pi w_j}} = 1,129 \sqrt{\frac{q_v}{w_j}} \quad (5.59)$$

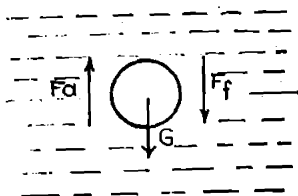
Considerînd la limită egale, valorile diametrului bulei de gaz din relațiile (5.46) și (5.59) se determină debitul critic de gaz ozonat care delimitează regimurile de dispersie și de jet, rezultînd :

$$q_{v,cr} = \frac{\pi w_j}{4} \left[\frac{6 d_o S'}{(S_a - S) g} \right]^{2/3} \quad (5.60)$$

5.3.5. Viteza și regimul de mișcare al bulei de gaz

Viteza ascensională terminală, w , a unei bule de gaz într-un lichid în câmp gravitațional, conform schemei din figura 5.14, se determină din relația de echilibru a forțelor care acționează asupra bulei :

$$F_a = G + F_f \quad (5.61)$$



sau:

$$\frac{\pi d^3}{6} (S_a - S) g = \frac{\xi}{2} w^2 S_a \frac{\pi d^2}{4} \quad (5.62)$$

din care rezultă :

$$w = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{(S_a - S) g d}{\xi S_a}} \quad (5.63)$$

Fig. 5.14. Bule de gaz în câmp gravitațional.

Deoarece $S \ll S_a$, S se poate neglija, și se obține :

$$w = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{d g}{\xi}} \quad (5.63)$$

Comportarea hidrodinamică a unei bule de gaz reprezintă rezultatul interacțiunii forțelor care acționează asupra sa, fiind variabilă și complexă datorită modificărilor permanente ale formei pe parcurs.

Regimul de curgere este caracterizat de :

- criteriul Reynolds : $Re = \frac{w d}{\nu}$ (5.64)

- criteriul Eötvös : $Eö = \frac{d^2 (S_a - S) g}{\sigma}$ (5.65)

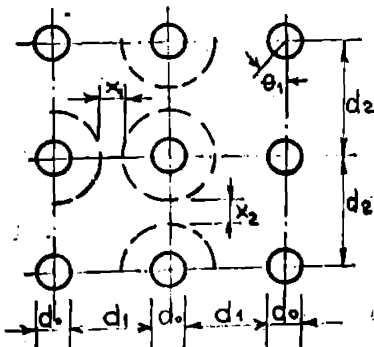
- criteriul Weber : $We = \frac{d w^2 S}{\sigma}$ (5.56)

- numărul M : $M = \frac{We^3}{Re^4} \xi = \frac{w^2 S^3 d^4}{\sigma^3} \xi$ (5.67)

M exprimînd influența frzei continue [77] , unde ξ este coeficientul de rezistență la frecare.

5.3.6. Considerații privind dispozitivul de formare al bulelor de gaz

Distanțele între orificiile drenajului de mare rezistență, figura 5.15, se stabilește/verifică cu relația :



$$d_1 = \beta d - d_0 \quad (5.68)$$

și/sau :

$$d_2 = \beta d \quad (5.69)$$

unde β este un coeficient adimensional care ține seama de distanța reciprocă a bulelor de gaz.

Relațiile (5.68) și (5.69) sînt valabile atunci cînd distanțele între centrele orificiilor sînt egale în lungul respectiv laturii suportului dre-

Fig.5.15. Realizarea drenajului de mare rezistență

nat. Dacă această condiție nu este respectată :

$$d_1 = \beta_1 d - d_0 \quad (5.68')$$

$$d_2 = \beta_2 d \quad (5.69')$$

Legătura între β_1 și β_2 fiind dată de una din următoarele relații :

$$\beta_2 = \frac{\beta_1 d - d_0}{d} \cdot \frac{d_1}{d \operatorname{tg} \theta_1} \quad (5.70)$$

sau:

$$\beta_1 = \beta_2 \operatorname{tg} \theta_1 - \frac{d_0}{d} \quad (5.70')$$

Punind condiția ca distanța dintre bulele de gaz să reprezinte 10% din mărimea acestora (în regimul de dispersie), adică $x_1 = x_2 = 0,1 d$, rezultă $\beta = 1,10$, iar pentru $x_1 \neq x_2$ se folosește una din relațiile (5.70) sau (5.70').

5.4. Introducerea apei sub formă de picături în atmosfera de gaz ozonat

5.4.1. Transferul ozonului din gazul ozonat în apă

Solubilitatea în apă a ozonului la saturație, C_s , este proporțională cu presiunea sa parțială în stare de vapori, p_s , conform relației:

$$C_s = k p_s \quad (5.71)$$

în care k_s este coeficientul de absorbție, care variază invers proporțional cu temperatura.

Deci, transferul ozonului din gazul ozonat în picăturile de apă se apreciază în funcție de presiunea parțială a ozonului din masa gazului ozonat. Se ține seama că un amestec gazos ce ocupă volumul V la temperatura absolută T și la presiunea p , este constituit din m_1, m_2, \dots, m_n , cantități masice de gaz având masele moleculare M_1 și exercitând fiecare, presiunile parțiale p_{s_i} , este:

$$p = p_{s_1} + p_{s_2} + \dots + p_{s_n} \quad (5.72)$$

și

$$\frac{p_{s_1}}{M_1} = \frac{p_{s_2}}{M_2} = \dots = \frac{p_{s_n}}{M_n} \quad (5.73)$$

care permit determinarea presiunii parțiale a ozonului în scopul stabilirii parametrilor procesului de transfer de masă. Coeficien-

tul de transfer de masă în fază lichidă k_L este dependent de coeficientii convectivi de transfer de masă în gaz k_{g0} și în lichid k_{Lc} . [151.1] , conform relației de bilanț masic :

$$k_{gc}(p_{s, O_3} - p_{s, O_3f}) = -k_{Lf}(C - C_f) = -k_L(C - C_s) \quad (5.74)$$

unde indicele f reprezintă caracteristica la interfață. Din (5.74), după efectuarea calculelor și ținând seama de (5.71), rezultă :

$$\frac{1}{k_L} = \frac{k_a}{k_{gc}} + \frac{1}{k_{Lc}} \quad (5.75)$$

Transferul de masă între picăturile lichide și aerul ozonat înconjurător este un proces variabil în timp datorită modificărilor permanente a coeficienților de transfer. În cazul picăturilor de apă mici [151.1] relația care indică debitul de masă transferat M_{O_3} este dat de expresia :

$$M_{O_3} = Q \cdot k_L (C - C_s) \quad (5.76)$$

în care Q reprezintă debitul de apă pulverizat.

5.4.2. Considerații privind hidrodinamica formării și mișcării picăturilor de apă

Dispersia apei în picături impune consumul unei anumite cantități de energie necesară învingerii forțelor de tensiune superficială care necesită o energie potențială W minimă a apei, conform relației

$$dW = \sigma dA \quad (5.77)$$

în care dA reprezintă elementul de arie care tinde spre valoarea minimă.

Fenomenul de pulverizare a apei se bazează pe transformarea energiei de presiune în energie cinetică a jetului care, apoi, suferă procesul de divizare/dezintegrare în picături mici. Formarea picăturilor de apă este condiționată de raportul dintre forțele de inerție, de impact mecanic, de tensiune superficială și de efectele aerodinamice [151, 151.1, 77] , interacțiunea acestora asigură o suprafață liberă stabilă sau instabilă pentru apă. Când condițiile de instabilitate la suprafața exterioară a apei sînt îndeplinite se produc unde care cresc

în amplitudine, care se majorează la creșterea vitezei apei și cu efect se desprind picături mici în mediul înconjurător. Picăturile de apă, datorită diferenței de greutate specifică între apă și aerul ozonat, tind să se depună gravitațional. Pentru picăturile fine viteza de cădere u este dată de relația lui Stokes :

$$u = \frac{d^2(\gamma_{\ell} - \gamma_a)}{18\eta_a} \quad (5.78)$$

în care : d este diametrul particulei ; $\gamma_{\ell, a}$ - greutatea specifică a apei (lichidului) respectiv a aerului ozonat ; η_a - coeficientul de vâscozitate dinamică a aerului ozonat.

În procesul mișcării/deplasării picăturilor, cu cât finețea lor este mai mare, adică diametrul mai mic, cu atât suprafața laterală, de contact crește, în amestecul apă-aer ozonat este mai omogen, ceea ce conduce la valori mai ridicate ale coeficientului de transfer.

Considerînd diametrul mediu al picăturilor de apă d , suprafața de contact (laterală) A_n pentru n picături va fi :

$$A_n = n\pi d^2 \quad (5.79)$$

Greutatea G_n pentru n picături are valoarea :

$$G_n = n\gamma_{\ell} \frac{\pi d^3}{6} \quad (5.80)$$

Suprafața de contact, ținînd seama și de (5.80) va avea expresia:

$$A_n = \frac{6G_n}{\gamma_{\ell} d} \quad (5.81)$$

iar dacă se ține seama de debitul de apă $Q = V/t$, definit ca raportul dintre volumul/cantitatea de apă V pe unitatea de timp t se obține :

$$A_n = \frac{6Qt}{d} \quad (5.81')$$

Considerînd mișcarea picăturilor uniform accelerată, $u=g \cdot t$, și luînd viteza de cădere a picăturilor după Stokes, explicitînd timpul și introducîndu-l în (5.81') rezultă :

$$A_n = \frac{6Qt}{d} = \frac{6g \cdot t^2}{2d} = \frac{3g \cdot t^2}{d} \quad (5.82)$$

Pulverizarea unui jet de apă se realizează, în general, prin ajutaje de diverse tipuri constructive. Zona de desprindere/rupere a peliculei de apă și formarea picăturilor depinde de viteza și proprietățile apei, dar și de proprietățile aerului ozonat în care se desfășoară fenomenul. Criteriul de similitudine Weber, dat de raportul forțelor aerodinamice și de tensiune superficială, caracterizează fenomenul dezintegrării jetului de apă, și este dat de expresia :

$$We = \frac{\rho_l \cdot w^2 d_p}{2\sigma} \quad (5.83)$$

în care: ρ_l este densitatea lichidului ; w - viteza tangențială a peliculei de apă la ieșirea din ajutoraj ; d_p - grosimea peliculei la ieșirea din ajutoraj ; σ - tensiunea superficială a apei în raport cu aerul ozonat.

Intre diametrul orificiului d_0 și diametrul d al particulei provenită din dispersia jetului, există [77] , următoarea relație :

$$d = 0,18 \sqrt{d_0 Re_j} \quad (5.84)$$

în care Re_j este criteriul Reynolds în jet.

După [151.1] diametrul mediu al picăturilor de apă formate în cazul pulverizării sub formă de con gol este dat de relația :

$$d = 2,12 \left(\frac{d_0 We}{\rho_l v^2} \right)^{0,5} \quad (5.85)$$

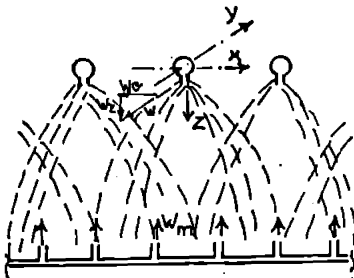


Fig.5.17. Pulverizarea apei în curentul de aer ozonat.

Schema (principlă) de introducere a apei sub formă de picături în atmosfera de gaz ozonat se prezintă în figura 5.17, pentru care se fac următoarele ipoteze simplificatoare [151.1]: picăturile de apă se comportă ca sferele solide ; în timpul mișcării prin aerul ozonat pi-

căturile de apă nu se ciocnesc între ele ; spațiul parcurs este cel al picăturilor individuale ; valoarea coeficientului ξ de rezistență la înaintarea picăturii prin aer se modifică în lun-

gul traiectoriei acesteia datorită modificării continue a vitezei picăturii de apă. Corespunzător analogiei între mișcarea picăturilor de apă în aerul ozonat și mișcarea bulelor de gaz ozonat în masa de apă [151.1] se întâlnesc următoarele regimuri de mișcare :

a) - regimul laminar, pentru $Re < 2$ unde:

$$\xi = \frac{24}{Re} \quad (5.76)$$

b) - regimul de tranziție, în care ponderea forțelor de inerție crește, sub acțiunea forțelor de tensiune superficială și a celor superficiale de forfecare de la suprafața picăturilor, în interiorul acestora are loc o mișcare de circulație (circulația interioară) a cărei prim efect de reducere a coeficientului ξ conduce la înoirea continuă a suprafeței de contact interfazică ceea ce contribuie, în final, la mărirea (de cea 2 ori [151.1]) a coeficientului de transfer de masă. În această situație, viteza de cădere determinată cu relația (5.78) trebuie măjurată prin multiplicarea cu factorul k' definit de relația :

$$k' = \frac{3(\eta_a + \eta_l)}{2\eta_a + 3\eta_l} \quad (5.87)$$

unde: η_n este coeficientul de vâscozitate a normului ozonat (a fluidului continuu), iar η_l - coeficientul de vâscozitate a picăturii de apă (sau bulei în cadrul analogiei). Se observă, însă, că influența circulației interioare asupra vitezei picăturii de apă este mică (chiar foarte mică) deoarece raportul η_n/η_l are valori mari conducând la valori mici pentru k' ; în cazul bulelor de gaz care străbat masa de apă situația se inversează, adică raportul η_a/η_l scade, dar crește valoarea factorului k' (pînă la 1,5).

În acest regim de mișcare valoarea coeficientului de rezistență la înaintare a picăturii în aerul ozonat este dată de expresia :

$$\xi = \frac{24}{Re} (1 + 0,15 Re^{0,687}) \quad (5.88)$$

Regimul de tranziție aparține domeniului în care $Re \in (2, \dots, 1000)$
 c) - regimul turbulent, cu domeniile de turbulență netedă pentru care coeficientul ξ are expresia :

$$\xi = 0,4566 + 4,17 \cdot 10^{-3} Re \quad (5.89)$$

pentru $Re \in (800 \dots 1400)$, și de turbulență rugoasă pentru care:

$$\xi = 0,51 \tag{5.90}$$

la valori $Re \in (1400 \dots 2000)$, în care forma exterioră a particulelor de apă variază sub acțiunea forțelor de presiune dinamică frontală, de inerție, superficiale și masice.

Viteza terminală relativă w_r [77] reprezintă viteza relativă a picăturii de apă față de aerul ozonat (figura 5.17) și, în câmp gravitațional, pentru $Re > 2$ are expresia

$$w_r = w + w_m \tag{5.91}$$

unde w_m este componenta verticală a vitezei aerului ozonat și

$$w = w_s \frac{3\eta_e + 2\eta_a + \Gamma}{3\eta_e + 3\eta_a + \Gamma} \tag{5.92}$$

în care: w_s reprezintă viteza pentru sfere solide, iar Γ este factorul de întârziere determinat de efectul substanțelor tenoactive din sistem (pentru $d < 0,01 \mu m$, $\Gamma \approx 1/d$ devine factor determinant).

În domeniul mișcării laminare viteza picăturii de apă se determină cu relația (5.63).

5.5. Curgerea apei și a aerului ozonat prin straturi de umplură

Materialul de umplură granular sau sub formă de corpuri de umplere se utilizează pentru a asigura un contact îmbunătățit fazelor participante în procesul de proprietate (ozon).

Materialele de umplură trebuie să fie neutre din punct de vedere chimic față de componente, să prezinte o rezistență mecanică bună, să nu fie antrenate, să fie durabile.

5.5.1. Mărimi caracteristice ale materialului de umplură

Mărimea particulelor se exprimă prin diametrul mediu al particulelor, definit de proprietățile geometrice ale acestora.

În acest mod :

- diametrul mediu funcție de volumul mediu al particulei, d_v , se exprimă cu relația :

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{\sum_1^m (n_i d_i^3)}{\sum_1^m n_i}} \tag{5.93}$$

În cazul particulelor sferice condiția ca diametrul pe care l-ar avea particulele unui amestec monodispers, dacă numărul și volumul lor total ar fi egal cu cel al amestecului polidispers este :

$$\sum_1^m \left(\frac{1}{6} \pi d_i^3 n_i \right) = \frac{1}{6} \pi d_i^3 \sum_1^m n_i \quad (5.93)$$

în care: $i = 1, 2, \dots, m$ este numărul fracțiunilor monodisperse ale materialului polidispers; d_i - diametrul particulelor fracțiunilor i ; n_i - numărul particulelor din fracțiune.

Diametrul unei fracțiuni (d_j) se apreciază, ca medie aritmetică a laturilor sitei între care s-au cernut n_j particule.

- diametrul mediu raportat la suprafața medie a particulelor, d_A , se stabilește cu relația :

$$d_A = \sqrt{\frac{\sum_1^m (n_i d_i^2)}{\sum_1^m (M_i/d_i^3)}} \quad (5.94)$$

- diametrul mediu, d_m , raportat la masa medie a particulelor este dat de expresia :

$$(5.95)$$

în care $M_i = \pi d_i^3 \rho n_i / 6$ reprezintă masa fracțiunii i cu n_i granule de diametru d_i și densitate ρ , în cazul particulelor sferice; în această situație $d_m = d_v$, dacă particulele sînt de aceeași densitate (aceleși material).

Considerînd expresia lui M_i se observă că relația (5.94) poate fi pusă sub formă :

$$d_A = \sqrt{\frac{\sum_1^m (M_i/d_i)}{\sum_1^m (M_i/d_i^2)}} \quad (5.94')$$

- diametrul mediu în raport cu suprafața medie specifică a particulelor (raportul între suprafața laterală și volumul particulelor), d_s , rezultă din :

$$d_s = \frac{\sum_1^m (n_i d_i^3)}{\sum_1^m (n_i d_i^2)} \quad (5.96)$$

În cazul considerării masei M_i a fracțiunilor această relație devine :

$$d_s = \frac{\sum_1^m M_i}{\sum_1^m (M_i/d_i)} \quad (5.96')$$

- diametrul mediu funcție de fracțiile volumice x_{vi} (de dimensiune d_i), d se exprimă cu relația :

$$d = \sum_1^m x_{vi} \cdot d_i \quad (5.97)$$

Frecvent se utilizează noțiunea de diametru echivalent al particulelor, d_e , care poate reprezenta :

- diametrul unei sfere de volum egal cu cel al particulei (v_p volumul particulei), dat de expresia :

$$d_{ec} = \sqrt[3]{6 v_p / \pi} = 1,24 v_p^{1/3} \quad (5.98)$$

- diametrul unei sfere de arie egală cu aria particulei (a_p aria particulei) dat de expresia :

$$d_{ec1} = \sqrt{a_p / \pi} = 0,564 a_p^{1/2} \quad (5.99)$$

Factorul de formă sau sfericitatea materialului, ψ , reprezintă raportul dintre suprafața laterală a sferei a_s de volum egal cu cel al particulei și suprafața laterală a acesteia, adică:

$$\psi = \frac{a_s}{a_p} = \frac{\pi d^2}{a_p} \cdot 4,84 \frac{v_p^{2/3}}{a_p} \quad (5.100)$$

Raportul dintre suprafața particulei și volumul său definește, în m^2/m^3 , suprafața specifică a particulelor umpluturii, a , conform relației :

$$a = \frac{a_p}{v_p} \quad (5.101)$$

În cazul particulelor sferice $a = 6/d$, valoare care se folosește pentru determinarea suprafeței specifice și pentru particulele nesferice, înlocuind diametrul sferei d cu diametrul echivalent d_{ec} , obținînd pentru amestecuri polidisperse :

$$a = \sum_1^m \frac{6}{\psi d_i} x_{vi} \quad (5.102)$$

Suprafața corpurilor de umplere cuprinse într-un volum de strat $d \text{ cm}^3$ (sau, uneori, într-un kilogram de corpuri de umplură), în m^2/m^3 (sau m^2/kg) definește suprafața specifică a umpluturii, notată φ . Diferența dintre ψ și a , se datorește fracției de goluri atunci cînd particulele sînt cuprinse într-un

strat de umplutură. Relația de legătură între aceste două mărimi este :

$$\varphi \cdot a(1-\varepsilon) \quad (5.103)$$

în care ε reprezintă fracția de goluri sau porozitatea, în m^3/m^3 sau % volum, dată de volumul golurilor/porilor existente într-un volum de strat de umplutură, conform relației :

$$\varepsilon = \frac{V - V_p}{V} \quad (5.104)$$

unde : V este volumul stratului de umplutură ; V_p - volumul particulelor din strat.

Suprafața specifică a materialului φ , în m^2/m^3 se determină cu relația :

$$\varphi = \frac{6(1-\varepsilon)}{\psi d_{cc}} \quad (5.105)$$

5.5.2. Caracteristicile hidraulice ale curgerii

După modul în care apa străbate materialul de umplutură curgerea este: imersată, prin percolare și mixtă, conform schemei din

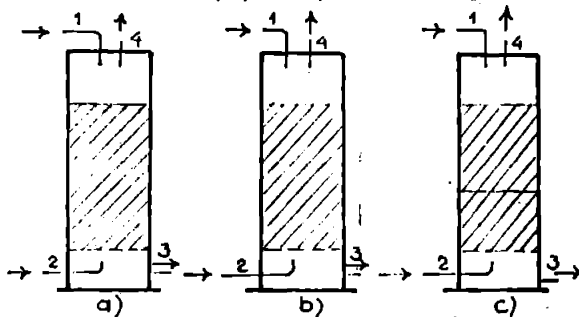


figura 5.18.

Pentru stabilirea diametrului mediu hidraulic, numit și diametru echivalent al umpluturii, d_e , care reprezintă diametrul echivalent al golurilor/canalelor din umplutură, se utilizează relația :

$$d_e = \frac{4\varepsilon}{\varphi} \quad (5.106)$$

În funcție de suprafața specifică a particulelor, d_e se determină din :

$$d_e = 4\varepsilon / \varphi \quad (5.106')$$

sau în funcție de diametrul mediu, de volum d_v și de facto-

rul de formă Ψ , utilizând relația :

$$de = \frac{2\varepsilon\Psi dv}{3(1-\varepsilon)} \quad (5.107)$$

Viteza fictivă w_f prin materialul de umplutură reprezintă viteza pe care ar avea-o apa curgînd cu debitul volumic q prin secțiunea A a contactorului considerat fără material de umplutură, indiferent de felul curgerii, adică :

$$w_f = q/A \quad (5.108)$$

Viteza reală medie w , pe porțiunea imersată a contactorului reprezintă raportul dintre debitul volumic al apei q și aria medie a golurilor pe verticală (direcția de curgere) A_g , deci :

$$w = q/A_g \quad (5.109)$$

Aplicînd relația de continuitate rezultă, pentru curgerea imersată :

$$w = w_f \frac{A}{A_g} = w_f \frac{\text{Vol}}{\text{Vol}_g} = w_f \frac{1}{\varepsilon} \quad (5.110)$$

unde : Vol , Vol_g sînt volumul coloanei contactorului, respectiv volumul golurilor materialului de umplutură.

