INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ MINISTERUL EDUCAȚIEI, CULTURII ȘI CERCETĂRII

Cu titlu de manuscris

C.Z.U: 665:37.014

LEU VASILE

SEPARAREA ULEIURILOR TEHNICE ȘI VEGETALE DE IMPURITĂȚI MECANICE ÎN CÂMP ELECTRIC

221.01 – SISTEME ȘI TEHNOLOGII ENERGETICE

Teză de doctor în științe tehnice

Conducător științific:

BOLOGA Mircea prof., dr. hab. în tehnică, academician AŞM

Autor:

LEU Vasile

CHIŞINĂU, 2018

© LEU VASILE, 2018

ADNOTARE	5
АННОТАЦИЯ	6
ANNOTATION	7
INTRODUCERE	10
1. STADIUL ACTUAL PRIVIND PROBLEMA DE SEPARARE A LICHIDELOR ETEROGENE	13
1.1. Actualitatea problemei și metode de soluționare	13
1.2. FILTRE ELECTRICE. MODELE EXISTENTE	17
1.3. ASPECTE TEORETICE DE FUNCȚIONARE A FILTRULUI ELECTRIC	22
1.4. Problema de cercetare și direcția de soluționare	23
1.5. Scopul și obiectivele lucrării	24
1.6. Concluzii	25
2. SEPARAREA FAZEI SOLIDE DE CEA LICHIDĂ ÎN SUSPENSII DIELECTRICE PRIN M ELECTRICE	IETODE
2 1 Premise generale de cercetare evderimental \check{a}	26
2.1.1 Princiniile fizice de functionare a filtrului electric	20 26
2.1.1. 1 Antephie fizice de funcționare d'fini dun electric	20
2.1.2. Future alectrice utilizate în cercetare	27
2.1.3.1. Filtru electric 1 [95]	
2.1.3.2. Filtrul electric 2 [96]	
2.1.3.3. Filtrul electric 3 [97]	31
2.2. Standul experimental și metodica cercetărilor	34
2.2.1. Standul experimental	34
2.2.2. Metodica efectuării cercetărilor experimentale	34
2.3. REZULTATELE OBȚINUTE	35
2.3.1. Influența construcției electrofiltrelor asupra procesului de epurare	35
2.3.2. Influența tensiunii electrice asupra procesului de epurare	36
2.3.3. Separarea prin metoda de trepte	37
2.4. GENERALIZAREA DATELOR EXPERIMENTALE ÎN FUNCȚIE DE TIMP ȘI TENSIUNEA ELECTRICĂ	
2.4.1. Modelul cu un parametru	39
2.4.2. Modelul cu doi parametri	41
2.5. Concluzii	45
3. ASPECTE TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE ALE PROCESULUI DE SEPARARE PRIN M	IETODE
ELECTRICE A FAZEI DISPERSE SOLIDE ÎN SUSPENSII DIELECTRICE	47
3.1. PARTICULARITĂȚILE FIZICE ALE PROCESULUI DE SEPARARE A FAZELOR ETEROGENE	47
3.2. MODELUL TEORETIC DE CURĂȚARE ELECTRICĂ, LUÂND ÎN CONSIDERARE CREȘTEREA CU TIMPUL A GRO	JSIMII
STRATULUI DE IMPURITĂȚI DEPUS PE ELECTROD	48
3.2.1.Particule neîncărcate	50
3.2.2. Particule încărcate	50
3.3. COMPARAȚIE CU EXPERIMENTUL	53
3.4. DETERMINAREA PARAMETRILOR STATISTICI N ȘI A ÎN BAZA DATELOR EXPERIMENTALE	54
3.5. GENERALIZAREA DATELOR DE CERCETARE	57
3.6. DEZBATERI PE MARGINEA REZULTATELOR. PREMISE TEORETICE	58
3.7. Posibilitățile de dispariție totală a procesului de separare și explicațiile respective	61
3.7.1. Rolul ecranării electrice	61