Regimul de curgere se exprimă prin criteriul Reynolds:

$$Re = \frac{w de}{\nu} = \frac{w_f/\varepsilon \cdot 4\varepsilon/\varphi}{\nu} = \frac{4 w_f}{\nu \varphi} \quad (5.111)$$

în care ν , reprezintă coeficientul cinematic de vîscozitate al amestecului de apă și gaz ozonat.

Dacă se consideră materialul de umplutură ca o sumă de corpuri solide imersate în fluidul format din amestecul omogen de apă și aer ozonat, de densitate ρ_1 , atunci curgerea are loc în jurul particulelor, fiind exterioră, iar pierderea de presiune unitară $\Delta p/l$ se determină prin însumarea rezistențelor introduse de fiecare particulă solidă [77]. Pe baza acestui model căderea de presiune Δp la curgerea apei prin materialul de umplutură se determină cu relația :

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{de} \frac{w^2}{2} \rho \quad (5.112)$$

în care coeficientul de frecare λ ține seama de frecările fluid-

suprafața corpului de umplură, precum și de modificarea vitezei și direcției de curgere a fluidului prin canalele formate între constituentele umplurii, fiind o funcție a regimului de curgere a fluidului. În cazul numerelor Reynolds mici, ($Re = \rho d_v \nu_1 < 5$) cînd forțele de vîscozitate controlează curgerea, expresia lui Δp este dată de ecuația Kozeny-Garman:

$$\Delta p = (150 \dots 180) \frac{l}{d_e} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} w_f \cdot \nu_1 \cdot \rho \quad (5.113)$$

În cazul numerelor Reynolds mari, $Re > 2000$, cînd forțele de vîscozitate devin neglijabile, curgerea este controlată de forțele inerțiale, iar expresia lui Δp este dată de relația Burko-Plummer:

$$\Delta p = 3,5 \frac{l}{d_e} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{w_f^2}{2} \rho \quad (5.114)$$

Relațiile (5.113) și (5.114) se recomandă pentru umpluturi sferice sau apropiate. Pentru materiale de umplură formate din corpuri nesferice (inela Raschig, și Berl, etc.) se recomandă [77] metoda Brownell, în care:

$$\Delta p = \lambda \cdot F_\lambda \frac{l}{d_e} \frac{w_f^2}{2} \rho \quad (5.115)$$

unde λ este coeficientul pierderilor de sarcină și se determină din diagrama din figura 5.19; F_λ - coeficient specific a cărui valoare se determină din diagramele din figura 5.20 în funcție de măr-

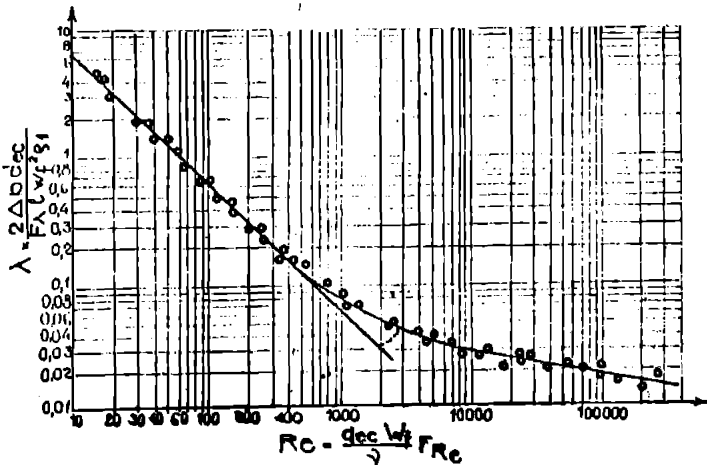


Fig. 5.19. Diagrama $\lambda - Re$ [77]

mle ε și ψ . Coeficientul F_{Re} din expresia lui \bar{K}_e (din figura

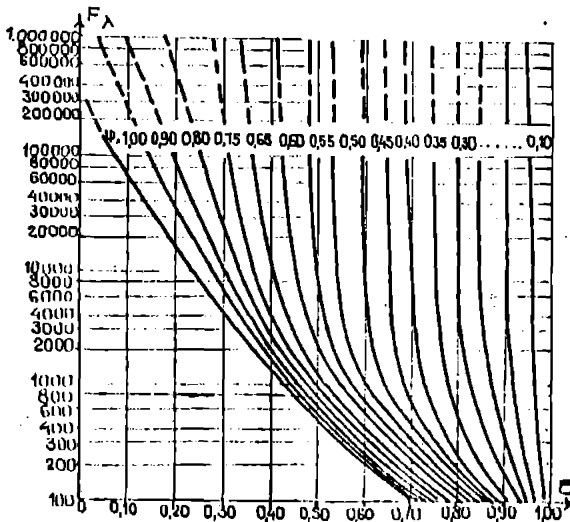


Fig.5.20. Diagrama pentru determinarea lui F_λ [77]

5.19) poate fi determinat din diagrama prezentată în figura 5.21.

În situația curgerii prin percolare materialului de umplură este atribuit în contraurent de două fluide, apă și respectiv aerul ozonat.

Apa curge sub formă de peliculă acoperind și udând suprafața umplurii și ocupă parțial go-

lurile materialului de umplură. Aerul ozonat curge prin spa-

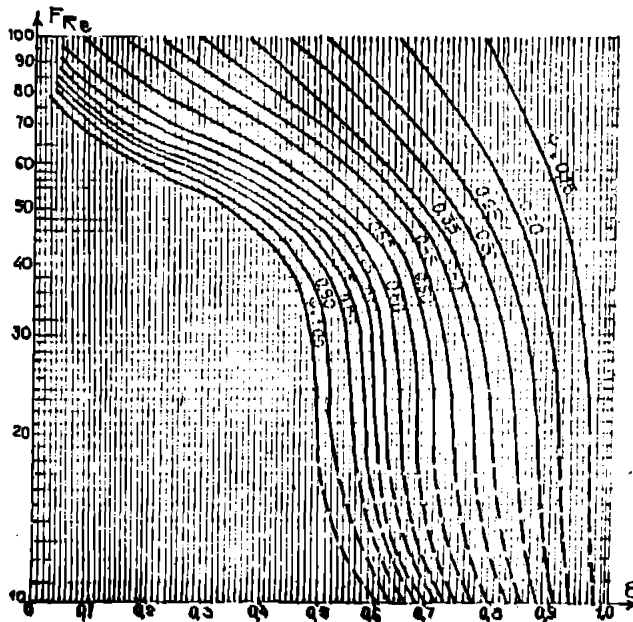


Fig.5.21. Diagrama pentru determinarea lui F_{Re} [77]

țiile rămase libere din golurile materialului de umplutură umectat.

Curgerea peliculară este caracterizată [77] prin mărimea de saturație efectivă S_e , condiție în care căderea de presiune, după metoda Brownell, înlocuind viteza fictivă cu w_f/S_e , are expresia :

$$\Delta p = \lambda F_A \frac{l}{d_e} \frac{1}{2} \left(\frac{w_f}{S_e} \right)^2 \rho \quad (5.116)$$

Saturația efectivă, S_e , este raportul dintre volumul ocupat de lichidul umectant (apa de tratat) în curgere și volumul total de goluri (ocupat de apă și aerul ozonat în curgere) și se calculează cu relația :

$$S_e = \left(\frac{w_f \cdot \eta \cdot l}{K \cdot \Delta p} \right)^{1/y} \quad (5.117)$$

în care: w_f este viteza fictivă a apei, avînd coeficientul de viscozitate dinamică η , Δp - căderea de presiune a apei pe stratul de umplutură de grosime l ; K - permeabilitatea/coeficientul de filtrație al materialului de umplutură; y - exponent depinzînd de diametrul echivalent de volum al granulelor, conform tabelului 5.1. Pe baza modelului lui Darcy, K se determină în funcție de debitul volumic q_v , cu relația :

Tabelul 51.

y(dec)		[77]	
dec [mm]	y	dec [mm]	y
0,05	1,30	5	1,78
0,1	3,00	10	1,66
0,2	2,73	20	1,56
0,5	2,40	50	1,47
1	2,16	100	1,41
2	1,97		

$$K = \frac{q_v \cdot \eta \cdot l}{A \cdot \Delta p} \quad (5.118)$$

În funcție de diametrul echivalent de volum K se calculează cu relația :

$$K = \frac{\psi^2 d_{ec}^2 \cdot \varepsilon^3}{200 (1-\varepsilon)^2} \quad (5.119)$$

sau după modelul lui Kozeny, cu expresia :

$$K = \frac{1}{5} \frac{\varepsilon^3}{\psi^2 (1-\varepsilon)^2} \quad (5.120)$$

Coefficienții specifici F_A și F_R , depinzînd de mărimile ε și ψ , cu variațiile date în diagramele din figurile 5.20 și 5.21.

Pentru umpluturile realizate din inele Raschig [77] căderea de presiune a fazei gazoase $\Delta p_{u,g}$ în timpul percolării apei se determină cu relația :

$$\Delta p_{u,g} = \Delta p_g \left(1 + \frac{3,3}{d_r}\right) \quad (5.121)$$

în care Δp_g este căderea de presiune a gazului în umplutura umedă ; d_r - diametrul nominal al inelelor Raschig.

Căderea de presiune în stratul de umplutură străbătut, în contracurent, Δp_u , este mai mare decât căderea de presiune în același strat de umplutură uscat, parcurs de un singur fluid, conform relației generale :

$$\Delta p_u = m_1 \cdot \Delta p \quad (5.122)$$

în care m_1 este coeficientul (amplificator) care ține seama de natura umpluturii și de parametrul de stropire S_t [77] definit de relația :

$$S_t = 3 \sqrt{\left(\frac{q_a d}{\rho}\right)^2 \frac{\varphi}{\varepsilon^3} \cdot \frac{b}{2g}} \quad (5.123)$$

în care coeficientul adimensional b se determină cu relația :

$$b = 1,748 / Re^{0,3} \quad (5.124)$$

Dacă în relația (5.111) ținem seama de relația înto $\sqrt{\eta}$ și notăm $w_p \cdot \rho = q_a$, debitul masic al apei, în $kg/a.m^2$, rezultă :

$$Re = \frac{4 q_a d}{\eta \varphi} \quad (5.125)$$

Pentru calculul coeficientului m_1 se folosesc relațiile :

- pentru inele ceramice, $d < 0,030$ m

$$m_1 = (1 - 1,65 \cdot 10^{-10} \frac{\varphi}{\varepsilon} - A)^{-3} \quad (5.126)$$

- pentru inele ceramice, $d > 0,030$ m și $A < 0,30$

$$m_1 = (1 - A)^{-3} \quad (5.127)$$

- pentru inele ceramice, $d > 0,030$ m și $A > 0,30$

$$m_1 = (1,13 - 143A)^{-3} \quad (5.128)$$

- pentru inele metalice,

$$m_1 = (1 - 1,39 A)^{-3} \quad (5.129)$$

5.6. Concluzii

1. Contactoarele de ozon reprezintă instalațiile care au rolul de a asigura contactul intim între masa apei de tratat și gazul ozonat pe durata timpului de contact, iar clasificarea lor depinde de mai mulți factori: locul pe care-l ocupă în schema de tratare a apei; modul de realizare, funcționare și asigurare a contactului între cele două faze; presiunea gazului ozonat asigurată de la generator.

2. Pornind de la criteriul/factorul presiune a gazului ozonat, în figurile 5.1...9 sînt prezentate oțeva tipuri caracteristice de contactoare de ozon.

3. Realizarea contactului între gazul ozonat și apa de tratat se asigură fie prin introducerea gazului ozonat sub formă de bule în masa de apă, fie prin introducerea apei sub formă de plăcături în atmosfera de gaz ozonat, fie combinînd cele două procedee.

4. Dizolvarea ozonului din gazul ozonat în apă este un proces de transfer de masă care, în conformitate cu teoria peliculară a lui Lewis și Withman, se desfășoară în patru etape distincte: trecerea ozonului prin faza de vapori la interfață; parcurgerea de către moleculele de ozon a filmului de gaz de la interfața celor două fluide, pe partea dinspre vapori; parcurgerea filmului lichid de la interfață; dispersia în masa de lichid.

5. Difuzia moleculară se supune legii lui Fick, iar în regim de mișcare nepermanent tridimensional, transferul de masă convectiv molecular are expresia (5.3).

6. Peste efectul transferului de masă convectiv molecular se presupune transferul turbulent, propriu mișcării bulelor de gaz în masa de apă, dar ecuația (5.9) caracterizează timpul de distribuție al concentrației.

7. Solubilitatea ozonului în apă urmează legea lui Henry (5.10) și evidențiază efectul pozitiv al micșorării volumului bulelor de gaz asupra solubilității, respectiv a transferului ozonului din faza gaz în faza lichid. Acest transfer are intensități diferite pe parcursul deplasării bulei de gaz în masa de apă.

8. Transferul de masă din bula de aer ozonat în masa de apă în regim permanent poate să se desfășoare : 1) fără reacții chimice, avînd fluxul masei de ozon definit de relația (5.16) ; 2) cu reacții chimice și viteză de reacție constantă, fluxul masei de ozon conform relației (5.23) ; 3) cu viteză de reacție variabilă, avînd fluxul masei de ozon definit de relația (5.31).

9. La transferul de masă prin difuzie molecular convectivă în regim staționar și ougere unidirecțională, pentru un curent de apă de adîncime h și viteză medie v , coeficientul global al transferului de masă k_L - relația (5.35) - depinde de v , h , coeficientul de difuzie al celor două medii fluide, coeficientul de vîscozitate cinematică al apei și de accelerația gravitațională. Cu produsele adimensionale Nusselt, Reynolds, Froude, Schmidt se formează ecuația criterială a transferului de masă - scrisă sub formele (5.40), (5.40') sau (5.40'') - .

10. Bulele de gaz ozonat se formează, în masa de apă, sub acțiunea forțelor de presiune a gazului, F_p , arhimedică F_A , de tensiune superficială F_σ și de presiune hidrostatică F_h - relația (5.42) - la trecerea printr-un orificiu.

11. Diametrul bulelor de gaz se determină cu una din relațiile (5.46), (5.48), (5.48'). Rezolvarea ultimelor două ecuații poate fi realizată pe calculator utilizînd programul de calcul al cărui algoritm este prezentat în figura 5.13. În aceste cazuri diametrul bulei de gaz este independent de valoarea debitului de gaz ozonat.

12. Presiunea p_1 a gazului ozonat necesară la intrarea în orificiul de formare al bulei, pe unitatea de suprafață, este dată de relația (5.50).

13. În baza legii lui Stokes, cînd se ține seama și de efectul vîscozității apei, în regim laminar de ougere, diametrul bulei de gaz se exprimă funcție de debitul de gaz ozonat cu una din relațiile (5.56) sau (5.57), după cum debitul de gaz ozonat este mai mic sau mai mare (peste limita formării bulelor individuale).

14. Considerînd la limită egale, valorile diametrului bulei de gaz ozonat din relațiile (5.46) și (5.59), cu relația (5.60) se determină debitul critic de gaz ozonat care delimitează regimurile de dispersie și de jet.

15. Comportarea hidrodinamică a unei bule de gaz reprezintă rezultatul interacțiunii forțelor care acționează asupra sa, fiind variabilă și complexă, și are regimul de curgere caracterizat de criteriile Reynolds, Eötvös, Weber.

16. În funcție de distanța reciprocă a bulelor de gaz (determinată de mărimea diametrului bulelor) se stabilesc relațiile pentru distanțele dintre orificiile drenajului de mare rezistență folosit ca dispozitiv de formare a bulelor de gaz ozonat.

17. La introducerea apei sub formă de picături în atmosfera de gaz ozonat transferul de masă al ozonului se apreciază în funcție de presiunea parțială a sa. Coeficientul de transfer de masă în faza lichidă k_L este dependent de coeficienții convectivi de transfer de masă în gaz k_{g0} și în lichid k_{L0} , conform relației de bilanț masic (5.74).

18. În cazul picăturilor de apă mici, care asigură eficiența procesului, debitul masic al transferului de ozon este în funcție de debitul de apă pulverizat, coeficientul de transfer de masă k_L și de concentrația de saturație a ozonului în gazul ozonat-relația (5.76).

19. Fenomenul de pulverizare al apei se bazează pe transformarea energiei de presiune în energie cinetică a jetului care, apoi, suferă procesul de divizare în picături mici, influențat de raportul dintre forțele de inerție, de impact masic, de tensiune superficială, precum și de efectele aerodinamice.

20. Cu cât diametrul particulelor de apă este mai mic cu atât suprafața lor laterală, deci suprafața de contact cu aerul ozonat, se mărește și amestecul apă-aer ozonat este mai omogen, asigurând un coeficient de transfer masic mai mare.

21. Considerând diametrul mediu al picăturilor, numărul acestora, greutatea specifică a apei, viteza de cădere a picăturilor după Stokes și mișcarea uniform accelerată a acestora, cu relația (5.82) se apreciază suprafața de contact cu aerul ozonat.

22. Prin analogia dintre mișcarea picăturilor de apă în aerul ozonat și mișcarea bulelor de aer ozonat în masa de apă se caracterizează regimurile: laminar, de tranziție și turbulent (cu domeniile de turbulență notată și rugoasă) de mișcare.

23. Caracteristicile ale materialului de umplutură, în funcție de proprietățile sale geometrice sînt: diametrul ac-

diu, funcție de volumul mediu, de suprafața medie a particulelor, de masa medie, de suprafața medie specifică, de fracțiile volumice ale particulelor ; diametrul mediu al unei sfere de volum egal sau de arie egală cu cea a particulei ; factorul de formă sau sfericitatea ; suprafața sferică a particulei ; fracția de goluri.

24. După modul în care apa străbate materialul de umplură curgerea este imersată, prin percolare sau mixtă (parțial imersată).

25. Caracteristicile curgerii sînt definite de diametrul mediu hidraulic (diametrul echivalent al umpluturii), viteza fictivă și reală prin materialul de umplură, pierderea de sarcină prin materialul de umplură, naturația efectivă.

26. Contribuțiile autorului constau în : elaborarea unei clasificări complete a contactoarelor de ozon ; explicarea și explicitarea mecanismului transferului de masă a ozonului în apa de tratat în situația introducerii gazului ozonat în masa de apă cînd viteza de reacție a ozonului cu componentii apei este nulă, constantă și variabilă, precum și în situația în care apa sub formă de picături este introdusă în aerul ozonat ; stabilirea unei ecuații (și a programului de rezolvare pe calculator) pentru calculul diametrelor bulei de gaz ozonat dispersat în masa de apă, în funcție de parametri funcționali ai contactorului ; în situația formării bulelor de gaz ozonat prin drenaje de mare rezistență, în funcție de mărimea orificiilor acestora și de mărimea bulei s-au stabilit distanțele dintre orificii, s-a stabilit o relație pentru determinarea suprafeței de contact a picăturilor de apă cu aerul ozonat în funcție debitul de apă, diametrul mediu al particulelor și caracteristicile apei și gazului ozonat ; au fost precizate regimurile de curgere a apei prin contactoarele cu umplură tip prefiltru și caracteristicile lor hidraulice.

Tabelul 6.1

Caracteristicile instalației de filtrare a aerului

Tipul filtrului	Nr. panouri	Debit de aer [m ³ /s]	v ₀ [m/s]	h [mmH ₂ O]	P ₀ [N/m ²]
A (filtru pînă oaalin)	1	0,1456	0,725	20,3	199,743
		0,1438	0,718	19,7	195,257
		0,1401	0,691	18,8	184,428
		0,1286	0,640	15,6	153,036
		0,1015	0,506	10,1	99,081
	2	0,1342	0,669	27,2	266,832
		0,1325	0,661	25,8	253,098
		0,1213	0,641	22,7	222,687
		0,1202	0,596	18,5	181,485
		0,1063	0,530	12,4	121,644
	3	0,1244	0,620	46,2	453,222
		0,1226	0,611	39,9	391,419
		0,1202	0,596	34,6	339,426
		0,1121	0,558	23,7	232,497
		0,1063	0,530	17,5	171,675
B (filtru tip 454)	1	0,1322	0,654	19,9	195,219
		0,1305	0,650	19,2	188,352
		0,1178	0,586	14,7	144,207
		0,1042	0,519	10,5	103,005
		0,0995	0,495	9,3	91,233
	2	0,1292	0,644	32,8	321,768
		0,1210	0,603	24,6	241,326
		0,1095	0,545	16,2	158,922
		0,1024	0,510	13,5	132,435
		0,0951	0,473	11,4	111,834
	3	0,1098	0,547	41,4	406,134
		0,1056	0,526	34,5	336,445
		0,1044	0,521	29,2	286,452
		0,0975	0,485	19,6	192,276
		0,0892	0,447	14,7	144,207

Tabelul 6.2.

Caracteristicile materialului filtrant

Tipul filtrului	S [m ²]	Nr. panouri	r _f [mm]	ρ _f [g/m ²]	ρ _f [kg/m ³]	δ _{panou} [mm]
A	0,204	1,2 și 3	0,225	470	376	1,25
B	0,204	1,2 și 3	0,175	840	480	1,75

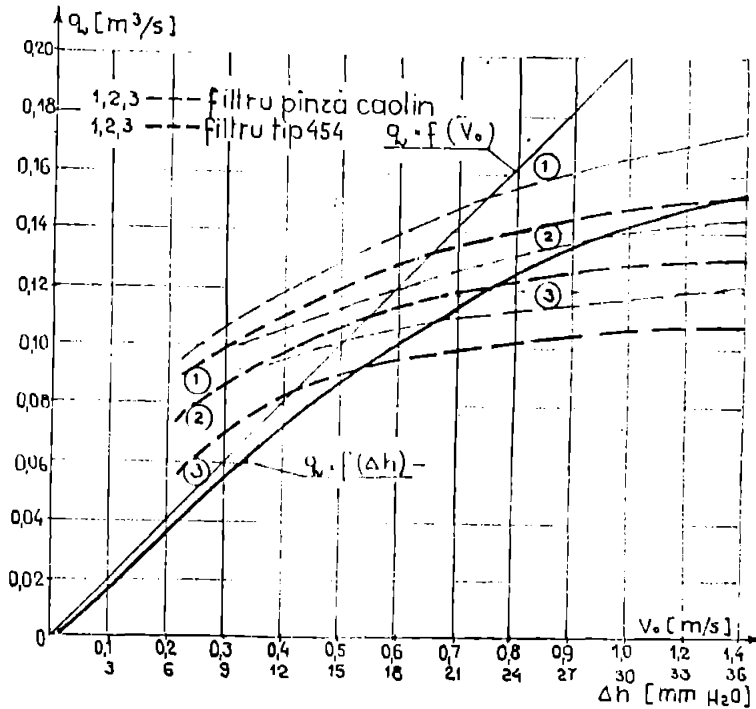


Fig. 6.2. Caracteristicile ale filtrelor din țesătură

sau:

$$C_0 = a \frac{\mu \cdot v_0}{\Delta p_0} - b \frac{1}{\Delta p_0} \quad (6.1')$$

unde $a = 4\delta g_f / r_f^2$ și $b = 1/2 \ln g_f$. Rezultatele sînt prezentate în graficele din figurile 6.3, pentru filtru tip A și respectiv 6.4, pentru filtru tip B.

6.1. Asigurarea procesului de uscare a aerului

În vederea asigurării unui aer cu conținut de umiditate cât mai mic s-a folosit instalația prezentată schematic în figura 6.5.

Apparatul de uscare a aerului aplicat constructiv este prezentat în figura 3.15 are următoarele dimensiuni geometrice: $D_0 = 6 \text{ mm}$; $D_1 = 50 \text{ mm}$; $s = 0,35 \text{ mm}$; $h = 625 \text{ mm}$, și este umplut cu silicagel românesc, avînd următoarele caracteristici de bază: granulația 5...12 mm; densitatea 160 kg/m³; porozitatea externă 41%; suprafața specifică $\rho_{sp} = 110 \text{ m}^2/\text{m}^3$ [110,2].

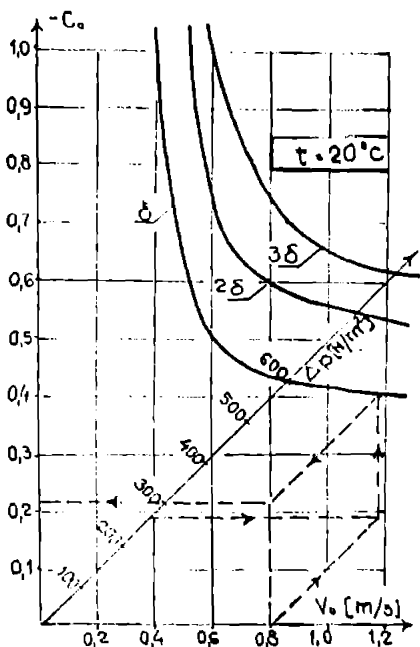


Fig.6.3. Coeficientul C_0 pentru filtru tip A

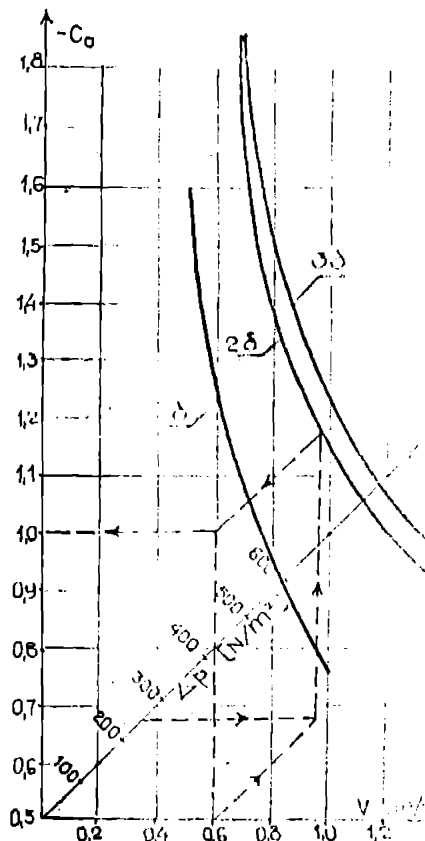


Fig.6.4. Coeficientul C_0 pentru filtru tip B

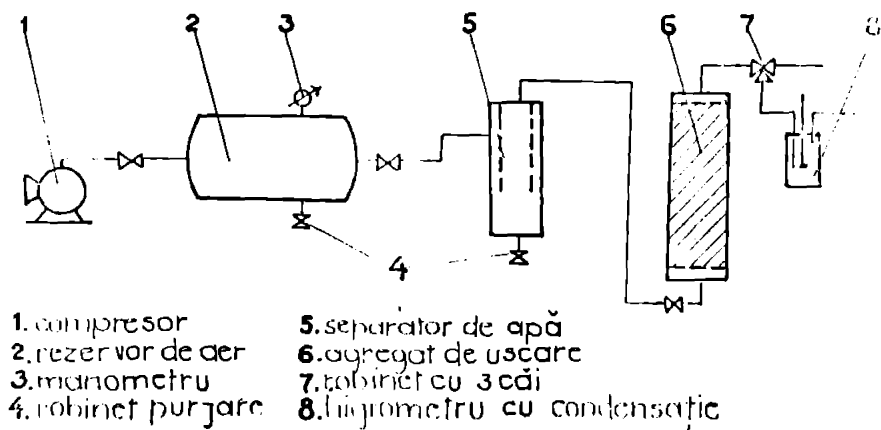
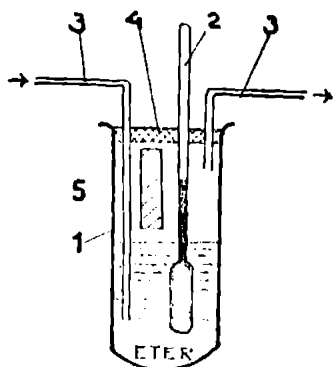


Fig.6.5. Instalație pentru uscarea aerului

Pentru determinarea punctului de rouă, t_{τ} , s-a realizat un higrometru cu condensatie având o construcție simplă, prezentată în figura 6.5.1. Prin eter se trece, foarte încet, un curent de aer.



1. eprubetă
2. termometru
3. tub din sticlă
4. dop din cauciuc
5. oglindă

Fig.6.5.1. Higrometru cu condensatie

Rezultatele măsurătorilor privind evoluția în timp a punctului de rouă a aerului trecut prin instalația din figura 6.5.1. sînt prezentate în graficul din figura 6.6.

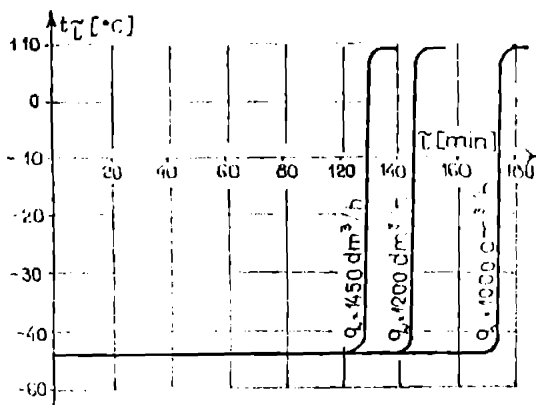
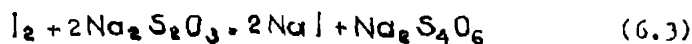
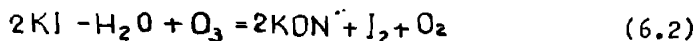


Fig.6.6. Evoluția în timp a punctului de rouă



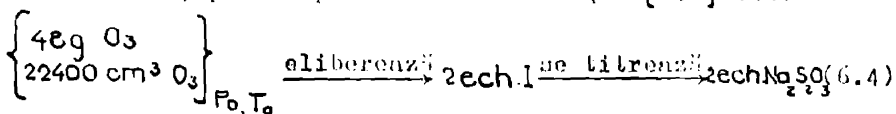
aer. Evaporarea eterului produce răcoarea și, la un moment dat, pe oglindă (și pe pereții eprubetii) se observă condensarea vaporilor de apă din eter. În acest moment s-a atins punctul de rouă (temperatura indicată de termometru este aceea în care cantitatea de vapori ajunge la saturație).

Rezultatele măsur-

6.3. Etalonarea reanimatorului de ozon

În încercările de laborator, dar mai ales în procesul tehnologic este foarte important să se cunoască concentrația ozonului din aerul ozonat. Dintre procedeele de determinare a ozonului cea mai comună este metoda iodometrică. Relațiile chimice care stau la baza metodei sînt :

Aerul ozonat, de debit cunoscut, este trecut printr-un vas de absorbție în care se găsește o soluție apoasă de iodură de potasiu. După trei minute de barbotare a soluției în acest vas se întrerupe accesul gazelor, iar conținutul de iod (iodură de potasiu) se acidulează cu o soluție 10% acid sulfuric. Iodura de potasiu se tritează cu o soluție 0,1 n tiosulfat de sodiu, în prezența amidonului ca indicator. Rezultatele calculurilor și măsurătorilor sînt centralizate în tabelul 6.3, iar în figura 6.7 sînt prezentate curbele de dependență a parametrilor de formare a aerului ozonat pentru generatorul folosit în experimentările etapei 1987. Relațiile stoechiometrice, conform (6.2) și (6.3), pentru produsele din reacție [198] sînt :



de unde:

$$\left[\begin{array}{l} 24 \text{ g } O_3 \\ 11200 \text{ cm}^3 O_3 \\ x \text{ (g } O_3) \end{array} \right] \begin{array}{l} \xrightarrow{\text{de titrare}} 10 \text{ dm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ (0,1n)} \\ \xrightarrow{\text{corespunde}} \text{Vol. } f_t \end{array} \quad (6.5)$$

în care: Vol - volumul de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (0,1n) titrat ; f_t - factorul soluției titrate,

și rezultă :

$$x \cdot \frac{24 \text{ g } O_3 \cdot \text{Vol} \cdot f_t}{10000} \quad [y \cdot O_3]$$

$$x \cdot \frac{11200 \text{ cm}^3 \text{ Vol} \cdot f_t}{10000} = 1,12 \text{ Vol} \cdot f_t \text{ [cm}^3 O_3] \quad (6.6)$$

Tabelul 6.3.

Concentrația aerului ozonat

Proba	Templuneri de lucru [V]	Temp. pet. rouă t [°C]	Debitul de aer q [dm ³ /h]	Concentr. O ₃ c, [% vol] ³
0	1	2	3	4
1	2500 (V ₁)	-48	50	0,176
2			100	0,070
3			150	0,048
4			200	0,035
5	5000 (V ₂)	-48	50	1,105
6			100	0,680
7			150	0,450
8			200	0,360

Tabelul 6.3. (continuare)

0	1	2	3	4
9			50	1,970
10			100	1,510
11	7500 (V ₃)	-48	150	1,305
12			200	1,210

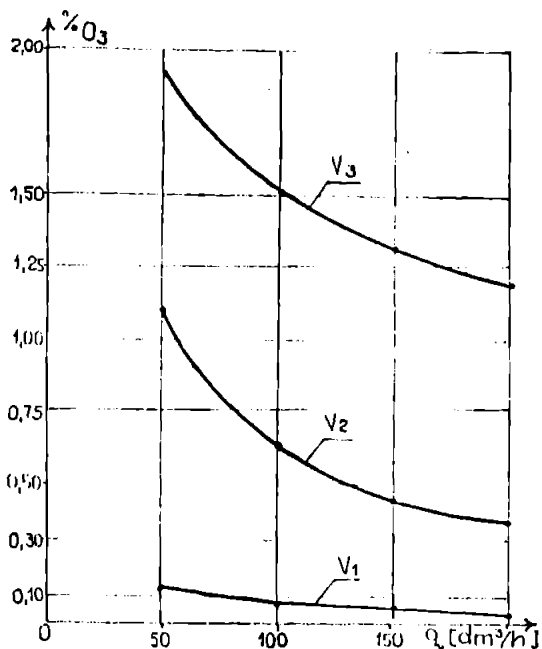


Fig. 6.7. Caracteristicile funcționale ale generatorului de ozon

Conform celor prezentate în tabelul 6.3. și figura 6.7, rezultă creșterea concentrației ozonului în aerul ozonat cu mărirea tensiunii și cu micșorarea debitului de aer.

6.4. Experimentări privind eficiența tratării apei cu ozon

Determinările experimentale privind eficiența tratării apei cu ozon au fost efectuate în trei etape: 1961, la uzina de apă nr.2 Timișoara; 1984, în cadrul laboratorului de chimia apei al I.C.P.G.A.; și

1987, la uzina de apă nr.2 Timișoara.

6.4.1. Etapa 1981

Lucrările experimentale au fost efectuate în cadrul uzinei de apă nr.2 Timișoara fără, însă, a fi încadrate în procesul tehnologic al apei. S-a folosit ca sursă de alimentare cu apă brută canalul de apă și o linie tehnologică prezentată în schema din figura 6.8. În prelucrarea datelor s-a ținut seama de caracteristicile apei brute, apei filtrate și a apei ozonizate.

Contactoarele de ozonizare au fost astfel montate încât să poată funcționa concomitent sau separat. S-au folosit un număr de

trei contactoare tip profiltru, având următoarele caracteristici de referință:

I, D = 145 mm ; H_{tr} = 1570 mm ; umplutură din Inele Rashig ;

II, D = 41 mm ; H_{tr} = 640-700-1400 mm ; umplutură din mărgelile ceramice + granulit ;

III, D = 41 mm ; H_{tr} = 1500 mm ; umplutură din granulit.

Caracteristicile materialului de umplutură folosit sînt redate în tabelul 6.4.

Caracteristicile materialului de umplutură

Tabelul 6.4

Mat. de umplutură	Vol. aparent V_t , [dm ³]	Vol. de pori V_p , [dm ³]	Porozitatea $\epsilon = V_p/V_t$	Suprafața caracteristică A_m , [cm ²]
Inele Rashig	1	0,540	0,54	0,4021
Granulit	1	0,405	0,405	0,0333
Mărgelile ceramice	1	0,375	0,375	0,0147

Suprafața caracteristică A_m a fost determinată luînd probe din puncte diferite ale masei de umplutură. Astfel, în tabelul 6.5. sînt redate calculele pentru determinarea suprafeței caracteristice a inelelor Rashig, în tabelul 6.5. pentru umplutura din granulit, iar în tabelul 6.7 pentru mărgelile ceramice (folosite uzual în industria electrotehnică ca izolatori).

Tabelul 6.5.

A_m pentru inele Rashig

Nr. crt.	A_{ext} [cm ²]	A_{int} [cm ²]	A_b [cm ²]	A_t [cm ²]
1	23,50	15,80	5,16	44,46
2	21,20	14,00	5,54	40,74
3	21,70	14,73	5,66	41,09
4	22,33	15,02	5,16	42,51
5	20,42	13,07	5,80	39,29
6	21,93	14,33	5,40	41,66
7	20,02	13,47	5,14	38,63
8	20,02	13,27	5,34	38,63
9	20,91	14,25	5,92	40,08
10	18,09	12,16	4,14	34,09

$A_m = 40,21$

Notațiile folosite în tabelele 6.5 ; 6.6 și 6.7 au următoarele semnificații : A_{ext} - suprafața cilindrică exterioară a inelului/mărgelei ; A_{int} - suprafața cilindrică interioară a ci-

Tabelul 6.6.

A_m pentru granuliți

Nr.crt.	D_{med} [cm]	A_t [cm ²]
1	1,40	6,16
2	0,63	1,23
3	1,15	4,15
4	1,28	5,15
5	1,00	3,14
6	1,10	3,80
7	0,78	1,89
8	1,15	4,15
9	0,80	1,99
10	0,76	1,81
$A_m = 3,34$		

Tabelul 6.7

A_m pentru inele ceramice

Nr.crt.	A_{ext} [cm ²]	A_{int} [cm ²]	A_b [cm ²]	A_t [cm ²]
1	0,78	0,21	0,44	1,43
2	0,69	0,18	0,45	1,32
3	0,83	0,23	0,44	1,50
4	0,74	0,19	0,51	1,44
5	0,82	0,24	0,38	1,44
6	0,85	0,23	0,44	1,52
7	0,77	0,23	0,50	1,50
8	0,78	0,21	0,44	1,43
9	0,86	0,24	0,44	1,54
10	0,77	0,15	0,52	1,44
$A_m = 1,47$				

lindrului/mărgolei ; A_b - suprafața bazelor, dedusă de grosimea pereților ; A_t - suprafața totală a materialului de umplură ; D_{med} - diametrul mediu al particulei de granuliți.

Contactoarele de ozon (conform figurii 6.8) asigură curgerea apei în contracurent cu aerul ozonat.

Pentru funcționarea instalației, în cadrul programului experimental, au fost necesare următoarele operații :

- stabilirea debitului de funcționare, Q_i ;
- determinarea dozei de sulfat de aluminiu (funcție de turbiditatea apei brute), precum și a dozei de var corespunzătoare ;
- pornirea agitatorului mecanic cu palete al camerei de reacție ;

- pornirea pompelor dozatoare de reactivi ;
- pornirea și verificarea funcționării circuitului apei de răcire a generatorului de ozon ;
- stabilirea circuitului aerului și a aerului ozonat ;
- stabilirea debitului apei filtrate care intră în fiecare contactor ;
- punerea în funcțiune a desicatorului și pornirea compresorului ;
- stabilirea/stabilizarea debitului de aer care trece prin generatorul de ozon ;
- pornirea și fixarea parametrilor (tensiune și intensitate a curentului electric) generatorului de ozon (de la zero la valoarea de lucru) ;
- determinarea concentrației ozonului în gazul ozonat ;
- controlul permanent al bunei funcționări a instalațiilor concomitent se procedează la :
 - prelevarea probelor de apă ;
 - analiza probelor de apă ;
 - prelucrarea datelor.

Modul de realizare a programului experimental este dat în tabelul 6.8.

Tabelul 6.8.

Program experimental (etapa 1981)

Nr. crt.	Contactor	R e g i m		Analize ale apei
		funcțional	de lucru	
1	I	percolare*	1 2 (2 măsurători)	fizico-chimice (partiale)
2	I	percolare	1 2 3	fizico-chimice și biologice
3	II	percolare	1 2 3	Idem
4	III	percolare	1 2 3	Idem
5	II	1/2 percolare (granulit) și 1/2 imersat (mărgele ceramice)	1 (3 măsurători)	Idem
6	II	imersat	1 (2 măsurători)	Idem
7	I	imersat	1 (2 măsurători)	

*Apa brută nu a fost tratată cu reactivi.

Pentru determinarea vitezei de percolare în contactoare materialul de umplutură a fost saturat cu apă (situație caracteristică funcționării normale), apoi s-a determinat timpul în care apa străbate coloana de umplutură :

a) vizual, prin observarea jetului de apă în camera colectoare a contactorului , și

b) chimic, cronometrând timpul de la picurarea de HCl în jetul apei de alimentare și încercarea colorării soluției indicatoare UNISOL 410 la evacuarea din camera colectoare a contactorului.

Prin ambele metode s-au obținut aceleași rezultate, conform tabelului 6.9.

Tabelul 6.9.

Determinarea vitezei de percolare

Contactator	H _J [m]	Q [dm ³ /s]	Viteza de cădere liberă [m/s]	Timp de percolare t _p [sec]	Viteza de percolare v _p [m/s]
I	1,57	0,00710	5,56	20	0,0785
		0,02143		15	0,1046
		0,00930		18	0,0873
		0,03300		12	0,1300
II	1,40	0,00870	5,20	29	0,0473
		0,01240		21	0,0653
		0,04824		13	0,1053
III	1,50	0,0094	5,42	18	0,0834
		0,01964		14	0,1071
		0,05140		11,3	0,1328

Datele din tabelul 6.9 au fost determinate numai pentru curgerea apei, fără ca să fie influențate de curgerea în contracurent a aerului ozonat.

Graficul din figura 6.9 arată variația vitezei de percolare funcție de debitul apei prelinx prin materialul de umplutură.

Timpul de curgere al apei prin contactor reprezintă și timpul de contact dintre influent(apa de tratat) și aerul ozonat. În cazul curgerii încrucșate timpul de curgere(timpul de contact) se stabilește teoretic:

a) considerând volumul de apă (ce poate fi calculat/stabilit) și debitul de apă, Q_a, care se măsorează ;

$$t \cdot V_g / Q_a \quad (6.7)$$

Volumul de apă este egal cu volumul golurilor (V_g) din

materialelor de umplutură, poate fi stabilit în funcție de porozitatea:

$$t \cdot \frac{\epsilon \cdot V_t}{Q_a} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot H_0 \cdot D^2}{4 \cdot Q_a} \quad (6.8)$$

b) considerînd viteza reală v_p de curgere a apelor în cea mai strîmtă a coloanei:

$$t = H_0 / v_p \quad (6.9)$$

Viteza reală se determină cu relația :

$$v_p = \frac{H_0}{Q_a / S_L \epsilon} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot H_0 \cdot D^2}{4 \cdot Q_a} \quad (6.10)$$

în care H_0 reprezintă suprafața liberă a secțiunii transversale.

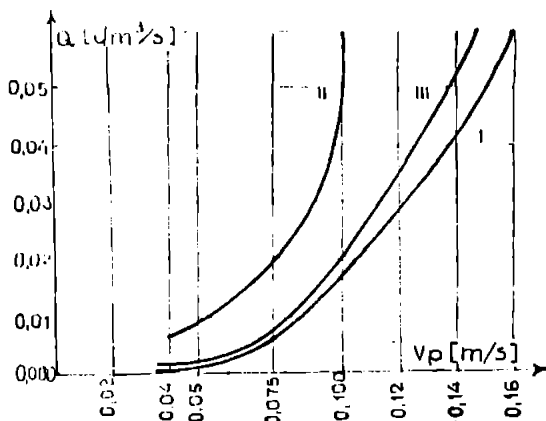


Fig. 6.9. Dependența $v_p - Q$

Deci ambele metode conduc la același rezultat.

Pentru coloane structurate multiple de tururi $H_{II}, H_{III}, H_{IV}, \dots$ obține timpul de contact prin însumarea timpilor parțiali, $t = t_{II} + t_{III} + \dots$

La curgerea deșeurilor parțial prin percolare parțial imersată, se va considera timpul de contact caracteristicii fiecărei porțiuni, și se însumează pentru stabilirea

timpului de contact total.

Rezultatele măsurătorilor sunt date tabelar. În tabelul 6.10 sunt prezentate rezultatele încercării nr.1 (care poate să fie vădită ca un studiu al preozonizării), iar în tabelul 6.11 rezultatele celorlalte încercări.

Tabelul 6.10

Rezultate experimentale încercarea 1 (etapa I 1981)

Order nr.	Q_{II} [dm ³ /s]	q [dm ³ /h]	c [mg/dm ³]	d [mg/dm ³]	t [sec]	$\beta = d \cdot t$	Δt [min]	Tipul curgerii
1	2	3	4	5	6	7	8	
	0,220	0,131	3,68	18	106,24	10	percolare	
	0,220	0,131	3,68	18	106,24	15	percolare	

Tabelul 6.10 (continuare)

Sursele probei		Caracteristicile apei				Apă ozonată			Eficiența (%)
pH	O ₂	S.O. ₂ [mg/dm ³]	Apă filtrată			Apă ozonată			
			pH	O ₂	S.O. ₂ [mg/dm ³]	pH	O ₂	S.O. ₂ [mg/dm ³]	
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
7,8	30	10,96	7,8	14	10,65	7,8	15	8,15	33,93
7,8	30	10,96	7,8	12	9,77	7,8	14	7,43	33,93

Notatiile folosite în tabel: Q_n - debitul apei de tratat; q - debitul de aer ozonat; c - concentrația ozonului în gazul ozonat; d - doza de ozon; t - timpul de contact; Δt - intervalul de timp necesar la recoltarea probei de la începutul procesului de ozonizare, respectiv de la recoltarea anterioară; \mathcal{T} - turbiditatea; S.O. - conținutul de substanțe organice.