CUPRINS

3.7.2. Rolul rezistenței electrice	64
3.8. Cercetarea experimentală a procesului de separare a fazei disperse solidă de cea lichidă în	
suspensii dielectrice prin metode electrice. Dispersii semiconductoare și conductoare de curent	
ELECTRIC	66
3.8.1. Rezultatele experimentale	66
3.8.1.1. Premise introductive	66
3.8.1.2. Dispersiile semiconductoare	66
3.8.1.3. Dispersii conductoare	68
3.8.2. Particularitățile fizice de separare electrică a particulelor semiconductoare și conductoare	68
3.8.3. Rolul difuziei în procesul de separare a fazelor	69
3.8.3.1. Repartiția staționară a concentrației dispersiilor în spațiu	70
3.8.3.2. Concentrația reziduală	72
3.8.3.3. Dezbaterea pe marginea rezultatelor	72
3.8.3.4. Corecția modelului de difuzie prin "difuzia" electrică	73
3.8.4. Dependența concentrației impurităților de timp	76
3.8.4.1. Noțiuni introductive	76
3.8.4.2. Particularitățile constructive ale electrofiltrului	76
3.8.4.3. Metodica de efectuare a experimentelor	77
3.8.4.4. Formularea problemei	77
3.8.4.5. Soluționarea problemei	/9
3.8.4.6. Analiza rezultatelor	83
3.9. CONCLUZII	8/
4. PROCESUL DE EPURARE ÎN FLUX	89
4.1. Noțiuni introductive	89
4.2. Aspecte teoretice	89
4.2.1. Noțiuni generale	89
4.2.2. Concentrația reziduală la ieșirea din filtrul electric	92
4.2.2.1. Modelul dispersiilor dielectrice	93
4.2.2.2. Dezbateri pe marginea rezultatelor obținute. Comparație cu experimentul	94
4.2.2.3. Modelul particulelor semiconductoare și conductoare de curent electric	97
4.3. CERCETAREA EXPERIMENTALĂ A EPURĂRII ÎN MODELUL DISPERSIILOR SEMICONDUCTOARE ȘI CONDUCTOAI	re 97
4.4. GENERALIZAREA DATELOR EXPERIMENTALE. MODELUL STAȚIONAR AL MEDIILOR DIELECTRICE	.102
4.5. GENERALIZAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE ÎN MODELUL NESTAȚIONAR PENTIU DISPERSII	
SEMICONDUCTOARE ȘI CONDUCTOARE	.106
4.5.1. Ecuație generalizată	.106
4.5.2. Parametrii λ și β	.107
4.5.3. Generalizarea rezultatelor experimentale	.109
4.6. Concluzii	.114
UUNULUZII GENEKALE ȘI KEUUMANDAKI	. 115
BIBLIOGRAFIE	. 117
ANEXE	. 127
CURRICULUM VITAE	. 128

ADNOTARE

Autor – LEU Vasile. **Titlul** – *Separarea uleiurilor tehnice și vegetale de impurități mecanice în câmp electric*. Teză de doctor în vederea conferirii titlului științific de doctor în tehnică la specialitatea 221.01 – *sisteme și tehnologii energetice*.

Structura lucrării: Lucrarea conține introducere, patru capitole, concluzii și recomandări, bibliografie cu 154 referințe, include 15 tabele și 42 figuri. Rezultatele sunt publicate în 25 lucrări științifice.

Cuvinte-cheie: lichid dielectric, mediu eterogen, fază închisă, fază dispersă, câmp electric, separare de faze, filtrare electrică, curent electric, concentrația fazei disperse, transfer de masă, potențial, perforație. **Domeniul de studiu:** procese de transfer de masă și căldură.

Scopul tezei constă în elaborarea modelului teoretic adecvat privind calculul ingineresc al filtrelor pentru lichide dielectrice, confirmarea modelului teoretic prin cercetări experimentale și implementarea în practică a rezultatelor obținute prin brevetarea filtrelor electrice, confecționate cu participarea autorului.

Obiectivele studiului: formularea problemei și obiectivelor principale de cercetare; elaborarea și cercetarea unor mostre experimentale de filtre electrice; selectarea celui mai eficient și mai optimal filtru; generalizarea datelor experimentale; crearea modelului matematic de calcul ingineresc al filtrelor electrice; concluzii generale și recomandări.