6.4.1.1. Interpretarea rezultatelor

În urma determinărilor efectuate a rezultat că ozonizarea are o influență mică asupra pH-ului apei.

Influența acțiunii ozonului, în procesul de ozonizare, asupra turbidității, este remarcabilă. Astfel, în încercarea nr.1 (pre-ozonizare) eficiența a fost de 53,33% ... 60%. În regim de percolare, la contactorul cu umplutură din inele Rashig (I), cu toate că după filtrare a rezultat o apă curată (10^6 S.O₂), turbiditatea a scăzut, având o eficiență de 40%. În același regim, la contactoarele II și III eficiența referitoare la turbiditate a fost de 100%. La acest rezultat este posibil să fi contribuit și materialul de umplutură care a avut și rol de material filtrant. La curgerea imersată și semiimmersată eficiențele asupra turbidității au fost mai mici, de 40% ... 33,93%.

Analizele de determinare a substanțelor organice conținute în apă, cu diferite stadii ale procesului de tratare, au avut efectul numai cantitativ nu și calitativ. Eficiența reducerii substanțelor organice variază în limite relativ largi, funcție de tipul contactorului, doză și timp de contact. Creșterea eficienței la același regim (d, t) pentru probe recoltate în intervale de timp diferite se explică prin acțiunea ozonului dizolvat în apă (remanent), conform diagramei din figura 6.10.

Efectul ozonizării asupra amoniacului (totali sau percolant) nu au fost edificatorii deoarece influența sa încadrată în limitele calitative standardizate.

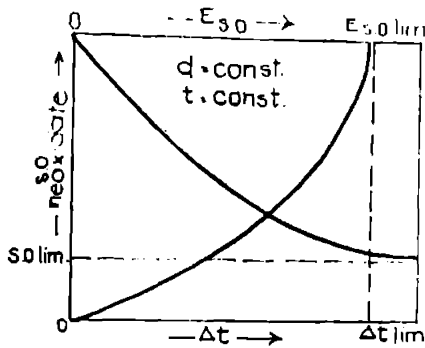


Fig.6.10. Dependenta $E_{Si.O} - \Delta t$

Determinarea clorurilor a evidențiat faptul că acestea cresc după filtrare față de cea brută, fapt explicabil prin calitatea apelor de alimentare a filtrului - apă tratată, cu clor rezidual $0,2 \text{ mg/dm}^3$. Prin ozonare clorurile din apă se reduc puțin, fiind la 18%. S-a observat că reducerea clorurilor este mai pronunțată

la contactoarele funcționând prin percolare.

Reducerea amoniacului din influent prin ozonizare este un fapt cert. La percolare reducerea amoniacului este totală (100%); la percolare-imersie eficiența este de 70...80% ; la imersie pentru contactorul II eficiența este de 46,66...53,33% , iar pentru contactorul I de 66,66%, toate în condițiile de experimentare date. În figura 6.11 se prezintă efectul ozonizării asupra amoniacului.

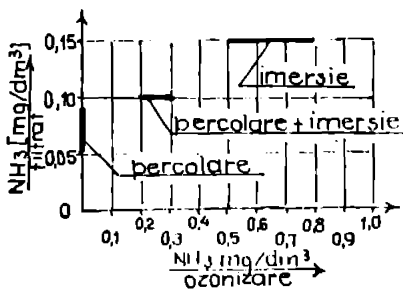


Fig.6.11. Efectul ozonizării asupra NH_3

folosite în experimentări.

Pentru perioada de contact utilizată ozonul nu are efect asupra azotatilor.

Considerând cantitatea de ozon care contribuie la reducerea NH_3 prin complexul (Q.d. 1) se observă că la curgerea în sensul contactorului II se comportă mai bine decât contactorul I.

Ozonul reduce integral (100%) azotitii din influent, în toate regimurile și pentru toate tipurile de contactoa-

Efectul ozonizării asupra durității apei (totală sau permanentă) nu au fost edificator deoarece influența s-a încadrat în limitele calitative standardizate.

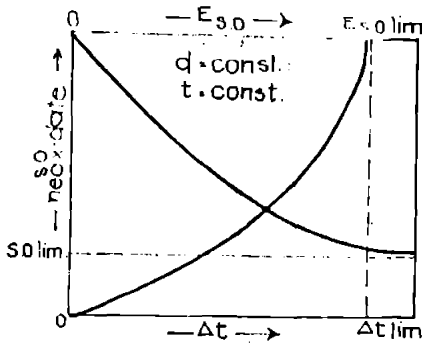


Fig. 6.10. Dependenta $E_{S,O} - \Delta t$

la contactoarele funcționând prin percolare.

Reducerea amoniacului din influent prin ozonizare este un fapt cert. La percolare reducerea amoniacului este totală (100%); la percolare-imersie eficiența este de 70...80% ; la imersie pentru contactorul II eficiența este de 46,66...53,33% , iar pentru contactorul I de 66,66%, toate în condițiile de experimentare date. În figura 6.11 se prezintă efectul ozonării asupra amoniacului.

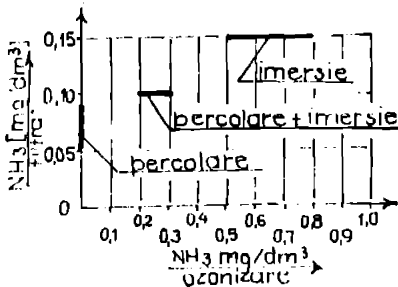


Fig. 6.11. Efectul ozonării asupra NH_3

re folosite în experimentări.

Pentru perioada de contact asigurată ozonul nu are efect asupra azotaților.

Determinarea clorurilor a evidențiat faptul că concentrația crește după filtrare față de apă brută, fapt explicabil prin calitatea apei de spălare a filtrului - apă tratată, cu clor rezidual $0,5 \text{ mg/dm}^3$. Prin ozonare clorurile din apă se reduc puțin, până la 18%. S-a observat că reducerea clorurilor este mai pronunțată

Considerând cantitatea de ozon care contribuie la reducerea NH_3 prin complexul (Q.d.t) se observă că la curgerea imersivă contactorul II se comportă mai bine decât contactorul I.

Ozonul reduce integral (100%) azotitii din influent, în toate regimurile și pentru toate tipurile de contactoare

În funcție de mărimea dozei de ozon utilizată, reducerea fierului din apă are o eficiență de 87,5%...100%, evidențiindu-se randamentul mai mare la curgerea prin percolare, iar la curgerea imersată comportarea mai bună a contactorului II.

Prin ozonizare se mărește cantitatea de oxigen din apă. Acest efect este mai pronunțat la curgerea imersată. Procesul depinde de doza de ozon, timpul de contact nu are o influență hotărâtoare.

În procesul de ozonizare alcalinitatea se reduce puțin, cu 6,6%...9%, fapt pentru care se consideră ca un proces secundar al procesului.

Din punct de vedere bacteriologic eficiența ozonizării este remarcabilă, cu toate că timpul de contact a fost mic față de condițiile uzinale. Pentru condițiile date, față de apa filtrată, eficiența reducerii bacililor coliformi a fost de 82,3%...99,45%, iar eficiența reducerii germeilor la 37°C de 66,70%...96,90%. În ceea ce privește eficiența întregului proces - față de apa cursului Bega - eficiența reducerii bacililor coliformi a fost de 99,93%...99,987%, iar a germeilor la 37°C de 94,95%...99,85%.

În urma procesului de tratare care conține treapta de ozonizare apa a dobândit o culoare cristalină specifică, iar gustul și mirosul au dispărut complet.

6.4.2. Etapa 1984

Determinările cantitative și calitative efectuate pe instalația de laborator a atelierului ICPCA de alimentări cu apă, prezentat schematic în figura 6.12, sînt prezentate în tabelul 6.12.

Contactorul de ozon funcționînd în contracurent difuzază aerul ozonat printr-un material poros (tubular) și are marcate punctele de recoltare a probelor de apă (1,2,3,4), conform figurii 6.13.

Determinările au fost efectuate pe două categorii de apă brută: - apă de Dunăre, recoltată la Oltenița, (A);
- apă din râul Tismana, recoltată aval de localitatea Tismana (B).

Contactorul de ozon este realizat dintr-un cilindru de sticlă, avînd diametrul interior de 58 mm.

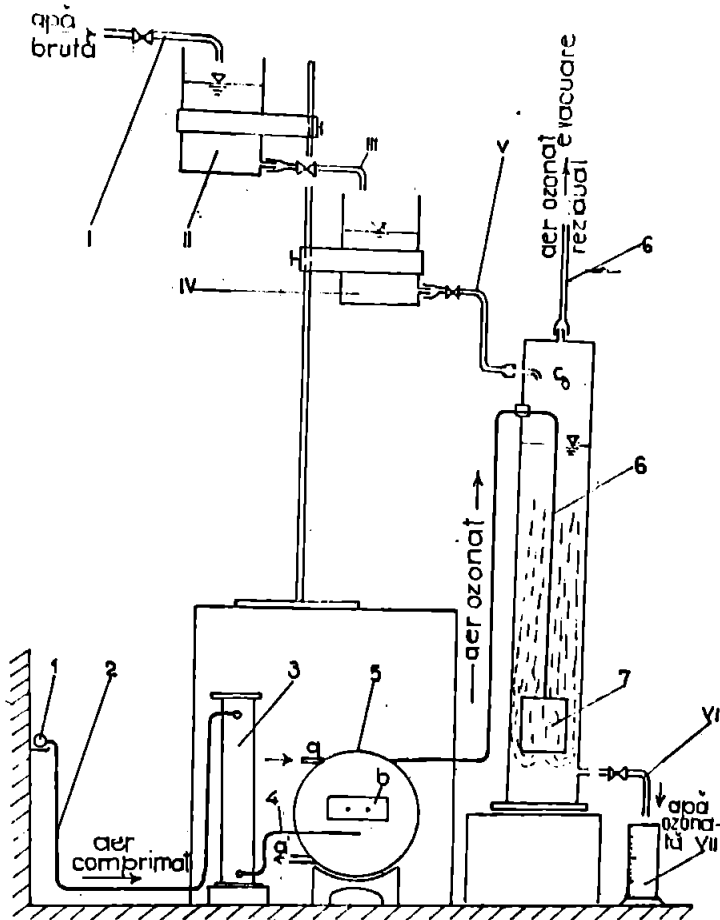


Fig.6.12. Schema stand ozonizare ICPGA Duouregti

I - conductă alimentare apă brută ; II - vas intermediar ; III - tub legătură apă brută ; IV - vas nivel constant, V - alimentare cu apă a contactorului, VI- evacuare apă ozonată, VII- vas colector gradat, C- contactor de ozon, 1 - conductă distribuție aer comprimat, 2 - legătură aer comprimat, 3 - uscător aer, 4 - conductă aer uscat, 5 - generator de ozon, 6 - conductă aer ozonat, 7-pulverizator cilindric din material poros; a,a' - sistem de răcire cu apă a generatorului de ozon, b - sistem de alimentare cu energie electrică.

Experimentările au urmat să evidențieze efectul ozonului asupra apei brute, simulând procesul tehnologic al preozonării.

Caracteristicile funcționale ale instalației și rezultatele măsurătorilor sînt trecute în tabelul 6.12.

Variația parametrilor apei sub efectul tratării cu ozon este prezentată grafic în figura 6.14.

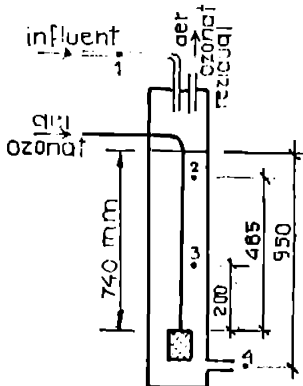


Fig.6.13. Contactor de ozon de laborator

6.4.2.1. Interpretarea rezultatelor

Este de remarcant influența preozonării în procesul limpezirii apei.

Astfel, din analize a rezultat, după tratarea cu ozon a apei brute a crescut

re a turbidității atât pentru apa de Dunăre cât și pentru cea de Tismana datorită fenomenului de microfloculare produs de ozon.

În urma procesului de tratare cu ozon a apelor brute care în prealabil nu au fost supuse unui proces de înmuiere, realizându-se astfel preozonarea apei brute, s-a constatat o creștere a conținutului de substanțe organice. Acest fapt se datorează conținutului inițial de S.O. relativ mare, dar mai ales acțiunii ozonului care a rupt legăturile moleculare a substanțelor organice cu structură complexă conținute în apă. Pentru apa de Dunăre, după cum se observă în fig.

6.14., s-a evidențiat și tendința de reducere a substanțelor organice, aspectul decedent al curbei S.O., ilustrînd acest lucru.

Variația foarte mică a pH-ului apei brute tratate cu ozon

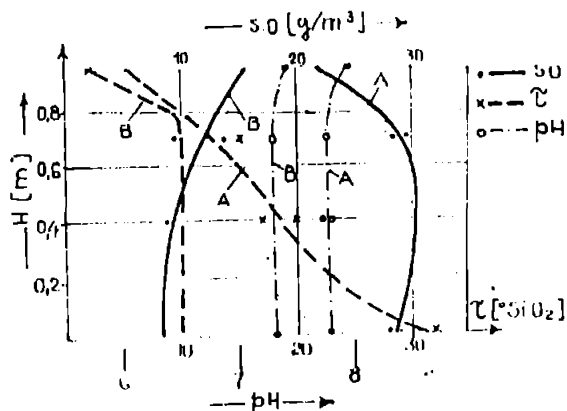


Fig. 6.14. Preozonizare - variația parametrilor pe înălțime

Tabelul 6.12

Rezultate experimentale etapa-1984

Regim de lucru - Caracteristici	P r o b a							
	Punct de recoltare				Punct de recoltare			
	1	2	3	4	1	2	3	4
a) instalație	APA DUNARE - OLTEANITA							
Q, m ³ /h	0,009				0,009			
v, m/h	3,408				3,408			
q, m ³ /h	0,08				0,08			
c, gO ₃ /m ³ aer	0,276				0,276			
d, gO ₃ /m ³ apă	2,45				2,45			
t _c , min	17				17			
β = d · t _c b) apă	41,65				41,65			
T _{0,5} O ₂	5	12	20	30	5	10	17	30
S.O., g/m ³	21,17	30,20	30,95	29,24	21,17	28,44	30,02	28,12
pH	7,95	7,75	7,80	7,75	7,95	7,80	7,75	7,80
Obs.	La suprafața apei s-a format spumă datorită substanțelor proteice conținute în apă.							
a) instalație	APA TISMANA - aval TISMANA							
Q, m ³ /h	0,015				0,015			
v, m/h	5,68				5,68			
q, m ³ /h	0,134				0,134			
c, gO ₃ /m ³ aer	0,326				0,326			
d, gO ₃ /m ³ apă	2,91				2,91			
t _c , min	10				10			
β = d · t _c b) apă	29,1				29,1			
T _{0,5} O ₂	2	10	10	10	2	10	10	10
S.O., g/m ³	15,8	13,58	10,4	8,21	15,8	9,16	8,53	7,9
pH	7,8	7,6	7,6	7,6	7,8	7,6	7,6	7,6

și valoarea aproximativ constantă a sa, după parcurgerea a 255 cm, pe verticală, în contactor, evidențiază pentru preozonizare o tendință de micșorare a pH-ului, apei de cea 3%.

6.4.3. Etapa 1987

Pe un contactor de ozon tip prefiltru, cu circulația apei și aerului ozonat în contracurent, având inele Rashig cu material de umplură, s-au efectuat mai multe determinări, considerând mai multe regimuri funcționale pentru apă: imersie, imersie parțială și percolare). Rezultatele medii obținute sunt prezentate centralizat în tabelul 6.13.

Instalația folosită este prezentată schematic în figura 6.15.

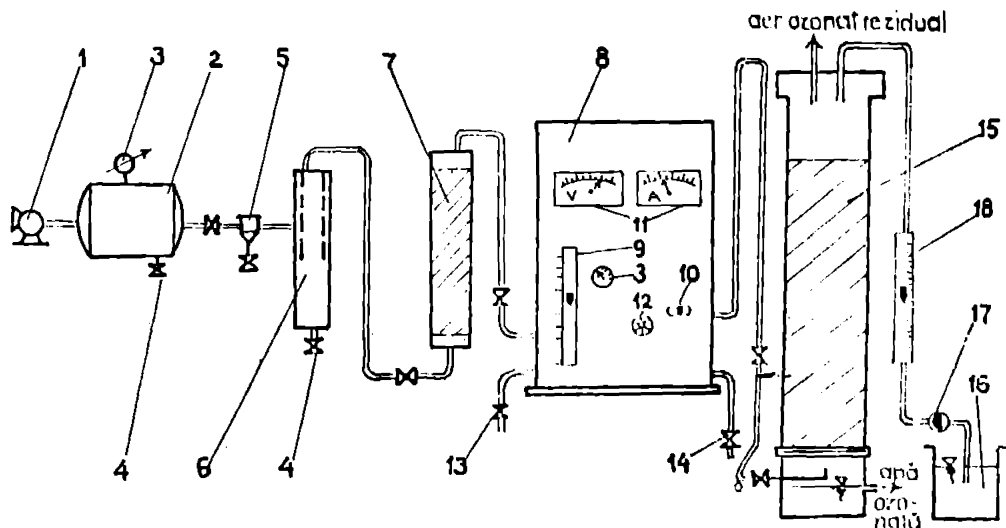


Fig.6.15. Schema funcțională a instalației experimentale-etape 1987

1 - compresor; 2 - rezervor aer comprimat; 3 - manometru; 4 - robinet purtare; 5 - filtru ulei; 6 - separator ciclon aer apă; 7 - agregat de uscare a aerului cu silicagel; 8 - generator de ozon; 9 - rotametrul pentru aer; 10 - contact general; 11 - indicator care caracterizează curentul ozonizat; 12 - buton resetare parametrii electricei; 13 - intrare apă de răcire; 14 - ieșire apă de răcire; 15 - contactor de ozon; 16 - rezervor apă de ozonizat; 17 - pompă; 18 - rotametrul apă.

Apă de ozonizat a fost furnizată după decantorul respectiv, filtrul stării pilot din cadrul unității de apă nr.2. Timișoara.

Pentru a menține aerul uscat, după cea 2 ore de funcționare a instalației, siliciozii și alți compuși de aer se scot din capacitatea de adsorbție).

Concentrația ozonului în aerul ozonat a fost asigurată prin reglarea debitului de aer concomitent cu modificarea parametrilor curentului electric.

Au fost efectuate mai multe determinări și pe apa tratată în cadrul uzinei nr.2. Timișoara, în perioada când turbiditatea apei brute (curs Bega) era relativ mare (peste $100^{\circ}S_1O_2$). În toate cazurile s-au îmbunătățit esențial parametrii organoleptici (gust și miros) și s-a obținut o culoare cristalină caracteristică pentru apa ozonată.

6.4.3.1. Interpretarea rezultatelor

Variația eficienței reducerii turbidității apei datorită procesului de ozonizare, la curgerea ȋmersată, parțial ȋmersată și prin percolare, în situațiile influent decontat și filtrat, este prezentată grafic în figura 6.16.

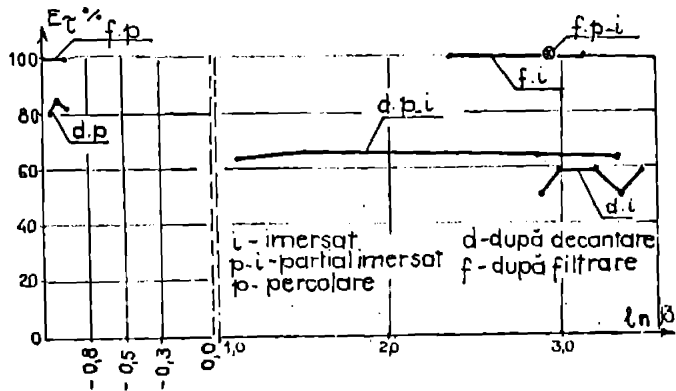


Fig.6.16. Variația eficienței reducerii turbidității

Pentru curgerea ȋmersată variația eficienței reducerii conținutului de substanțe organice este prezentată în figura 6.17 în funcție de parametrul β al ozonizării (produsul între doză și timpul de contact). În cazul curgerii parțial ȋmersate a apei filtrate (ȋmersie pe o înălțime de 0,8 m și percolare pe 1,0m), eficiența reducerii S.O., pentru parametrul β = 18,58, a fost

REZULTATE EXPERIMENTALE - ETAPA 1907

tabelul 6.10

Proba	curge-rea oper in cont.	Q	v	q	c	d	t	β -d.t	apa de analizat	$\% O_3$ s ₂	$\% O_3$ d ₁	pH	S.O KMnO ₄ mg/l	sumit. tot. °Ge	alcali. fenoli mg/dm ³	fier	
		dm ³ /h	m/h	m ³ /h	mg/cm ³	mg/dm ³	min			%	%					mg/dm ³	mg/dm ³
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Beaa	60	5	7,6	12,6	3,64	0,009	0,92	
1	imersat	195	11,76	1300	0,271	1,8	10	-	secant.	12	5	7,4	12,4	3,81	0,008	0,2	
2	"	195	11,76	1400	0,278	2,0	10	16	ozonata	6	0	7,6	7,5	3,92	0	0,2	
3	"	195	11,76	1735	3,252	2,5	10	25	"	5	0	7,6	4,2	3,90	0	0	
4	"	195	11,76	1980	0,205	2,9	10	29	"	5	0	7,6	3,9	3,90	0	0	
5	"	195	11,76	2100	0,292	3,2	10	32	"	6	0	7,6	2,1	3,92	0	0	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Beaa	72	5	7,6	17,2	3,35	0,010	1,06	
6	imersat	210	16,46	2030	0,202	1,52	7	-	filtrata	15	1	7,4	8,7	4,10	0,009	0,05	
7	"	195	11,76	1425	0,203	1,52	10	10,64	ozonata	0	0	7,45	9,8	4,2	0	0,05	
8	"	160	9,80	1130	0,210	1,52	12	15,2	"	0	0	7,4	3,5	4,2	0	0	
9	"	130	7,68	860	0,224	1,52	15	18,24	"	0	0	7,4	3,2	4,1	0	0	
-	-	-	-	-	-	-	-	22,80	Beaa	68	10	7,6	17,7	4,2	0	0	
10	partial imersat (0,8 m)	165	10	1350	0,210	1,72	10,8	-	filtrata	10	1	7,2	9,2	3,7	0,009	0,0	
11	"	165	10	1360	0,210	1,72	10,8	12,58	ozonata	0	0	7,3	2,15	3,75	0	0	
12	"	165	10	1350	0,210	1,72	10,8	13,51	"	0	0	7,35	2,29	3,72	0	0	
13	"	165	10	1350	0,210	1,72	10,8	16,52	"	0	0	7,35	2,33	3,74	0	0	

tabelul 6.13 (continuare)

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
									Bega	62	9	7,6	16,5	3,2	1,5	0,009	0,95
14	partial	300	18,0	1500	0,245	1,225	2,5	3,1	decantată	11	9	7,4	9,6	3,2	1,5	0,0085	0,9
15	mersat	250	15,0	1500	0,245	1,410	3,0	4,4	ozonată	4	0	7,2	5,7	3,1	1,4	0	urme
16	(0,75m)	125	7,5	1500	0,245	2,94	6,0	17,6	"	3,95	0	7,3	4,9	3,15	1,4	0	urme
17		95	5,6	1500	0,245	3,07	7,2	27,9	"	4	0	7,2	2,8	3,1	1,4	0	0
									Bega	4,6	10	7,6	13,6	3,7	1,6	0,006	0,75
18	percolare	120	5,62·10 ⁻²	1000	0,250	2,08	0,187	0,39	decantată	7,5	10	7,4	11,3	3,9	1,6	0,0055	0,02
19		120	5,62·10 ⁻²	1100	0,221	2,02	0,198	0,40	"	1,5	0	7,3	7,6	3,8	1,5	0	urme
20		120	5,62·10 ⁻²	1200	0,213	2,13	0,215	0,46	"	1,2	0	7,3	7,5	3,8	1,5	0	0
21		120	5,62·10 ⁻²	1250	0,208	2,17	0,229	0,50	"	1,3	0	7,2	7,4	3,8	1,5	0	0
									Bega	50	10	7,2	7,3	3,8	1,5	0	0
22	percolare	110	2,9·10 ⁻²	950	0,262	2,16	0,176	0,38	filtrată	15	5	7,2	12,1	3,40	1,1	0,0055	0,02
23		125	5,9·10 ⁻²	950	0,262	1,99	0,205	0,41	ozonată	0	0	7,3	8,1	3,20	1,0	0	0
24		140	8,1·10 ⁻²	950	0,262	1,78	0,236	0,42	"	0	0	7,3	8,0	3,15	0,9	0	0
25		165	10,8·10 ⁻²	950	0,262	1,51	0,254	0,40	"	0	0	7,4	7,8	3,20	1,0	0	0
											0	7,3	8,05	3,10	0,95	0	urme

de 76,28% . Pentru același regim de curgere parțial imersat (0,75m) și apă decantată, variația eficienței reducerii S.O. în funcție de parametrul β al ozonizării este prezentată în figura 6.18.