Noutatea și originalitatea din punct de vedere științific: metoda aplicației *câmpului electric*; utilizarea "electrodului - emiter" sub formă de "electrod - fir" ca diametru relativ mare, cu izolația din email *perforată*, ceea ce formează un nou mecanism fizic, pur coulombian, în baza descărcării electrice "*coronă*", cauzată de *perforații*; colectorul și electrozii de captare ce au menirea de a acumula faza dispersă sunt confecționate sub formă de labirinturi din plăci metalice cu potențiale *flotante*; teoria de separare, care ține cont de efectul de ecranare al câmpului electric exterior, cauzat de stratul de particule disperse cu grosimea în *creștere* (problemă gen *Stefan*), ce se depun pe suprafața colectorului, particulele fiind considerate ideal dielectrice; totodată, s-a ținut cont și de rezistența electrică a stratului menționat; în cazul particulelor semiconductoare (Cr₂O₃) sau conductoare (carbon), s-au introdus noțiuni noi – fenomen de *difuzie electrică* și de *coeficient* de difuzie electrică, elaborându-se teoria respectivă; sub aspect teoretic, a fost determinată *concentrația particulelor la ieșirea* din separatorul electric, în funcție de timp, demonstrându-se că este de relaxare; au fost generalizate datele experimentale sub formă de ecuații adimensionale de similitudine, rezultatele teoretice fiind confirmate experimental.

Problema științifică importantă soluționată: interacțiunile electrohidrodinamice în medii eterogene de tip suspensii cu faza portantă lichidă dielectrică și aspectele aplicative, ce sunt cercetate și soluționate în cadrul modelului fizic de interacțiuni electrohidrodinamice, condiționate de descărcarea electrică de tip "coronă", grație faptului că procesele se desfășoară în câmp electric puternic-neomogen pentru care și sunt caracteristice descărcările electrice menționate.

Semnificația teoretică: semnificația teoretică a lucrării constă în elaborarea unei noi teorii privind procesul de separare în câmpul electric exterior, la baza căreia este conceptul mecanismului descărcării electrice de tip "*coronă*"; a fost stabilită ecuația de bază pentru concentrația fazei disperse la *ieșirea* din separator în funcție de timp; a fost cercetat efectul de stagnare "aparentă" al procesului de separare electrică în timp, elaborându-se două ipoteze: prima - de ecranare a câmpului exterior de către sarcina electrică a stratului de dispersii, depuse în colectorul de impurități și a doua – de creștere a rezistenței electrice a acestui strat; deși ambele ipoteze nu contravin datelor experimentale, ulterior s-a demonstrat că efectul de stagnare al procesului de separare, în anumite cazuri, poate fi explicat și prin proprietățile asimptotice ale funcției de tip exponențial;

Valoarea aplicativă a lucrării - au fost efectuate cercetări experimentale ale procesului de separare electrică, pe baza cărora s-a elaborat modelul matematic de calcul ingineresc al separatoarelor electrice de tipul "coronă"; au fost generalizate datele experimentale prin ecuații adimensionale pentru toate cazurile de particule disperse: dielectrice, semiconductoare și conductoare de curent electric; rezultatele obținute pot fi utilizate atât în calculul de proiectare, cât și la confecționarea separatoarelor electrice.

АННОТАЦИЯ

Автор - Леу Василе. Название – *Очистка технических и растительных масел от механических примесей в электрическом поле.* Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, специальность 221.01 – энергетические системы и технологии.

Структура работы: состоит из введения, четырех глав, выводов и рекомендаций, библиографии 154 наименований, 42 рисунка и 15 таблиц. Результаты исследований опубликованы в 25 научных работах.

Ключевые слова: диэлектрическая жидкость, гетерогенная среда, закрытая фаза, дисперсная фаза, сепарация фаз, электрическая очистка, электрическое поле, концентрация дисперсных фаз, массообмен, потенциал, перфорация.

Область исследования: процессы массо и теплообмена; электротехнологии.

Цели диссертации: разработка теоретической модели инженерного расчета электрофильтров для очистки диэлектрических жидкостей; подтверждение теоретической модели экспериментальными исследованиями; внедрение результатов исследований, получения патентов на исследуемые электрофильтры, созданные с участием автора.

Задачи диссертации: формулировка и постановка задач; разработка, создание и исследование опытных образцов электрофильтров; выбор оптимальной конструкции электрофильтра; обобщение экспериментальных данных; инженерный расчет электрофильтров; выводы и практические рекомендации.

Научная новизна работы: применение электрического поля в целях очистки; использование «электрода-эмитера» в виде «проволоки» с перфорированной эмалевой изоляцией, что привело к новому физическому механизму электрической очистки, на базе коронного разряда; изготовление коллектора и уловителей примесей в виде лабиринтов из металлических пластинок с плавающими потенциалами; теория очистки, учитывающая эффект экранирования внешнего электрического поля противоположным полем заряда слоя дисперсных частиц; теоретическое определение *концентрации* очищаемой жидкости *на выходе* из электросепаратора как функция от времени, показав, что она является релаксационной; обобщение экспериментальных данных в виде уравнений подобия; подтверждение теоретических результатов экспериментально.

Решенная научная проблема: математически сформулированы задачи электрогидродинамических взаимодействий внешних электрических полей с гетерогенными средами типа суспензий с несущей фазой жидкого диэлектрика; получены наиболее важные частные решения применительно к прикладным аспектам электрической очистки; найдено и исследовано физическое решение электрогидродинамических взаимодействий, обусловленных электрическим разрядом типа «короны», благодаря специально изготовленному активному электроду в виде провода с перфорированной изоляцией, что приводит к развитию процессов в сильно неоднородном электрическом поле, для которого и характерны упомянутые электрические разряды.

Теоретическая значимость: разработана новая теория процесса очистки во внешнем электрическом поле, в основу которой заложена концепция коронного разряда; составлено и решено уравнение для концентрации дисперсной фазы на выходе из сепаратора в зависимости от времени; исследован эффект «кажущего» исчезновения эффекта электричкой сепарации от времени, выдвинув для этой цели две гипотезы: экранирование внешнего поля электрическим зарядом дисперсного слоя заряженных примесей, осаждаемых в коллекторе, и увеличение электрического сопротивления слоя; несмотря на то что обе гипотезы не противоречат экспериментальным данным, позднее, было показано, что эффект исчезновения очистки в определенных случаях может быть объяснён и свойствами функции экспоненциального типа.

Прикладное значение работы состоит в том, что выполнены экспериментальные исследования процесса электрической очистки и разработана модель инженерного расчета электрических сепараторов, «типа короны»; обобщены экспериментальные данные в безразмерных уравнениях подобия для диэлектрических, полупроводниковых и проводниковых дисперсных сред; полученные результаты могут использоваться в расчетах при проектировании и изготовлении электрофильтров для различных практических целей.

ANNOTATION

Author - LEU Vasile. Title - **«The separation of technical oils plant mechanical impurities in the electric field»,** PhD thesis in Technical Science.

Thesis structure: The papers comprises an introduction, four chapters, conclusions, recommendations and future research directions, 154 bibliography sources, 15 tables and 42 figures. The results are published in 25 scientific works.

Keywords: dielectric liquid, heterogeneous environment, closed phase, dispersed phase, electric field, separation of phases, electrical filtration, electric current, the dispersed phase concentration, mass transfer, potential, perforation.

The field of study: transfer processes of mass and of heat. **Purpose of work:** elaboration of adequate theoretical model for engineering calculation of the filters for the dielectric liquids; confirmation of the theoretical model through experimental researches; practical implementation of the achieved experimental results by patenting of experimental samples - which were obtained with the participation of author.

Objectives of the paper: formulation of the problem and of the main research questions; elaboration of experimental samples of electrical filters and their research; selecting of the most effective and optimal filter; generalization of of the experimental data; creation of mathematical model for the engineering calculation of the electrical filters; general conclusions and recommendations.