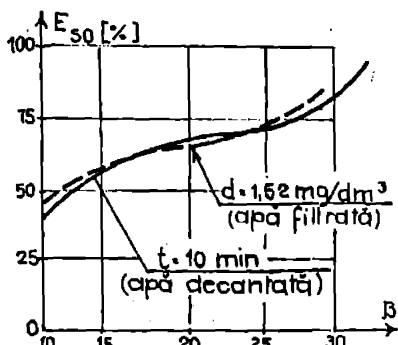


Fig.6.17. Variația reducerii S.O. funcție de β - curgere imersată

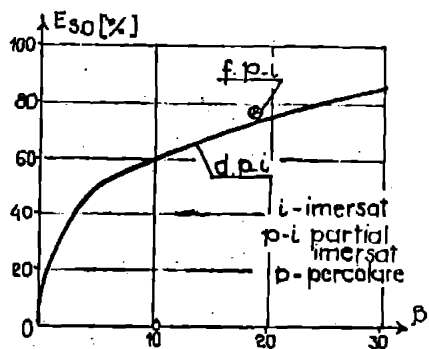


Fig.6.18. Variația reducerii S.O. funcție de β - curgere parțial-imersată

La curgerea prin percolare variația reducerii S.O. în funcție de parametrul ozonizării β este redată în figura 6.19.

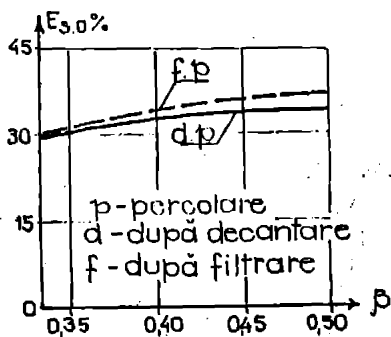


Fig.6.19. Variația reducerii S.O. funcție de β - curgere prin percolare

Este de semnalat eficiența ozonizării asupra reducerii fenolilor și fierului din apa tratată de 100%, care constituie un element favorabil în alegerea ozonului ca agent oxidant pentru apa de tratat.

6.5. Pierderile de sarcină în contactorul tip prefiltru

Contactorul de studiu tip prefiltru, are caracteristicile geometrice și funcționale prezentate în figura 6.20. Curgerea apei și a gazului ozonat este realizată în contracurent. Considerând diferite valori pentru debitul de apă și de aer ozonat s-au măsurat pierderile de sarcină, pentru umplutură cu inele Rashig, ale căror valori sînt trecute în tabelul 6.14.

Se observă că practic pentru un anumit regim de funcționare al contactorului pierderile de sarcină Δh variază liniar pe înăl-

time. Atunci coeficientul unitar al pierderilor de sarcină liniare, K în mm/m, are expresia:

$$K = \frac{\Delta h_v - \Delta h_r}{\Delta H_{V-I}} \quad (6.11)$$

unde: $\Delta H_{V-I} = 1,740 - 0,440 = 1,300$ m.

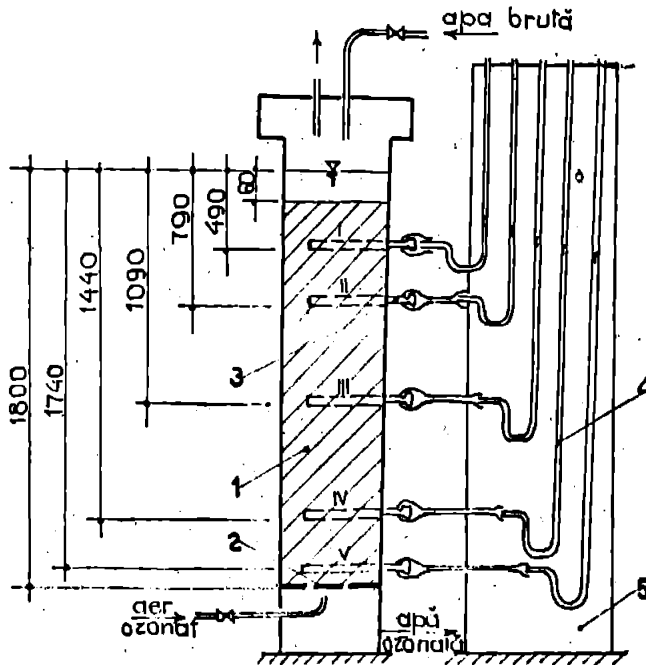


Fig.6.20. Contactor de studiu tip prefiltru
 1 - inele Raschig; 2 - suport drenant; 3 - sondă; 4 - piezometru simplu cu apă; 5 - panou piezometre I...V - numărul sondei.

Folosind relația(6.11) se construiește diagrama din figura 6.21.

Coeficientul unitar al pierderilor de sarcină crește cu mărirea debitului de apă al contactorului. La percolare pierderile de sarcină unitare sînt mai mici decît la curgerea imersată. Domeniul de variație al lui K este mai mic la curgerea prin percolare decît la cea imersată.

Tabelul 6.14

Pierderi de sarcină în contactorul de studiu

Debit de aer ozonat q [dm ³ /h]	Debit de apă Q [dm ³ /h]	$\Delta h, [mm]H_2O$				
		h_I	h_{II}	h_{III}	h_{IV}	h_V
600 (imersie)	50	3,8	4,7	6,2	7,5	9,0
	100	4,0	5,3	6,5	8,4	9,5
	150	4,2	5,7	6,7	9,0	10,3
	200	4,5	6,0	7,8	9,8	11,0
800 (imersie)	50	4,2	5,7	7,3	9,4	11,2
	100	4,6	6,1	7,6	10,2	11,7
	150	4,9	6,4	8,1	10,8	12,4
	200	5,1	7,0	9,1	11,6	13,2
1400 (imersie)	50	6,3	8,3	10,5	15,2	18,0
	100	6,5	8,8	11,0	15,5	18,5
	150	6,7	9,6	12,8	16,3	18,9
	200	7,0	10,0	13,2	17,0	19,5
600 (percolare)	50	0,5	1,2	1,9	2,8	3,0
	100	0,8	1,5	4,0	6,1	6,8
	200	1,0	1,9	4,7	6,8	8,0
1400 (percolare)	50	0,8	1,5	2,8	4,1	5,0
	100	2,8	5,1	6,0	7,8	9,0
	200	3,9	5,5	7,6	10,0	11,0

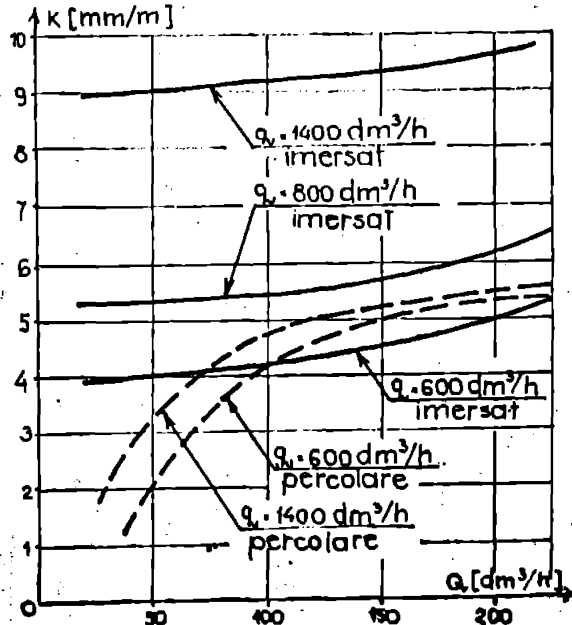


Fig. 6.21. Variația coeficientului unitar al pierderilor în funcție de debitul de apă Q, pentru

6.6. Concluzii

1. Comportarea filtrelor din țesături este bună. Manipularea și întreținerea lor nu comportă probleme deosebite. Rezistențele aeraulice sînt acceptabile. Prezintă siguranță în exploatare.

2. Silicagelul românesc are o comportare foarte bună în uscarea aerului.

3. În schema instalației pentru uscarea aerului, după comprimare se impune utilizarea filtrului de ulei, iar după rezervorul de aer comprimat este bine să se prevadă un separator de apă; în acest mod randamentul întregii instalații crește.

4. Pentru determinarea punctului de rouă, parametru care trebuie urmărit pe tot parcursul funcționării instalației de producere a ozonului, în cazul instalațiilor industriale, este necesar a se folosi aparatul specializat, cu funcționare simplă, eficientă, sigură și precisă.

5. Etalonarea producției generatoarelor de ozon este obligatorie cînd nu este dată de firme producătoare, iar cînd este dată trebuie să fie verificată în condițiile concrete de funcționare.

6. În uzinaj etalonarea are caracter orientativ, concentrația în ozon a gazului/aerului ozonat trebuie determinată sistematic.

7. Metoda de determinare iodometrică a concentrației ozonului în aerul/gazul ozonat, sigură și precisă, este bine ca în procesele industriale, să fie înlocuită de o metodă mai eficientă (ca timp de determinare) care, eventual, să aibe posibilitatea înregistrării determinărilor.

8. Tratarea cu ozon a apei dă rezultate bune atît în cazul preozonării cît și în cel al ozonării.

9. La debite mici de apă vitezele de percolare sînt mici din cauza forțelor de tensiune superficială. Viteza de percolare totodată, crește cu porozitatea externă a materialului de umplură, și scade cu mărirea debitului de aer ozonat care curge în contracurent.

10. Dispozitivul de introducere a aerului ozonat în contactor (suport drenant, tuburi poroase, etc), are un rol deosebit fiind responsabil de uniformitatea introducerii aerului ozonat cît și de mărirea bulelor de gaz realizate.

11. Forma și dimensiunile geometrice (precum și natura materialului) ale materialului de umplură - în cazul contactoarelor tip prefiltru - influențează esențial circulația celor două faze lichidă și gazoasă.

12. Efectele ozonării au fost remarcabile în cazul substanțelor organice, turbidității, fierului, fenolilor, amoniacului, azoților, bacililor și germenilor și a avut o influență mai mică asupra pH-ului, durității, azotaților, alcalinității.

13. Efectul cel mai spectaculos al ozonării apei a fost înregistrat în ceea ce privește gustul, mirosul și culoarea, apa ozonată dobândind calități deosebit de favorabile din aceste puncte de vedere.

14. Pierderile de sarcină în contactor depind de mărimea debitului de apă și de aer ozonat, fiind influențate și de caracteristicile materialului de umplură. Variația pierderilor de sarcină este uniformă pe înălțimea contactorului la același tip de regim de curgere (imerant sau prin percolare). Coeficientul unitar al pierderilor de sarcină lineare crește cu debitul, având o variație neliniară.

15. Rezultatele experimentărilor întreprinse de autor evidențiază posibilitatea realizării proceselor de ozonare a apei și obținerea de rezultate foarte bune (superioare celor rezultate prin utilizarea clorului). Instalațiile și standurile concepute de autor au permis verificarea efectelor pozitive ale utilizării ozonului în tratarea apei și oferă date pentru realizarea de instalații azinale. Pentru contactorul tip prefiltru cu umplură din inele Rashig autorul a definit și determinat coeficientul unitar al pierderilor de sarcină lineare.

C A P I T O L U L 7

CONTRIBUTII LA APRECIEREA EFICIENTEI TRATĂRII APEI CU OZON

7.1. Parametrii procesului de producere a ozonului

Procesul de asigurare a cantității de ozon necesare tratării apei, stabilit în funcție de calitatea apei de tratat și a celei livrate consumatorilor, ținând seama de locul de aplicare a ozonizării în schema tehnologică generală a tratării apei, este un proces complex depinzând de următorii parametri esențiali : doza de ozon, d ; timpul de contact, t ; caracteristica gazului de ozonat, A ; caracteristica generatorului de ozon, G , sau producția de ozon ; caracteristica sistemului de alimentare cu energie electrică, definită de puterea de alimentare a generatorului ; caracteristica contactorului de ozon, B .

În stabilirea dozei de ozon și a timpului de contact se ține seama de caracteristicile fizice și chimice ale apei de tratat și a celei tratate.

Producția de ozon P_{O_3} se exprimă în modul cel mai general cu o relație de forma:

$$P_{O_3} = f(d, t, A, G, P, B) \quad (7.1)$$

Pe de altă parte, producția de ozon necesară poate fi determinată din ecuația de bilanț a ozonizării la nivelul intrării gazului ozonat în contactor, pentru o anumită temperatură a apei :

$$Q \cdot d = q \cdot c \quad (7.2)$$

rezultând :

$$P_{O_3} = q \cdot c \quad (7.3)$$

În care: Q este debitul apei de tratat, în m^3/h ; d - doza de ozon, în gO_3/m^3 apă; q - debitul de gaz ozonat, în m^3/h ; c - concentrația de ozon a gazului ozonat la intrarea în contactor, în gO_3/m^3 gaz.

Luând în considerare faptul că concentrația în ozon a gazului ozonat depinde de natura și caracteristicile gazului de alimentare a generatorului de ozon, dar mai ales de performanțele acestuia, înseamnă că producția de ozon necesară poate fi

exprimată și prin debitul de aer/gaz ozonat produs:

$$q_w = f_1(d, t, A, G, P, B) \quad (7.4)$$

fapt care dă posibilitatea stabilirii celei mai eficiente soluții de preparare a gazului ozonat luând în considerare parametrii A, G și P , după stabilirea prealabilă, pe baza studiilor de laborator, a dozei de ozon necesară tratării apei de o anumită calitate și a timpului de contact optim funcție de calitatea apei și a tipului de contactor, care să conducă la o soluție economică.

Introducând noțiunea de parametru al ozonizării β , definit de

$$\beta = d \cdot t \quad (7.5)$$

care caracterizează procesul complex de acțiune al ozonului asupra influentului rezultă:

$$q_w = f_1'(\beta, A, G, P, B) \quad (7.4')$$

Relațiile (7.1) și (7.4') exprimate în două moduri producția de ozon, elementul de legătură fiind concentrația ozonului în gazul ozonat, deci:

$$P_{O_3} = c \cdot f_1'(\beta, A, G, P, B) \quad (7.6)$$

7.2. Concentrația ozonului în gazul ozonat

În procesul de tratare al apei cu ozon apar următoarele concentrații ale ozonului în gaz/aer:

- concentrația în ozon a gazului ozonat la ieșirea din generator, c_o ;
- concentrația în ozon a gazului ozonat la intrarea în contactor, c_i ;
- concentrația în ozon a gazului ozonat rezidual (la ieșirea din contactor) c_r ;
- concentrația în ozon a aerului din zonele de lucru cu ozon, c_a .

Concentrația de ozon a gazului ozonat la ieșirea din generator, c_o , depinde de caracteristicile gazului de alimentare (A), temperatura, T , umiditate, x , grad de curățire, K_o , și de caracteristicile generatorului (P). Pentru o situație dată A și P cunoscute

și constante, $c_0 = \text{const.}$, la presiunea, p (constantă), specifică tipului de generator, rezultă :

$$C_0 = f_0(T, x; K_e, P, p) \quad (7.7)$$

În funcție de forma și lungimea traseului de distribuție a gazului ozonat de la generator la contactor și de temperatura mediului ambiant, concentrația în ozon a gazului ozonat la contactor poate diferi de cea asigurată la generator, adică :

$$C = \alpha C_0 \quad (7.8)$$

unde α este un coeficient adimensional de stabilitate al ozonului în gazul ozonat care ține seama de eventualele pierderi (descompuneri cu formare de oxigen) de ozon. Se consideră eficient sistemul de distribuție al gazului ozonat dacă $\geq 0,95$.

Coeficientul α poate fi determinat experimental aplicând relația :

$$\alpha = \frac{C_0 - C}{C_0} \quad (7.9)$$

Timpul t_1 scurs de la producerea gazului ozonat pînă la punerea lui în operă se apreciază utilizînd relația :

$$t_1 = \frac{\pi}{4} \sum \frac{L_i D_i^2}{q_i} \quad (7.10)$$

în care : L_i este lungimea tronsonului de conductă care transportă debitul q_i de gaz ozonat ; D_i - diametrul tronsonului de conductă de lungime L_i .

Exprimarea concentrației ozonului în aerul ozonat se poate face în % volum, în % greutate și în mg/dm^3 . Corelațiile între aceste moduri de exprimare sînt următoarele :

$$\% \text{ vol} = 0,051 c \quad (7.11)$$

$$\% \text{ greu} = \frac{100c}{1185(1+0,000255c)} \quad (7.12)$$

$$\% \text{ greu} = \frac{100c}{1185(1+\% \text{ vol}/200)} \quad (7.13)$$

$$\% \text{ vol} = 200 \left(\frac{100c}{1185\% \text{ greu}} - 1 \right) \quad (7.14)$$

unde cu c s-a notat concentrația în mgO_3/dm^3 aer ozonat la 25°C și 760 mm Hg. Pentru operativitate poate fi utilizată abscord din

figura 7.1.

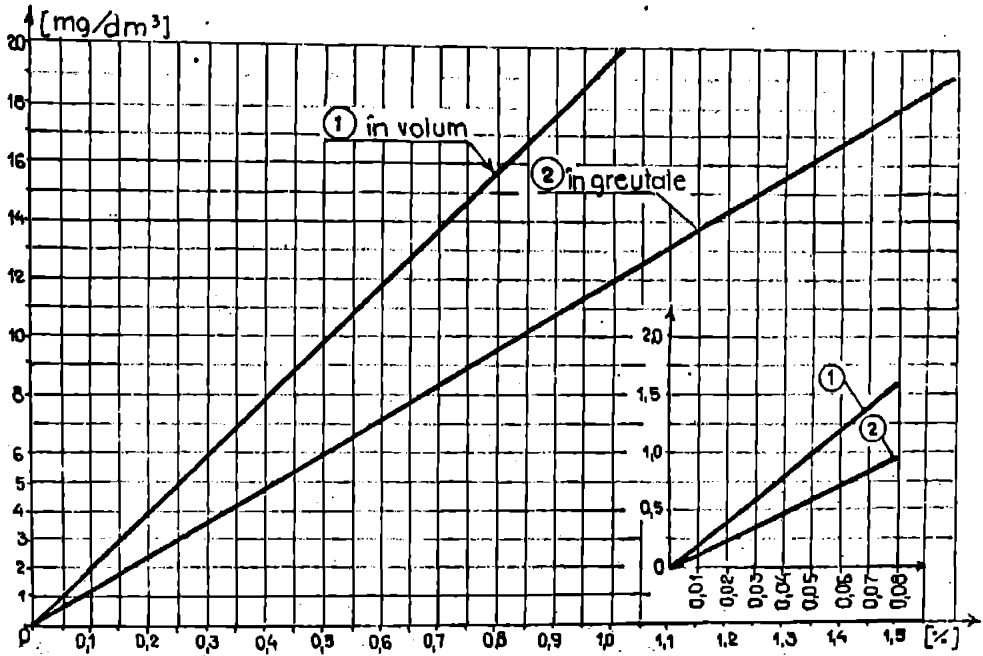


Fig.7.1. Corelarea exprimării concentrațiilor de ozon în aerul ozonat

Pentru asigurarea unei eficiențe ridicate a sistemului de producere a gazului ozonat se recomandă ca producerea gazului ozonat să se realizeze cât mai aproape de punerea sa în operă, adică cât mai aproape de contactoare.

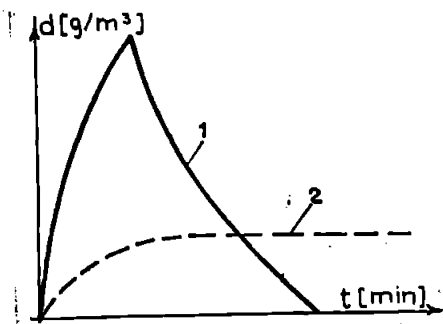
7.3. Influența dozei de ozon și a timpului de contact

Doza de ozon reprezintă cantitatea minimă de ozon necesară pentru asigurarea efectului necesar/cerut asupra unității de volum de apă de tratat ; se exprimă în mg/dm^3 , sau în g/m^3 .

În studiile întreprinse [4,7,12,14,17,19,31,33,27,29,34,41,45,50,51,61,66,77,89,97,98,101,105,108,120,121,125,130,138,142,149,150,152,176,180], în care au fost evidențiate multiplele ac-

țiuni ale ozonului asupra influentului, precum și din studiile proprii, a rezultat că efectele ozonizării depind de doza de ozon aplicată cât și de timpul de contact asigurat. Acțiunea O_3 asupra unor constituenți ai apelor de tratat cum sînt bacteriile, sărurile azotoase, hidrogenul sulfurat, fenolii, compușii organici nesaturați este foarte rapidă, fiind condiționată de viteza de transfer a ozonului în masa de apă. Alte materii reacționează încet cu ozonul, spre exemplu acidul acetic, ureea, alcoolii alifatici saturați, acidul oxalic. Pentru aceste substanțe nu este justificată mărirea dozei de ozon deoarece eficiența este redusă și pot fi distruse prin alte procedee.

Cînd acțiunea ozonului (bactericidă, spre exemplu) este rapidă se urmărește, prin modul de asigurare al contactului gaz-apă, un timp de contact mic cu o doză mare de ozon, iar în cazul unei acțiuni mai lente (oxidarea substanțelor biorefractare) se urmărește menținerea unei concentrații specifice a ozonului mai mică pentru o perioadă de timp mai mare. Aceste situații sînt prezentate calitativ în graficul din figura 7.2, în care curba 1 indică că o doză mare de ozon pentru un timp



de contact scurt folosește o cantitate de ozon minimă, iar curba 2 arată că pentru viteze de reacție controlate cantitatea minimă de ozon rezultă la folosirea dozelor mici pentru timpi de contact mari.

Funcție de natura componentelor din apa de tratat pentru un timp de contact constant, eficiența ozonizării este prezentată în graficul din figura 7.3, eviden-

țiindu-se faptul că există o valoare a dozei de ozon, d_{cr} , doza critică, care nu este rațional a fi depășită deoarece creșterea eficienței obținute este nesemnificativă față de cheltuielile

necesare producerii ozonului. Eficiența a fost apreciată în funcție de calitatea unui parametru (cel esențial) din apa brută, X_b , și același parametru după ozonizarea apei, X_o :

$$E = \frac{X_b - X_o}{X_b} \quad (7.15)$$

Diagrama din figura 7.3 nu se referă și la puținele elemente asupra cărora ozonul nu are efecte semnificative (spre exemplu ionul NH_4^+ [180]).

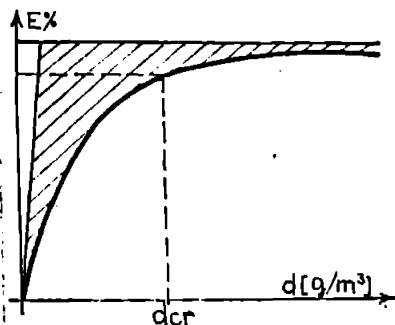


Fig.7.3. Eficiența procesului de ozonizare funcție de doza de ozon

Notăm cu d_o doza de ozon stabilită în laborator, d fiind doza în contactor. Atunci :

$$d = s \cdot d_o \quad (7.16)$$

în care s este coeficientul de siguranță al dozei de ozon.

Doza de ozon pentru uzinaj depinde de: d_u - doza de O_3 necesară/utilă producerii efectului dorit ; d_l - cantitatea de O_3 liber rămasă în apa ozonată; d_a -

cantitatea de ozon consumată pentru ozonizarea aerului cu care vin în contact în contactor ; d_r - cantitatea de O_3 remanent (din gazul ozonat rezidual). Deci:

$$d = d_u + d_l + d_a + d_r \quad (7.17)$$

reprezintă ecuația de bilanț a dozei de ozon în procesul de ozonizare.

Se apreciază că:

$$d_u = f(\sum C_i, t, d_a, d_r, T, T_g) \quad (7.18.1)$$

$$d_l = f(OL, d_u, d_a, d_r) \quad (7.18.2)$$

$$d_a = f(A_1, c, d_l, x) \quad (7.18.3)$$

$$d_r = f(d_u, d_l, d_a) \quad (7.18.4)$$

unde: C_i - concentrația impurificatorilor din influent ; T - temperatura influentului ; T_g - temperatura gazului ozonat ; OL - condițiile de lucru/funcționare ale contactorului ; A_1 - amenajarea contac-

torului ; x - umiditatea aerului din contactor.

Din analiza relațiilor (7.18.1...4) se apreciază că expresia coeficientului de siguranță al dozei de ozon este de forma:

$$S = f\left(\frac{C_L \cdot A_1 \cdot T}{x \cdot T_g}\right) \quad (7.19)$$

În practică se dovedește valabilă relația [129] :

$$\ln \frac{d_{1,0}}{d_e} = a(t - t_0) \quad (7.20)$$

în care: $d_{1,0}$ este cantitatea de ozon reținută în apă ozonată în timpul t_0 ; d_1 - idem, în timpul $t > t_0$; a - factor de corecție.

Pentru două măsurători consecutive, la momentele t_1 și t_2 , efectuând calculele rezultă :

$$a = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln \frac{d_{e,1}}{d_{e,2}} \quad (7.21)$$

Dacă se consideră timpul de contact t , rezultă :

$$d_e = e^{-at} \quad (7.22)$$

În general, funcție de timpul contactorului, caracteristicile influentului și ale gazului ozonat ($d_1 + d_a + d_r$) reprezintă 10...30% din doza d .

7.4. Modificarea calității apei în contactorul de ozon

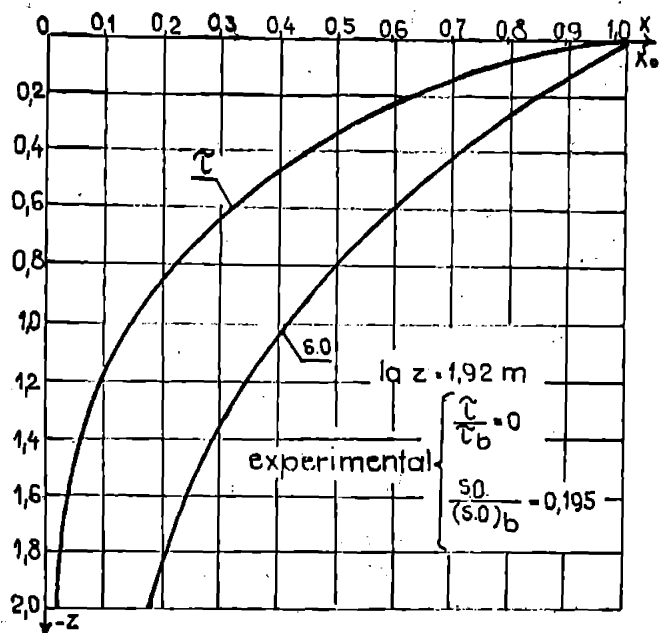
Folosind teoria probabilității, considerînd impurificatorii distribuiți omogen în masa influentului și acceptînd ca în fiecare pătură/strat de apă se oxidează o parte, considerată ca rată constantă, din impuritățile neoxidate în pătura/stratul precedent, relația care determină concentrația impurităților la distanța z de la intrarea/suprafața apei (începutul paroursului de apă în contactor) este:

$$X_z = X_0 \cdot e^{-B_1 \cdot z} \quad (7.23)$$

în care B_1 reprezintă parametrul procesului de ozonizare, definit de factorii care influențează eficiența. Se propune :

$$B_1 = \frac{d}{c.v.t} \left(\frac{Q}{q} \right)^n \quad (7.24)$$

Factorul de puete n depinde de parametrul procesului și de tipul calitativ al apei. Pentru apa cursului Bega în secțiunea de



captare a uzinei nr.2 Timișoara: $n=0,75$ pentru substanțe organice; $n=0,325$ pentru turbiditate; $n=0,33$ pentru fenoli.

În diagrama din figura 7.4 se prezintă raportul X/X_b pentru substanțe organice și turbiditate pentru proba 9 din tabelul 6.3. funcție de z .

Pentru a estima eficiența ozonizării în diferite situații funcționale, în

Fig.7.4. Dependența $z - X/X_b$, scopul uzinării corespunzătoare se poate utiliza programul a căruia schemă logică este prezentată în figura 7.5.

7.5. Dimensionarea contactoarelor de ozon

Avînd la bază studiile de laborator și pe stații pilot se poate trece la dimensionarea stației de ozonizare, deci, și a contactoarelor. Pentru aceasta se notează : M_1 cantitatea de ozon consumată în unitatea de timp la intrarea în contactor, în g/h ; M_2 cantitatea de ozon consumată în unitatea de timp la ieșirea din contactor, în g/h ; R_o viteza de reacție utilă, de oxidare a impurităților din apă, în $g/m^3.h$; R_s viteza de reacție supli-

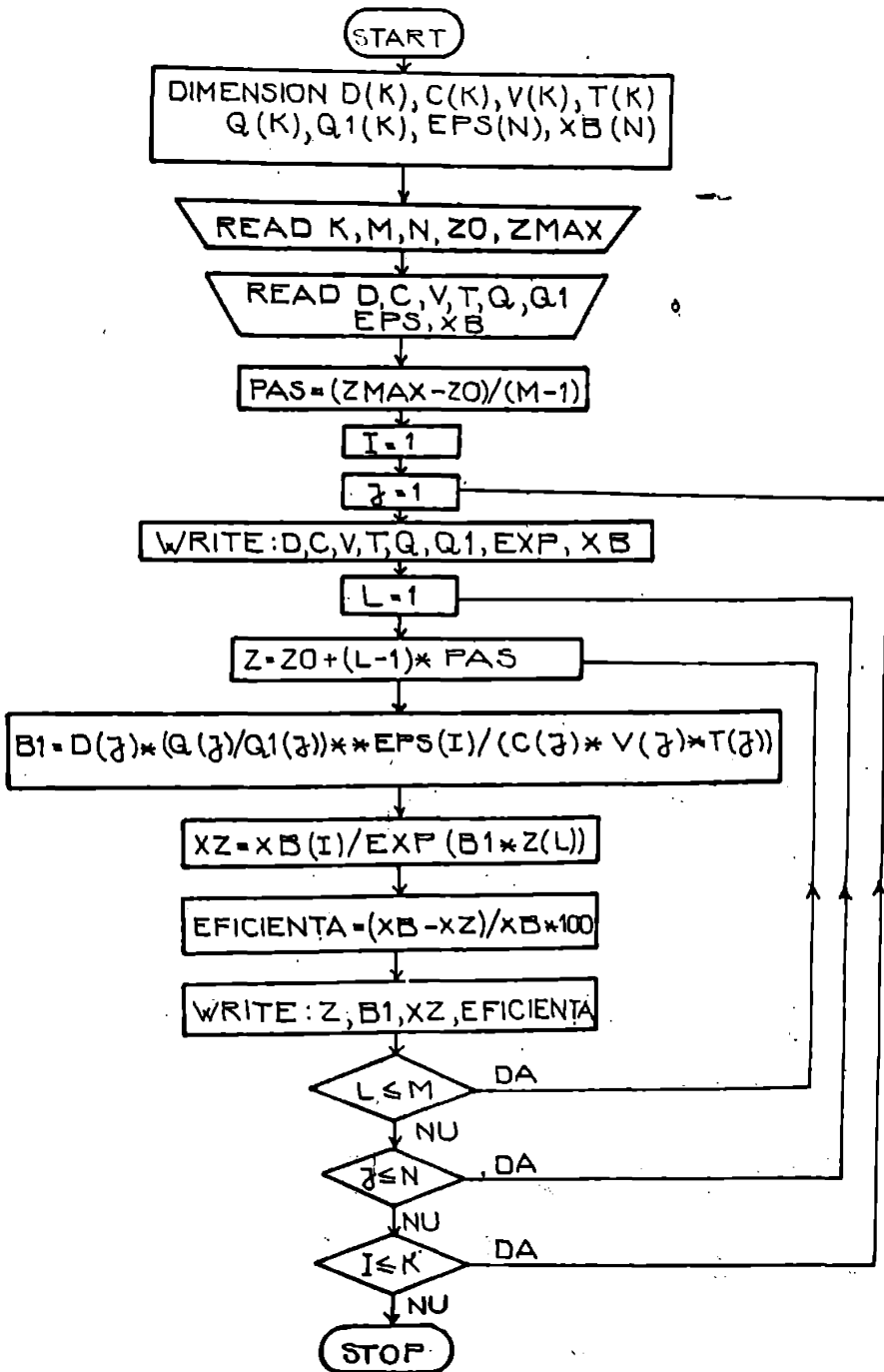


fig. 7.5

mentară (consum neproductiv), în g/m³.h ; V volumul de apă al contactorului, în mc. Cu aceste elemente se scrie relația importantă:

$$\frac{M_1 - M_2}{V} = R_0 + R_s = R \quad (7.25)$$

Tinem seama de :

$$V = Q \cdot t \quad (7.26)$$

în care: Q este debitul apei de tratat, în m³/h ; t - timpul de contact, în ore.

Considerăm substanțele organice ou principal impurificator, de concentrație C, în g/m³. În acest caz variația în timp a acso-tora, în g/m³.h , se scrie :

$$\frac{dC}{d\tau} = -\frac{L}{Qt} (M_1 - M_2) \quad (7.27)$$

unde L este un coeficient care se determină experimental.

Prin integrare în limitele C...C_b și τ= 0...τ= t rezultă

$$\int_{C_b}^C dC = -\frac{L}{Qt} \int_{\tau=0}^{\tau=t} (M_1 - M_2) d\tau \quad (7.28)$$

Dacă se consideră, pentru situația cea mai defavorabilă, constante cantitățile de ozon consumate la intrarea respectiv ieșirea din contactor, din (7.28) se obține :

$$Q = \frac{L}{C_b - C_z} (M_1 - M_2) \quad (7.29)$$

Valoarea C_z (concentrația substanțelor oxidabile la ieșirea din contactor) este impusă de condițiile calitative ale apei tratate. Cu relația (7.26) se determină volumul apei, ocupat de apă, al contactorului. În contactoarele cu material de umplură se ține seama de porozitatea externă, rezultînd volumul util al contactorului din:

$$V_U = \frac{Q \cdot t}{\epsilon} \quad (7.29')$$

Pentru determinarea înălțimii utile a contactorului se definește intensitatea dozei de ozon I, în m³ aer ozonat pe oră și l m² suprafață de contactor. Luînd concentrația ozonului în gazul/aerul ozonat o, în g/m³, la intrare și o_p, în g/m³, la ieșirea din contactor, se scrie bilanțul de ozon pe o tranșă e-

elementară de înălțime dz :

$$Idc = - R \cdot dz \quad (7.30)$$

care prin integrare în limitele $z = 0, c = c_0$ și $z = H_u, c = c$, rezultă:

$$H_u = - I \int_{c_0}^c \frac{dc}{R} \quad (7.31)$$

Considerînd pentru R valoarea definită de relația (5.23), după efectuarea calculelor rezultă:

$$H_u = \frac{2}{3} \cdot \frac{I}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{c} - \sqrt{c_0}} \quad (7.32)$$

în care k este constanta vitezei de reacție.

Impunînd valoarea v , în m/h, pentru viteza apei în contactor, pentru o anumită înălțime h apei (H_u), suprafața totală pentru contactoare va fi $S = Q/v$, și ținînd seama de ecuația de bilanț (7.2), pentru o situație dată rezultă:

$$H_u = \frac{2}{3} \frac{v \cdot d}{c k} \frac{1}{\sqrt{c} - \sqrt{c_0}} \quad (7.32')$$

Se fac verificările $v = H_u/t$ și $S = Q/v$ și dacă corespund ipotezei inițiale (valorii v impuse) calculele sînt încheiate.

7.6. Aspecte economice ale tratării apei cu ozon

Aprecierea costului pentru tratarea apei se poate face global sau pe unități funcționale (ținînd seama de funcționarea ansamblului), care ne vor rezulta în costul global.

La stabilirea costului ozonizării se ține seama de următorii parametri:

- calitatea apei și cerința de ozon - cerința de ozon crește cu mărirea gradului de impurificare al apei;
- natura gazului folosit - aerul atmosferic cît mai curat, uscat și rece conduce la costuri mai mici;

- c) temperatura apei și aerului - la temperaturi scăzute procesul ozonizării este favorizat ;
- d) mărimea sistemului - cu cât sistemul este mai mare cu atât cheltuielile sînt mai mici, conform graficului calitativ din figura 7.6 ;

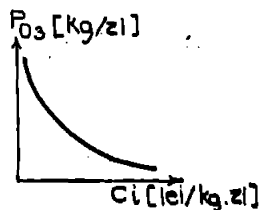


Fig.7.6. Dependența prețului ozonizării de producția de ozon

- e) costul energiei electrice, care nu este uniform pe parcursul unei zile ;
- f) necesarul de energie electrică a componentelor sistemului - acesta depinde de schema funcțională, de componența instalațiilor, de gradul de dotare cu aparatură de măsură și control, de cantitatea de O_3 necesară. Posibilitățile de consum a energiei sînt prezentate schematic în figura 7.7.
- g) gradul de automatizare - automatizarea necesită valori mari pentru investiția inițială, dar prin controlul și acțiunea operativă contribuie esențial la funcționarea optimizată a sistemului și la ameliorarea celorlalți parametri funcționali ;
- h) cheltuieli de exploatare și întreținere - depind invers proporțional de gradul de automatizare și de pregătirea profesională a personalului muncitor ;
- i) cheltuielile cu introducerea tehnicii noi - urmărirea perfecționării procesului tehnologic și al randamentului sistemului trebuie să fie permanent în atenția beneficiarului ;
- j) costul clădirilor - este influențat de mărimea sistemului, soluția adoptată și natura materialelor folosite ;
- k) amortismente ;
- l) aportul recirculării gazului ozonat rezidual - contribuie la reducerea consumului de ozon, deci a cheltuielilor de producție ;
- m) alți factori - spre exemplu realizarea capacităților de rezervă, valorificarea apei de răcire, reducerea cheltuielilor de transport (carburanți) pentru asigurarea cu clor, etc.

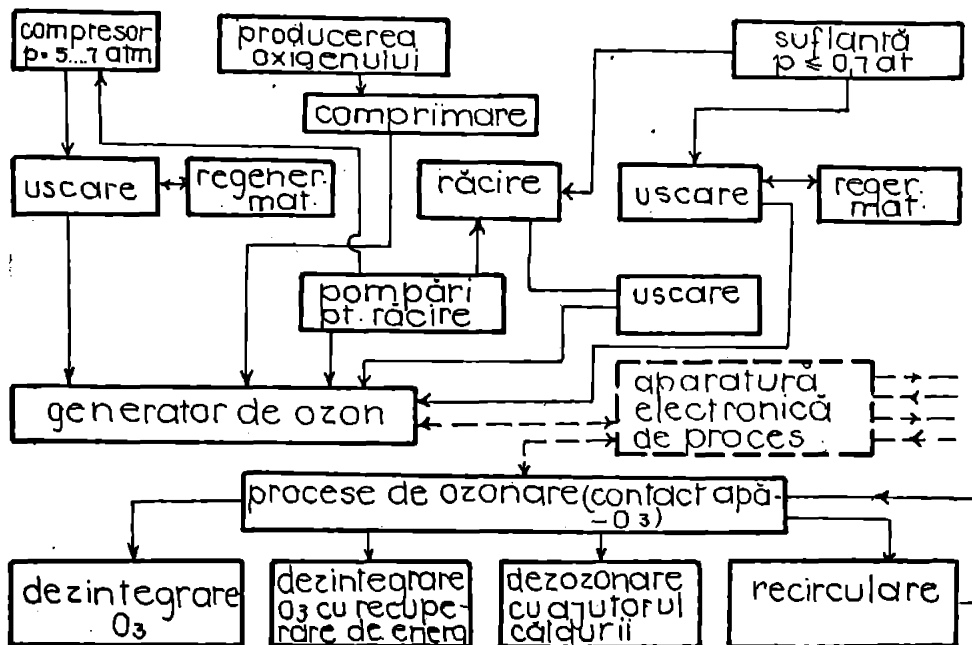


Fig.7.7. Posibilități de consum energetic în ozonizare

7.7. Concluzii

1. Producția de ozon necesară este condiționată de caracteristicile fizice și chimice ale influentului care determină doza de ozon și timpul de contact, de caracteristicile gazului ozonat, ale generatorului de ozon, ale sistemului de alimentare cu energie electrică, de caracteristicile contactorului de ozon.

2. Ecuația de bilanț a ozonizării la nivelul intrării gazului ozonat în contactor este desorită de ecuația (7.2).

3. În procesul de tratare a apei cu ozon apar următoarele concentrații ale ozonului în gaz: la intrarea în contactor, la ieșirea din generator, la ieșirea din contactor (gaz ozonat rezidual) și concentrația ozonului în aerul din zonele de lucru cu ozon.

4. Pentru asigurarea unei eficiențe ridicate sistemului de producere a gazului ozonat se recomandă un generator de ozon

să fie în apropierea contactoarelor.

5. Efectul ozonizării este asigurat prin corelarea dozei și timpului de contact, care se intercondiționează ; există o doză critică care nu este rațional să fie depășită deoarece creșterea eficienței obținute este nesemnificativă în comparație cu cheltuielile necesare producerii ozonului.

6. Doza de ozon pentru uzinaj este mai mare decât cea stabilită experimental în laborator și conține doza utilă producerii efectului dorit, cantitatea de ozon dizolvată în apă, cea consumată pentru ozonarea aerului din contactor și cea a ozonului rezidual.

7. Relația (7.23) determină concentrația impurităților din influent la distanța z de la intrarea apei.

8. Dimensionarea contactoarelor de ozon se face în baza relațiilor (7.25), (7.26), (7.29), (7.32), ținând seama de cantitatea de ozon consumată la intrarea și ieșirea din contactor, de vitezele de reacție, de timpul de contact, de debitul de apă, de concentrația în impurități, a apei brute și a celei tratate (necesare), de doză de O_3 și concentrației O_3 în aerul ozonat la intrarea și ieșirea din contactor, de intensitatea dozei de ozon.

9. Cunoașterea parametrilor care determină și influențează costul ozonizării este de maximă importanță asigurând condițiile de minimizare al acestuia.

10. Autorul a propus relațiile de determinare a producției de ozon, a exprimat coeficientul de stabilitate al ozonului în gazul ozonat, a explicat influența dozei de ozon și a timpului de contact în procesul de ozonare, a propus ecuația de bilanț a dozei de ozon și a explicitat componentele acesteia, a propus relația de calcul pentru parametrul ozonizării, a dezvoltat procedeul de dimensionare a contactoarelor de ozon și a evidențiat parametrii care influențează/determină costul ozonării.

C A P I T O L U L 3

CONCLUZII FINALE

8.1. Concluzii generale

1. Dezinfecția apei se impune a fi realizată pentru toate sistemele organizate de alimentare cu apă în vederea asigurării și menținerii sănătății publice.

2. Agenții chimici de dezinfecție au cea mai mare arie de aplicabilitate datorită avantajelor pe care le prezintă. Dintre aceștia, folosirea ozonului constituie o metodă modernă și eficientă, superioară utilizării clorului, datorită acțiunii rapide și puternice și a efectelor favorabile multiple asupra impurificatorilor din apă. Sistemul de ozonizare cuprinde patru repere esențiale ; gospodăria de gaz, alimentarea cu energie electrică, generatorul de ozon și contactorul. Întregul sistem trebuie să fie, în permanență, riguros controlat și coordonat în funcție de scopul utilizării.

3. Gospodăria de gaz asigură productivitatea generatorului de ozon. Gazul care stă la baza producerii ozonului este aerul atmosferic, care trebuie să fie curat, rece și uscat. Tratarea prealabilă a aerului presupune filtrarea, răcirea și uscarea sa.

4. Comportarea filtrelor din țesătură este bună, manipularea și întreținerea lor este simplă, rezistențele aerulice au valori acceptabile, nu sînt consumatoare de energie, prezintă siguranță în funcționare și exploatare.

5. Silicagelul românesc are o comportare foarte bună în uscarea aerului.

6. Pentru buna funcționare a generatorilor și asigurarea unui randament normal producerii ozonului, spațiile de descărcări electrice, prin care se asigură formarea ozonului, trebuie să fie răcite ; răcirea se face cu apă sau aer, funcție de timpul constructiv al generatorului de ozon.

7. Tensiunea de ionizare a gazului este influențată de debitul și presiunea acestuia, precum și de mărimea intervalului de descărcare, iar producția specifică de ozon este în funcție de caracteristicile electrice și constructive ale generatorului, pe de o parte, iar pe de altă parte de caracteristicile gazului de alimentare.

8. Etalonarea producției generatorului de ozon este obligatorie oînd nu este dată de firma producătoare și trebuie verificată sistematic în condițiile concrete de funcționare a agregatului pentru asigurarea economică a dozei de ozon solicitată de procesul tehnologic.

9. Instalațiile de producere a ozonului sînt amplasate în clădiri supraterne, destinate special acestui scop, fiind dotate cu instalații de ventilare. Exploatarea și întreținerea acestor instalații presupune respectarea riguroasă a măsurilor tehnico-organizatorice și de protecție a muncii specifice domeniului.

10. Contactoarele de ozon sînt instalațiile cu rol de asigurare a contactului intim între masa apei de tratat și gazul ozonat, pe durata timpului de contact. Gazul ozonat se introduce sub formă de jet sau bule în masa de apă, sau apa sub formă de picături, ori de perdele subțiri de apă care giroiesc printr-un material de umplură (curgerea prin percolare), asigurîndu-se transferul de masă (de ozon) dorit.

11. Bulele de gaz ozonat se formează, în masa de apă, sub acțiunea forțelor de presiune a gazului, arhimedice, de tensiune superficială; în această ipoteză diametrul bulelor nu depinde de debitul de gaz ozonat. Dacă se ține seama și de efectul viscozității apei (în baza legii lui Stokes), diametrul bulei de gaz se exprimă și funcție de debitul de gaz.

12. Solubilitatea ozonului în apă urmează legea lui Henry, evidențiindu-se efectul pozitiv al mișcării diametrului bulelor.

13. Dizolvarea ozonului din gazul ozonat în apa de tratat este un proces de transfer de masă care, în conformitate cu teoria lui Lewis și Withman, se desfășoară în patru etape: trecerea ozonului prin faza de vapori la interfața gaz-lichid; parcurgerea de către moleculele de O_3 a filmului de gaz de la interfața

celor două fluide; traversarea filmului lichid de la interfață ; dispersia în masa de lichid . Difuzia moleculară se supune legii lui Fick. Câmpul de distribuție al concentrației este caracterizat de efectul transferului de masă convectiv molecular suprapus transferului turbulent.

14. La transferul de masă prin difuzie moleculară convectivă în regim staționar de curgere unidirecțională, coeficientul global al transferului de masă depinde de grosimea stratului de apă, viteza medie, coeficienții de difuzie ai celor două medii fluide, coeficientul de vâscozitate cinematică al apei și de accelerația gravitațională. Ecuația criterială a transferului de masă se formează cu produsele adimensionale Nusselt, Reynolds, Froude, Schmidt.

15. Fenomenul de pulverizare al apei se bazează pe transformarea energiei de presiune în energie cinetică a jetului de apă care, apoi suferă procesul de divizare în picături mici, influențat de forțele de inerție, de impact masic, de tensiune superficială și de efectele aerodinamice. În acest caz transferul de masă al ozonului se apreciază în funcție de presiunea sa parțială.

16. Dispozitivul de introducere a aerului ozonat în contactor are un rol deosebit fiind responsabil de introducerea uniformă a acestuia, cât și de mărirea bulelor de gaz realizate.

17. După modul în care străbate materialul de umplură al contactoarelor tip prefiltru curgerea este imersată, prin percolare sau mixtă. Caracteristicile curgerii sînt definite de diametrul mediu hidraulic, viteza apei prin materialul de umplură, saturația efectivă, pierderea de sarcină.

18. Pierderile de sarcină în contactor depind de dotarea acestuia, tipul curgerii apei, mărirea debitului de apă și de aer ozonat și au o variație uniformă pe înălțimea contactorului. Coeficientul unitar al pierderilor de sarcină întotdeauna crește cu debitul, avînd o variație neliniară.

19. Producția de ozon necesară procesului de tratare a apei este condiționată/solicitată de caracteristicile fizice și chimice ale influentului, care determină doza de O_3 și timpul de contact, de caracteristicile gazului ozonat, de parti-

culeritățile contactorului de ozon, precum și de locul ozonizării în schema generală de tratare a apei. Se recomandă ca producerea ozonului să fie cât mai aproape de locul de punere în operă.

20. Eficiența ozonizării este asigurată prin corelarea dozei și timpului de contact. Doza de ozon pentru uzinaj, este mai mare decât cea stabilită experimental în laborator, conținând pe lângă suma dintre doza utilă obținerii efectului dorit și cantitatea de ozon dizolvată în apă și cantitățile de ozon consumate pentru ozonarea aerului din contactor și cea a ozonului rezidual.

21. Tratarea apei cu ozon dă rezultate bune atât în cazul preozonării cât și în cel al ozonării.

22. Concentrația impurităților din influent, la distanța și de la intrarea apei în contactor, este influențată de tipul apei și al impurităților acestuia, de debitele de apă și aer ozonat, de concentrația ozonului în gazul ozonat, de doza de O_3 , de timpul de contact și de viteza apei în contactor.

23. Efectele ozonizării apei au fost spectaculoase asupra gustului, mirosului și culorii, au fost remarcabile în ceea ce privește reducerea substanțelor organice, bacililor, germeilor, turbidității, fierului, fenolilor, amoniacului, azotiților și au avut o influență mai mică asupra pH-ului, durității, azotaților, alcalinității apei.

24. Dimensionarea contactoarelor de ozon se face în baza cantității de ozon consumate la intrarea și ieșirea din contactor, de viteza de reacție, timpul de contact debitul de apă tratat concentrația în impurificatori a apei brute și a celei tratate (necesare conform STAS 1432-1984), de doza de ozon și concentrația ozonului în aerul ozonat la intrarea și ieșirea din contactor, de intensitatea dozei de ozon.

25. Cunoașterea parametrilor care determină și influențează costul ozonării este de maximă importanță asigurând condițiile de minimizare ale acestuia.

26. Studiile teoretice și experimentale privind ozonizarea apei au fost valorificate prin elaborarea a trei contracte de cercetare, la care autorul a fost responsabil de temă, și prin înaintarea spre brevetare a documentațiilor pentru patru invenții (a

căror tematică nu este inclusă în materialul tezei) autorul făcând parte din colectivul de elaborare.

8.2. Contribuții personale

1. Pornind de la expresia rezistenței aeriului a filtrului: din funcționar propusă de Pucka și Stechkin s-a definit experimental constanta C_0 funcție de natura și modul de realizare al materialului filtrant, și din condiția realizării de pierderi de sarcină minime pentru aceeași eficiență a filtrului, s-a definit și determinat expresia coeficientului constructiv al filtrului λ_i

2. Pentru uscarea aerului prin adsorbția vaporilor conținuți în aer de către masa silicagelului din instalație, s-a propus un model fizic, considerând adsorbția adiabatică - procesul desfășurându-se în trepte până la saturarea materialului adsorbant/silicagelului -. Între curentul de aer și materialul adsorbant există un schimb de căldură și de masă convectiv care se localizează în stratul limită datorită dimensiunilor relativ reduse ale materialului și vitezelor de filtrare ale aerului prin materialul adsorbant mic. În aceste condiții creșterea căldurii uscate a aerului este egală cu schimbul termic convectiv respectiv cu răcirea materialului suport, iar scăderea cantității de vaporii din aer este egală cu schimbul masic de proces, respectiv cu creșterea umidității materialului. Astfel au fost determinate ecuațiile variației temperaturii și umidității în timp și spațiu.

3. Punând condiția funcționării optimizate a instalației de uscare, egalând timpul uscării cu cel al regenerării s-a explicat raportul h/p , care determină funcționalitatea instalației în cazul regenerării materialului adsorbant cu presiune redusă.

4. S-a determinat coeficientul pierderilor de sarcină pentru suportul decanant (de susținere a materialului de umplutură a instalației de uscare a aerului), considerat subțire, în funcție de coeficientul secțiunii vii, de numărul Reynolds și de forma marginilor orificiilor.

5. Urmare observațiilor privind variația producției de ozon s-a propus o relație pentru determinarea acestui parametru, care să țină seama și de caracteristica aerului introdus în generator

pe lângă aria suprafeței electrozilor, frecvența și tensiunea curentului aplicat, permitivitatea dielectrică și distanța dintre electrozi. Pentru tensiunea de ionizare s-a propus și dependența de debitul de gaz pe lângă presiunea sa și intervalul de descărcare.

6. S-au făcut recomandări privind realizarea construcțiilor care adăpostesc generatoarele de ozon, asupra sistemului de ventilații, precum și asupra măsurilor tehnico-organizatorice de funcționare și exploatare a stației de producere a ozonului și în ceea ce privește măsurile igienico-sanitare ce trebuie să fie respectate de personalul muncitor de întreținere și exploatare.

7. S-a realizat o clasificare a contactoarelor de ozon în funcție de calitatea influentului; circulația celor două faze, lichidă și gazoasă; modul de realizare și funcționare; modul de realizare a contactorului între gazul ozonat și apa de tratat; modul de realizare constructivă; presiunea gazului ozonat la intrarea în contactor.

8. S-a explicat și explicitat mecanismul transferului de masă a ozonului din bule de gaz în apa de tratat precum și expresia fluxului masei de ozon la suprafața lichidului când viteza de reacție a ozonului cu componentii impurificatori din apă este nulă, constantă și variabilă, precum și în situația în care apa de tratat sub formă de picături este introdusă în aerul ozonat. În primul caz a fost stabilită o ecuație pentru determinarea diametrului bulelor de gaz în funcție de diametrul orificiilor de intrare a gazului, densitatea influentului și gazului ozonat, înălțimea coloanei de apă și suprapresiunea din contactor și s-a determinat debitul critic al gazului ozonat care delimitează regimurile de dispersie și de jet în funcție de viteza unei bule izolate, de densitățile influentului și gazului ozonat, de mărimea orificiului și a coeficientului de tensiune superficială. În al doilea caz s-a determinat suprafața de contact (aria laterală a picăturilor) în funcție de diametrul lor mediu, de debitul de apă, de densitatea apei de tratat și a gazului ozonat și de coeficientul de viscozitate dinamică a aerului ozonat.

9. Pentru contactorul tip prefiltru, cu umplutură din inele Rashig s-a definit și determinat coeficientul unitar al pierde-

10. Pentru ocazia care exprimă variația unui parametru de calitate a apei pe parcursul acesteia în contactor s-a propus relația de calcul pentru parametrul ozonizării, B_1 , în funcție de debitele de apă și aer ozonat, doza de ozon, timpul de contact, concentrația ozonului în gazul ozonat, viteza apei în contactor,

11. S-a propus un model de dimensionare a contactoarelor de ozon în funcție de parametrii influentului și ai aerului ozonat.

8.3. Direcții de cercetare viitoare

1. Perfecționarea funcționării instalațiilor de uscare a aerului și verificarea comportării altor materiale adsorbante.

2. Perfecționarea dispozitivelor de introducere în contactor a aerului ozonat în vederea asigurării unei uniformități cât mai bune și a unui transfer de masă optim.

3. Studiul funcționării și al efectelor, contactoarelor realizate în trepte, cu doze diferite de ozon.

4. Studiul funcționării contactoarelor de ozon în cazul variațiilor bruște a parametrilor influentului.

5. Analiza costului metrului cub de apă ozonată în condițiile funcționării treptei de ozonizare într-un proces tehnologic industrial de tratare a apei.

B I B L I O G R A F I E

1. ANTON, V., POPOVICI, M., FITERO, I., Hidraulică și mașini hidraulice, E.D.P., București, 1978.
2. ANTONIU, R., VARDUCA, A., POPESCU, L., MARCULESCU, L., Studiul actual și perspectivele dezvoltării fluxului rapid de date în supravegherea automată a calității apelor fluviului Dunărea. Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR", Vol. I, L57, Timișoara, oct. 1984.
3. BARTUSKA, J.F., Ozonation at Whiting (Indiana): 26 years Later, Public Works, Aug. 1967.
4. BEAN, E.L., Taste and Odor Control at Philadelphia - J. Am. Water Works Assoc. 49, 1957.
5. BENEDEK, A., The Effect of Ozone on Activated Carbon Adsorption - A Mechanistic Analysis of Water Treatment Data, - Symp. on Advanced ozone Techol, Toronto, November, 1977.
6. BERGER, K.V., Über den Betrieb der Ozonanlage Kőnizberg der Wasserversorgung Bern, - Wasser - Abwasser 105(48), 1964.
7. BERNIER, M., Stérilisation par l'ozone des eaux d'alimentation de la ville de Nice et des communes du Littoral, - La Technique Sanitaire et Municipale, 45, 1950.
8. BLANKENFELD, D., Keimfreies Wasser durch Ozonanlagen, - C/ - Chemie-Technik, 1(11) 1972.
9. BLAZEJEWSKI, M., The Necessity of Using Ozone for Drinking Water in Poland, - Gaz Woda Tech. Sanit., 3, 1976.
10. BINNIS, A.M., SIMS, G.P., Air Entrainment by Flowing Water under Reduced Atmospheric Pressure, Journal Hydraulics Research nr. 3, 1969.
11. BOBLYKY, J., Ozone Provides Powerful Disinfectant for Water, - Water and Sewage works, 121, 1976.
12. BOTZENHART, K., Effects of Ozone on Microorganisms, Intl. Symp. on Ozone Water, Wasser Berlin, May 1977.
13. BOUCHARD, J.C., Ozone for Water Treatment, - The Municipal utilities Magazine, 93(5), 1955.
14. BOUCHARD, J.C., Twenty Years of Ozone in the Treatment of Potable Waters, - Proc. Sec. Intl. Symp. on Ozone Technology, Cleveland, 1976.
15. BRAUN, A.E., MARINOT-LAGARDE, A., MATHIEU, J., Mécanique des fluides, Ed. Dunod, Paris, 1970.
16. BRYANT, A.A., Saving Money with Pre-pilot Plant Studies, - Water and Sewage Works, April, 1976.
17. BUYDENS, R., FRANCOLET, G., Etudes et memoires l'action de l'ozone sur le chlore, le bioxyde de chlore et le chlorure contenu dans les eaux traitées, - Tribune du Cobouren, 326, January, 1971.

18. BUYDENS, R., La reviviscence Microbienne dans les eaux et, particulièrement, dans les eaux ozonées, Tribune du Cebedeau 25(338), 1972.
19. CAMPBELL, R.M., The Use of Ozone in the Treatment of Loch Turret Water, - J. Inst. Water Engrs. 17, 1963.
20. CARAFOLI, E., CONSTANTINESCU, V.N., Dinamica fluidelor incomprimibile. Ed. Acad. RSR, Bucuresti, 1981.
21. CARAFOLI, E., CONSTANTINESCU, V.N., Dinamica fluidelor compresibile, Ed. Acad. RSR, Bucuresti, 1984.
22. CHEDAL, J., Modes of Disinfecting Action of Ozone, - Intl. Symp. on Ozone Water, Wasser Berlin, May, 1977.
23. CHEREMISINOFF, P.N., VALENT, P., WRIGHT, D., FORTIER, R., MAGILIANO, J., Potable Water Treatment : Technical and Economic Analysis, - Water and Sewage Works, 123, 1976.
24. CIOC, D., Mecanica fluidelor, E.D.P., Bucuresti, 1967.
25. CIOC, D., Hidraulică, E.D.P., Bucuresti, 1975.
26. CLARK, J.W., VEISSMAN, W. Jr., Water Supply and Pollution Control, Technical College, Pennsylvania, 1966.
27. COCHECI, V., MARTIN, A., BURȚICA, G., BOGDAN, E., Unele aspecte ale preozonizării asupra eliminării suspensiilor din apele de suprafață - Simpozion Național "Probleme actuale ale tratării și epurării apelor în RSR", Vol. II, L 15, Timișoara, oct. 1984.
28. COCHECI, V., MARTIN, A., BURȚICA, G., MURKESAN, R., - Asupra reducerii dozei de coagulant prin preozonizarea apei - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR", Vol. II, L 16, Timișoara, oct. 1984.
29. COCHECI, V., HALAS, L., - Unele aspecte asupra influenței preozonizării asupra eliminării metalelor grele - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR", Vol. IV, L 69, Timișoara, oct. 1984.
30. COCHECI, V., și colaboratorii - Bazele tehnologiei chimice . Ed. IPTV, 19 și Vol. II, Ed. IPTV, 1984.
31. COIN, L., HANNOUN, C., GOMBELLA, C., Inactivation of Poliomyelitis Virus by Ozone in the Presence of Water, - La Presse Med. 72(37), 1964.
32. COIN, L., GOMBELLA, C., HANNOUN, C., TRIMOREAU, J.C., Ozone Inactivation of Poliomyelitis Virus in Water, - La Presse Med. 75(30), 1967.
- 32.1. CRISTEA, A.I. Ventilarea și condiționarea aerului, Ed. Th., Bucuresti, 1968.
33. CROMLEY, T.J., O'CONNOR, J.T., Effect of Ozonation on the Removal of Iron From a Ground Water, - J. Am. Water Works Assoc. 68, 1976.

34. CROOME, D.J., ROBERTS, B.M., Kondicionirovanie vozduha i ventiljacija zdaniij, Moscova, 1980.
35. DELLAH, A., Study of Ozone Reactions Involved in Water and the Present chlorination Controversy, - Sec. Intl. Symp. on Ozone Technol, R.G. Rice, P. Pichet, and M.A. Vincent, editors, Intl. Ozone Inst., Cleveland 1975.
- 35.1. DELLAH, A., Ozonization at Charles-J. Des Bailleurs Water Treatment Plant, - Proc. Sec. Intl. Symp. on Ozone Technol R.G. Rice, P. Pichet and M.A. Vincent, editors, Intl. Ozone Inst. Cleveland 1976.
36. DASCALIESCU, A., Uscarea și aplicațiile ei industriale, E.Th. 196.
37. DOBIA, J., STARZ, F., Ozone Application in Small Potable Water Supply Plants, - Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, May, 1977.
38. DRAGHICI, N., Conducte pentru transportul fluidelor, Ed. Teh., București, 1971.
39. DROBEC, W., Ozonisierung Des Trinkwassers, Arch. Badowsens 4 (16), 1963.
40. DYACHKOV, A.V., Recent Advances in Water Disinfection, - Water Meeting, Amsterdam, Sept. 1976.
41. EVANS, FR. L., Ozone in Water and Wastewater Arentment, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, Editor, 1972.
42. EVISON, L.M., Disinfection of Water With Ozone: Comparative Study With Entero Viruses, Phage and Bacteria, - 3 rd Intl. Symp. on Ozone Technol., Paris, May 1977.
43. FAIR, G.M., GEYER, J.C., OKUN, D.A. Water Purification and wastewater Treatment and Disposal, - Ed. John Wiley, New York 1966.
44. FAIR, G.M., GEYER, J.C., OKUN, D.A. Water and Wastewater Engineering, Vol. 1, 2, - Ed. John Wiley Sons Inc. 1968.
45. FALK, H.L., MOYER, J.E., Ozone as a Disinfectant of Water, - Ozone/Chlorine, Dioxide Oxidation of Organic Materials, R.G. Rice and J.A. Cotruvo, editors, Intl. Ozone Inst., Cleveland, 1978.
46. FLOREA, O., JINESCU, G.I., Procedee intensive în operațiile unitare de transfer, - E.T. București, 1976.
47. FLOREA, J., ROBESCU, D., Transportul hidraulic și pneumatic, - I.P. București, 1979.
48. FLOREA, J., ROBESCU, D., Hidrodinamica instalațiilor de transport hidropneumatic și de depoluare a apei și a aerului, - I.C.B. 1982.
49. FRANKE, M., Un nouveau systeme d'aeration intensive pour le purification des eaux residuaires, - Technique de l'eau et de l'assainement, nr. 306, iunie 1972.
50. FURGASON, R., DAY, R.O., Iron and Manganese Removal with Ozone Water and Sewage Works, June-july 1975.

51. GASOVICH, R.D., VROCHANSKI, R.A., KURAKKI, I.M., Ozonation, Deodorization and Decontamination of Drinking Water by Ozone, *Gidr. i Sanit.* 34(6), 1969.
52. GAD, G., COLUMBUS, G., Chemische Auswirkung der Wasserozonisierung, *Health Engineer* 76, 1959.
53. GIEBLER, G., KOPPE, P., Methode Zur Bestimmung der Wirkung des Ozons bei der Aufbereitung von Wasser, *Wasser-Abwasser* 106(8), 1965.
54. GIURCONIU, M., Probleme ale aerării în procesele de îmbunătățire a calitatii apelor. Teză de doctorat, IPTV Timișoara, 1972.
55. GIURCONIU, M., MIREL, I., REPEZAN, A., SARBU, I., Culegere de probleme de hidraulică, teoretică și aplicată, Lit. IPTV Timișoara, 1983.
56. GIURCONIU, M., Hidraulică. Lucrări edilitare și instalații sanitare, E.D.P. București, 1972.
57. GIURCONIU, M., MIREL, I., REPEZAN, A., SARBU, I., Indrumar pentru proiectarea lucrărilor hidroedilitare, Lit. IPTV, Timișoara, 1982.
58. GIURCONIU, M., Cercetări asupra aerării cursurilor de apă prin insuflare de aer, Simpozion Național. Probleme actuale în gospodărirea apelor. Concepții în cercetare-proiectare - exploatare, Timișoara, noiembrie, 1962.
59. GOMELLA, C., Ozone Practices, in France, *J. Am. Water Works Assoc.* 64(1), 1972.
60. GOMELLA, C., L'ozonation vraie et l'affinage des eaux potables, *Sci. Progr. la Nature*, 1969.
61. GOMELLA, C., VERSANNE, D., The Function of Ozone in Bacterial Nitrification of Ammonia Nitrogen - The Plant of la Chapelle at Saint-Etienne-du-Rouvray, At. 3rd Intl. Symp. on Ozone Technol., Paris, May 1977.
62. GOMELLA, C., Utilization of Ozone when Treating Potable Water in France, Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, May 1977.
63. GUILLERD, J., VALIN, C., Traitement par l'ozone, *L'Enu* 48, 1961.
64. HALLOPEAU, J., Ozonation, General Report Nr.4, International Water Supply Congress and Exhibition on Water Stockholm June 1964.
65. HANN, V., Disinfection of Drinking Water With Ozone, *J. Am. Water Works Assoc.* 48(10), 1956.
66. HANN, V., Ozone Treatment for the Removal of Taste, Odor and Color from Water, *J. New England Water Works Assoc.* 1947.
67. HARRIS, W.C., Ozone Disinfection, *J. Am. Water Works Assoc.* 64(3), 1972.
68. HARRIS, W.C., Practical Considerations of Ozone in Water Treatment, Symp. on New Trends in Water and Sewage Treatment Using Pure Oxygen and Ozone, Denver 1974.

69. HILL, A.G., HOWELL, J.D., Compression of O_3/O_2 and O_3/Air Gas Mixtures, Symp. on Advanced Ozone Technol., Toronto, 1977.
70. HOEHN, R.C., Comparative Disinfection Methods, J. Am. Water works Assoc. 68, 1976.
71. HOFMANN, E., Betriebserfahrungen mit der Ozonung beim Bodensee Wasserwerk der Stadt St. Gallen, Wasser-Abwasser 104 (44) 1963.
72. HOLBAN, V., GEANTA, I., ROJANBCHI, V., MIHON, A., Procedee actuale de tratare a apelor de alimentare prin utilizarea ozonului activ și a ozonului - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în R.S.R.", Vol. II, L 17, Timișoara, oct. 1984.
73. HOLLUTA, J., Das Ozon in der Wasserchemie, Gas/Wasser-Wärme 18, 1964.
74. HOPF, W., Treatment of Water with Ozone and Activated carbon (Düsseldorf Process) Part I, Wasser-Abwasser 11(2), 1970.
75. HOPF, W., Zur Wasseranfertigung mit Ozon und Aktivkohle (Düsseldorf Verfahren, Teil II. Bemerkungen zur Anwendung von Ozon, Wasser-Abwasser 111(3); 1970.
76. INGOLS, R.E., FETNER, R.H., Some Studies of Ozone for Use in Water Treatment, Water Treatment and Examination 6(1), 1957.
77. JINESCU, G., Procese hidrodinamice și utilaje specifice în industria chimică, E.D.P. București, 1983.
78. JURA, C., RETEZAN, A., MERCEA, C., Procedee moderne pentru determinarea pe cale electrică a caracteristicilor calitative ale apei. Sesiunea An. șt. IPTVT, oct. 1979.
80. JURA, C., GIURCONIU, M., MIREL, I., MERCEA, C., RETEZAN, A., ș.a., Optimizarea proceselor tehnice pentru degazarea apei în prefiltre la vid. Sesiunea șt. șt. IPTVT, oct. 1979.
- 80.1. JURA, C., CRETU, GH., GIURCONIU, M., MIREL, I., Cercetări și rezultate obținute în modelarea proceselor de tratare a apei. Simpozion Național. Probleme actuale în gospodărirea apelor. Concepții în cercetare-proiectare - exploatare, Timișoara, noiembrie; 1982.
81. JURA, C., Alimentări cu apă Vol. I, II. Litograf. IPTVT-1984.
82. JURA, C., MERCEA, C., Tendințe moderne în optimizarea proceselor de tratare a apei - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în R.S.R.", Vol. II, L 5, Timișoara, oct. 1984.
83. KAFAROV, V., Fundamentals of Mass Transfer, Ed. Mir, Moscova, 1977.
84. KELLER, J. W., MORIN, R., Schaffernoth T. J., Ozone Disinfection Pilot Plant Studies at Laconia, J. Am. Water works Assoc. 66, 1974.
85. KONSTANTINOVICI, I., RETEZAN, M., Asupra metodologiei de cercetare în stație pilot a procentului de limezire la uzina de apă Timișoara, Simpozion Național - Probleme actuale în gospodărirea apelor. Concepții în cercetare-proiectare-

86. KOPPE, P., GIEBLER, G., - Untersuchungen über die Ozonzeilung von Wässern, Wasser-Abwasser 107(8), 1966.
87. KOROLEV, A.A., ABINDER, A.A., BOGDANOV, M.V., ZAKHAROVA, T.A., KILITROV, N.K., - Hygiene and Toxicological Features of Products of Phenol Degradation During Ozone Treatment of Water, Gidr.i Sanit. 28(8), 1963.
88. KROKE, K., Ozon und Chlor in der Wasserbehandlung, Vom Wasser 3, 1965.
89. KURZ, R., Untersuchungen zur Wirkung von Ozon auf Flockungsvorgänge. Dissertation -Kalsruhe 1977.
90. KURZMANN, G.E., Ozone in Drinking Water Preparation, chemische Industrie 26(8), 1974.
91. KURZMANN, G.E., Methods of Ozone Generation, Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, May, 1977.
92. KUHN, W., SONTHEIMER, H., KURZ, R., Use of Ozone and Chlorine in Water works in the Federal Republic of Germany, Ozone/Chlorine Dioxide Oxidation Products of Organic Materials, R.G.Rice and J.A.Cotruvo, editors, Intl. Ozone Inst., Cleveland, 1978.
93. LAMBLIN, H., Protection d'un réseau d'eau ozonée, 3 rd Intl. Symp. on Ozone Technol., Paris, Mai 1977.
94. LEBAUT, M., Le contrôle de l'eau d'alimentation de la ville de Nice, La Technique Sanitaire et Municipale, 45, 1950.
95. LE VIEL, R., La Stérilisation des eaux par le Chlore et l'ozone, La Technique Sanitaire et Municipale, 45, 1950.
96. LIENHARD, H.H., Einfluss der Verfahrensbedingungen des Ozoneintrags auf die Ozonwirksamkeit bei der Wasseraufbereitung-Dissertation, Karlsruhe 1980.
97. LIN, S.D., Taste and Odors in Water Supplies; A Review, Water and Sewage works, 1977.
98. LINGEL, E.W., Production and Use of Ozone in Water Treatment, Public works, 1964.
99. LUCA, E., CIUBOTARIU, C., ZET, GH., PADURARU, A., Fizică generală, Ediția II, E.D.P., București, 1982.
100. MATER, D., KURZ, C.D., Optimizing of Ozone Application When Treating Lake Water, Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, May, 1977.
101. NALLSVIALLA, J., ROUSTAN, M., ROQUES, H., Determination expérimentale des coefficients de Transfer de l'Ozone dans l'eau Proc. Sec. Intl. Symp. on Ozone Technol., R.G.Rice, P. Pichet, M.A. Vincent, editors, Intl. Ozone Inst. Cleveland, 1975.
102. MARRTS, M., Application d'un micro processeur dans un installation d'ozonation, 3 rd Intl. Symp. on Ozone Technol., Paris, Mai, 1977.
103. MASSCHELEIN, W., Technique of Dispersion and of Diffusion of Ozone in Water, Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, May, 1977.

104. MATEESCU, C., Hidraulică. E.D.P. București, 1963.
105. Mc MANMAN, J.A., The Use of Ozone in Water Treatment, Canadian Institute of Public Health Inspectors, 41 st National Conference, 1975.
106. MEIJERS, A.P., Quality Aspects of Ozonation, Water Research 11, 1977.
107. MIGNOT, J., Pratique de la mise en contact de l'ozone avec les liquides à Traiter, Sec.Intl. Symp. on Ozone Technol., R.G.Rice, P.Pichet, M.A. Vincent, editors, Intl. Chem. Inst., Cleveland, 1975.
108. MILLER, G.W., RICE, R.G., ROBSON, C.M., SCULLIN, R.L., KUHN, W., WOLF, H., An Assessment of Ozone and Chlorine Dioxide Technologies for Treatment of Cincinnati Municipal Water Supplies, EPA - 600/2-78-147. August, 1978.
109. MIREL, I., Contribuții la studiul procesului de filtrare rapidă în perioada inițială de reținere. Teză de doctorat, I.P.T.V. Timișoara, 1974.
110. MIHAILA, C., CALUIANU, V., MARINESCU, M., DANESCU, A., Procese și instalații industriale de uscare, E.Th. 1982.
- 110.1. MIHAILA, C. Procese termodinamice în sisteme gaz-solid și aplicațiile lor în industrie, E.Th. 1982.
- 110.2. MIHAILA, C., POPESCU, M., GOGEA, N., Cercetări teoretice și experimentale privind prototipul agregatului de uscare "AUC-7000", Rev. Construcții, nr. special instal. în constr., Dec. 1984.
111. NAUMANN, E., Fachblatt für das Gesamtgebiet der Gastechnik, Gaswirtschaft und der Wasser-wesens, Gas und Wasser-fach 93, 1952.
112. NEGULESCU, M., Epurarea apelor uzate orășenești, E.T. București, 1973.
113. NEISS, Fr., Instalații de ventilație, curs, Fac. de construcții Timișoara, secția Instalații în construcții.
114. NESTOR, I., LAZAR, L., SOVREA, D., IONESCU, N., Supravegherea pe termen lung a poluării virale a unor ape de suprafață din România, -Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR". Vol. I, L 52, Timișoara, octombrie 1984.
115. NICULESCU, N., DUTA, GH., STOENESCU, P., COLDA, I., Instalații de ventilare și climatizare, E.D.P. București, 1982.
116. NORBERT, J.B., The Ozonation of Water in the Montreal Region, J. New England water works Associ. 75, 1961.
117. OANCEA, N., Termotehnică și aparate termice, Vol. I și II. Ed. I.P.T. 1982, 1983.
- 117.1. OANCEA, N., Asupra proceselor de schimb termic și de masă din turnurile de răcire peliculare. Teză de doctorat, I.P. Timișoara, 1968.
118. O'DONOVAN, D.C., Experience in the Operation of Ozonation Plants, Meeting in Sligo (Inst. Water Engrs. Ireland Conference) Sept 1977.

119. O'DONOVAN, D.C., Treatment with Ozone, J. Am. Water Works Assoc. 57, 1965.
120. OSHEROFF, B.J., Water Treatment: the Background for Public Health Concern, Ozone/Chlorine Dioxide Oxidation Products of Organic Materials, R.G. Rice and J.A. Cotruvo, editors, Intl. Ozone Inst., Cleveland, 1978.
121. PASINKIEWICZ, J., GROSSMAN, A., NAWARA, S., Application of Ozone in Purification of Drinking Water Containing Phenols, Przemysl Chemiczny 47(4), 1968.
122. PERE, M., Operational Costs of Ozone and Energetic Balance, Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, Mai 1977.
123. PISLARASU, I., ROTARU, N., TEOBORDESCU, M., Alimentări cu apă, Ed. Th. București, 1981.
124. PISLARASU, I., Contribuții la tratarea apei din lacuri de acumulare. Teză de doctorat. I.C.B. 1974.
125. POWELL, M.P., DRUMMOND, R.G., SAAVEDA, C., EVANS, F.M., MORGAN, P.F., FIDLER, N.B., Action of Ozone on Tastes and Odors and Coliform Organisms, J. Am. Water Works Assoc. 44, 1952.
126. KANALD, V.G., Theory and Problems of Fluid Mechanics and Hydraulics, S.O.L. Mc. Graw Hill Book Company, 1962.
127. RETEZAN, A., Unele probleme ale tratării cu ozon a apei, Sesiune IPTV Timișoara, 26-28 oct. 1979.
128. RETEZAN, A., Hidrodinamische aspekte in Ozon-kontaktorgern, Bul. St. și Th. IPTVT Tom 31(45) Seria Constr. 1986.
129. RETEZAN, A., Considerații asupra proceselor de ozonare a apei, Buletinul Stiințific I.C.B. 1-4 Anul XXIII-1980.
130. RETEZAN, A., Studiul actual al aplicării mijloacelor de ozonare pe plan mondial. Referat în colectivul de catedră CHIF, februarie, 1980.
- 130.1. RETEZAN, A., Justificarea tehnico-economică a mijloacelor de ozonare în procesul de tratare al apei, Referat în colectivul de catedră, CHIF, iunie, 1980.
131. RETEZAN, A., Alimentări cu apă și canalizări, Litografia IPTVT 1984.
132. RETEZAN, A., RETEZAN, M., Aspecte ale utilizării prefiltrelor de ozon în potabilizarea apei, Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR", Vol. II, L 18, Timișoara, octombrie, 1984.
- 132.1. RETEZAN, A., SARBU, I., Despre hidraulica contactoarelor de ozon tip prefiltre, Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR". Vol. IV, L 97, Timișoara, octombrie, 1984.

133. RETEZAN, A., OANCEA, N., Asupra proceselor de schimb termic și de masă la uscarea aerului în desicatoare. Buletinul științific și tehnic, IPTV, Seria Construcții (sub tipar).
134. RETEZAN, A., Probleme tehnico-economice ale ozonării apei, Simpozion Național - Probleme actuale în gospodărirea apelor. Concepții în cercetare-proiectare-exploatare, Vol.III, Timișoara, noiembrie, 1982.
135. RICHARD, Y., FRESSINGER, F., Emplois complémentaires des traitements ozone et carbon actif, 3rd Intl. Symp. on Ozone Technol, Paris, mai 1977.
136. ROBESCU, D., Instalații de depoluare a apei și aerului, I.P. București, 1979.
137. ROJANSCHI, V., ENACHESCU, TH., DEAC, I., SOCOI, A., Probleme actuale ale alimentării cu apă a municipiului Timișoara. Simpozion Național - Probleme actuale în gospodărirea apelor. Concepții în cercetare-proiectare-exploatare. Vol.I, Timișoara, 1982.
138. ROOK, J.J., Developments in Europe, J.Am. Water Works, Assoc. 68, 1976.
139. RUSU, G., ROJANSKI, V., Filtrarea în tehnica tratării și epurării apelor, E.T.București, 1980.
140. RYAN, W.L., GRAINGE, J.W., Sanitary Engineering in Russia, J. Am. Water Works Assoc. 67, 1975.
141. SANKEY, K.A., The History of the Use of Ozone in the Area Now Controlled by the N.W.W.A., 3rd Intl. Symp. on Ozone Technol., Paris, mai 1977.
142. SCHALEKALP, M., Experiences Suisses avec l'ozone concernant en particulier les modifications des substances hygiéniquement douteuses, 3rd Intl. Symp. on Ozone Technol., Paris, mai 1977.
143. SCHWARTZ, M., Some Practices in Application of Ozone to Drinking Water, Forum on Ozone Disinfection, E.G. Fochtman, R.G. Rice, Browning M.E., editors, Intl. Ozone Inst. Cleveland, 1977.
144. SEASE, W.S., DIAPER, E.W.J., Mc CANNON, W.H., Experiences with Large Ozonators in Europe, Proc. 1st Intl. Symp. on Ozone for Water and Wastewater Treatment, R.G. Rice, M.E. Browning, editors, Intl. Ozone Inst., Cleveland, 1975.
145. SEASE, W.S., Ozone Mass Transfer and Contact Systems, Proc. 2nd Intl. Symp. on Ozone Technol., R.G. Rice, P. Pichet and E.A. Vincent, editors, Intl. Ozone Inst., Cleveland, 1976.
146. SELL, G.L., BURNS, B.D., Advanced Wastewater Treatment Methods, Water Research, 3o, 4, 1973.
147. SIMON, M., SCHEIDTMANN, H., Die Neue Ozonlage der Stadtwerke Duisburg, Wasser-Abwasser 109, 1968.
148. SOCOL, A., TOTTH, G., Rezultatele unor experimentări de tratare a apei râului Bega, Simpozion Național-Probleme actuale în gospodărirea apelor. Concepții în cercetare-proiectare-exploatare, Vol.III, Timișoara, 1982.

149. SONTHEIMER, H., New Experiences with Ozone in Germany, Proc. 1st Intl. Symp. on Ozone for Water and Wastewater Treatment, R.G. Rice and M.E. Browning, editors, Intl. Ozone Inst., Cleveland, 1975.
150. SONTHEIMER, H., Development Possibilities and Limits of Ozone Application when Treating Potable Water, Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, Mai 1977.
151. STOIANOVICI, S., ROBESCU, D., Procedee și echipamente mecanice pentru tratarea și epurarea apei, E.T. București, 1983.
- 151.1. STOIANOVICI, S., ROBESCU, D., STAMATOIU, D., Calculul și construcția echipamentelor de oxigenare a apei, Ed. Gerea, București, 1985.
152. SUCHKOV, B.P., Studies of the Ozonation of Drinking Water Containing Pathogenic Bacteria and Viruses, Gig. i Saint. 29(6), 1964.
153. THOMPSON, H., Ozone Antidote for Water Pollution, Illinois Water Treatment Company, mai-iunie 1972.
154. TORRICELLI, A., Drinking Water Purification, Chem. Series, Vol. 21, Am. Chem. Soc., Washington, 1959.
155. TREYBAL, R.E., Mass Transfer Operations, Mc Graw Hill, New York 1968.
156. TROPIN, B., Hidraulică specială, Litografia I.C.B. 1970.
157. TROPIN, P., Filtrarea apei, Hidrotehnica, 25,4, 1980.
158. TROPIN, P., Alimentații cu apă, E.T. București, 1982.
159. TROPIN, P., SANDU, M., MANESCU, AL., Tehnologii moderne de tratare a apei. Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR" Vol. II, L 2, Timișoara, oct. 1984.
160. TROPIN, P., Perspective și cii de dezvoltare a lucrărilor de alimentare cu apă și canalizare în România, Buletinul Științific I.C.B. 1-4 Anul XXIII, 1980.
161. UHLIG, G.W., Chemical Methods to Determine Ozone in Water Works, Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, mai 1977.
162. URAY, L., BEGEP, M., Contribuții privind studiul calității apei brute pe râul Bega, principala sursă pentru alimentarea cu apă a municipiului Timișoara - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR", Vol. II, L 44, Timișoara, oct. 1984.
163. URȘU, P.D., FROȘIU, D.P., ȘINEA-TATE, I., POPA, D.R., FROȘIU-RADA D., Protejarea aerului atmosferic, Ed. Th. București, 1981.
- 163.1. URȘU, P.D., Atmosfera și poluarea, Ed. Șt. și Enciclopedică, București, 1981.
164. URȘU, P.D., FROȘIU, D.P., Recepția, exploatarea și întreținerea instalațiilor și aparatelor privind protejarea aerului atmosferic, E.Th. București, 1982.
165. VALENȚA, J., Simultaneous Use of Chlorine and Ozone in Water Treatment, Gas. Wasser-Abwasser, 55 (9), 1975.

166. VAN HOOP, F., Some Aspects of Ozone Toxicity, 3rd Intl. Symp. on Ozone Technol., Paris, mai, 1977.
167. VARDUCA, A., BADESCU, G., POPESCU, L., MARCULESCU, V., Optimizarea activității de analize fizico-chimice a calității apelor prin extinderea metodelor instrumentale de analiză și a semiautomatizării de laborator - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR", vol. I, L 5, Timișoara, oct. 1984.
168. VINTILA, ST., BOSUIC, N., Instalații de alimentare cu apă, analizare, sanitară și de gaze, E.D.P. București, 1977.
169. VINCICHINSKY, K.K., Hygienic Problems of Ozonization of Water from the North-Donets-Donbas Canal, Gig i Saint. 28 (9), 1963.
170. WEBER, W.J., Physicochemical Processes for Water Quality Control, Ed. John Wiley, New York, 1972.
171. WEISSHORN, F.J., Application of Ozone in a Closed Circuit, (Düsseldorf), Intl. Symp. on Ozone and Water, Wasser Berlin, mai, 1977.
172. ZAFER, GH., DIACONU, R., Poluarea apelor cu substanțe clororganice cancerigene și posibilitatea adaptării lor la nivelul stațiilor de tratare a apelor în scop potabil, Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în RSR", Vol. II L 4, Timișoara, oct. 1984.
173. ZELIGAN, G., The Treatment of Potable Water, DEMAG, Metallgewinning, Duisberg, 1976.
174. Contract, I.P.T.V.T. Nr. 70/1980, Colectiv CHIF
175. Contract, I.P.T.V.T. Nr. 71/1980, Colectiv CHIF
176. Contract, I.P.T.V.T. Nr. /1981, Colectiv CHIF
177. Manualul inginerului chimist, Vol. I, II.
178. x x x Instalații complexe pentru producerea ozonului, M.I. M.U.E.E- I.C.P.E.
179. x x x Materiale absorbante de umiditate, Site moleculare - Buletin informativ M.I.P.C. Inst. Petrochimic, Ploiești.
180. Water Treatment and book, Degremont, 1973.
181. COCHRECI, V., MARTIN, A., SOGATU, C., Studiul actual și de perspectivă al folosirii clorului în tratarea apei - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în R.S.R." Vol. VI, Timișoara, oct. 1984.
182. COCHRECI, V., MARTIN, A., MINEA, C. Asupra unor aspecte ale utilizării ozonului în tratarea apelor - Simpozion Național "Probleme actuale ale protecției, tratării și epurării apelor în R.S.R.", Vol. VI, Timișoara, oct. 1984.
183. Horizontal Tube Ozonizeur, Degremont, Tehn. Bul. No. 1306 C.
184. Manualul inginerului hidrotehnician, Vol. I, II.

185. Gas Transfer System - U.S. Patent 4124508, Nov. 1978, Ecotrol, Inc. Bethpage, N.Y., Constantine Capetanopoulos, Doobs Ferry.
186. Appareil pur la purification de l'eau par ozonisation - R. Francaise, I.N.P.I. 2 337 105, jun. 1976, PINCON ANDREW, J.
187. Eductor for Dissolving Gases in Liquids - U.S. Patent 4070279 jan. 1978, EDWARD, P. Armstrong.
188. Ozone Disinfection in Waste Water Treatment with Recycling of Ozonation Off Gas - U.S. Patent 4132637, jan. 1979, PMC Corporation, Chicago, KEY, W.P., MERID, D.C., MONROE, D.W.
189. Ozone/Ultraviolet Water Purifier U.S. Patent 4141830, feb. 1979, Ontario Research Foundation, East, A.J.
190. Apparatus for Sterilizing Fluids with UV Radiation and ozone - U.S. Patent 4156652, mai, 1979. Reiner Wiest (R.F.G).
191. Catalytic Process for Ozonation of Water Containing Organic Contaminants - U.S. Patent 4029578, jun. 1977, Environmental Research and Application, Inc., Briarcliff Manor, N.Y., Amos Turk.
192. Ozone Oxidation of Waste Water - U.S. Patent 4007118, feb. 1977, Cubic Corporation, San Diego, GIAMBRONE, D.F.
193. Apparatus and Method for Treatment of Fluid with Ozone - U.S. Patent 4176061, nov. 1979, STOPKA, K.
194. Ozone Reactor for Liquids - U.S. Patent 4072613 feb. 1978, U.S.A. by Secretary of the Navy, Washington D.C., AEG, U.S.
195. Biological Intermediate Sewage Treatment with Ozone Pre-treatment - U.S. Patent 4178239, dec. 1979, Union Carbide Corporation, New York, LOSTNER, F., B.
196. Procédé et dispositif pour stériliser l'eau - R. Francaise, I.N.P.I. 2322830, sept. 1976, Société MULTIGAN S.A., résident en Suisse.
197. Ionescu, M. - Contribuții la tehnologia îndepărtării micro-poluantilor din apă prin adsorbție pe cărbune activ. Teză de doctorat, U.C.B. 1986.
198. Codruman, D. - Contribuții privind desulfurarea gazelor. Teză de doctorat, I.P.T. Timișoara, 1987.