Scientific novelty and originality: method application of *electric field*; use of "emitter electrode" as "thread electrode" with relatively large diameter, but with *perforated* enamelled insulation, who lead to a new physical mechanism, purely Coulomb, what is based on electrical discharge type "coronă", caused by perforations; collector and traps are designed to accumulate the dispersed phase - are made in the form of mazes from metal plates with *floating* potentials; separation theory, which takes into account the shielding effect of external electric field by layer with thickness in growing (like Stefan problem) of dispersed particles, which are deposited on the collector surface, the particles is being considered ideal dielectrical; also has took into account the electrical resistance of the mentioned layer; in the case of semiconductor particles (Cr₂O₃) or conductors (carbon) are introduced new concepts - phenomenon of *electrical diffusion* and of *coefficient* of electrical diffusion, was elaborated the respective theory; at the level of theoretical aspect - was determined concentration at the output from the electrical separator, as function of time, was demonstrated that this function is of relational type; experimental data were generalized the form of equations dimensionless of similarity; theoretical results are confirmed by the experimental results.

The important scientific problem which is solved: electro-hydrodynamic interactions in heterogeneous environments of suspension type, with dialectical liquid load phase and their applied aspects, which is researched and resolved under physical appearance of electro hydrodynamic interactions, conditioned by electric discharge type "coronă", because the processes happening in electric strongly inhomogeneous fields, for which are characteristic mentioned electrical discharges.

Theoretical significance and practical value: theoretical significance of the paper consists in developing a new theory of the separation process in external electrical field, on basis of which is placed the mechanism concept of the electrical discharge type "coronă"; it was established basic equation for the dispersed phase concentration at the *exit* of the separator like function of time; was researched the effect of the "apparent" disappearance of electrical separation process in time, were developed two hypotheses: of shielding of external field by the electrical load of stratum of dispersions, filed in collector for impurities, and second hypothesis - of increasing the electrical resistance of this layer; although both hypotheses do not contradict experimental data, later been shown that the effect of extinction of separation process, in some cases, can be explained and through asymptotic properties of the exponential function.

The practical value of the work. The value of the research work consist in that were performed the experimental researches of the electrical separation process and was drafted the mathematical model for engineering calculation for separators, the type of which we will call «coronă»; experimental data were generalized by dimensionless equations – for all three cases of dispersed particles: dielectrics, semiconductors and conductors of electric current; results obtained can be directly used for goals of calculation and manufacturing of electrical separators.

ABREVIERI ȘI NOTAȚII

EHD	electrohidrodinamica
GEHD	generator electrohidrodinamic
PEHD	pompă electrohidrodinamică
EHS	electrohidrostatic
FM	filtre mecanice
FE	filtre electrice
EE	epurare electrică
SÎT	sursă de înaltă tensiune
η	coeficientul de viscozitate dinamică, kg/(m·s)
γ	densitatea volumică a mediului, kg/m ³
F	forța coulombiană
А	constantă adimensională
С	coeficient de proporționalitate
α	parametru caracteristic al filtrului electric
β	parametru caracteristic al filtrului electric
U	tensiunea electrică, V
Т	temperatura absolută, K
λ	conductibilitatea termică, W/(m·K)
ρ	densitatea volumică a sarcinilor electrice C/m ³
κ	coeficientul de mobilitate, m ² /V·s
σ	conductivitatea electrică specifică, $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$
Ε	intensitatea câmpului electric, V/m
q	sarcina electrică a particulei, C
и	viteza de migrare a particulelor, m/s
f	forța ce acționează asupra particulei, N
р	momentul dipolar al moleculei, C·m
ξ	grosimea stratului, m
$arphi_0$	concentrația inițială, %
$arphi_\infty$	concentrația remanentă la infinit,%
n	numărul de cicluri

Q	debitul de lichid, m ³ /s
$ ho_1$	densitatea sarcinii în interiorul stratului de particule, C/m ³
3	permitivitatea dielectrică absolută, F/m
а	raza particulelor, m
i	densitatea fluxului de mase, $kg/(m^2 \cdot s)$
D	coeficientul de difuzie, m ² /s
m	masa particulei, kg
V	volumul lichidului, m ³
s	aria suprafeței electrodului, m ²
τ	timpul de relaxare, s
r	raza particulei, m
$\zeta(t)$	grosimea stratului de impurități ca funcție de timp, m

INTRODUCERE

Problema abordată se referă la un domeniu științific relativ nou – *electrohidrodinamica (EHD)*, obiectul de studiu al căreia îl constituie fenomenele de interacțiune al mediilor fluide dielectrice, sau slab conductoare de electricitate cu câmpurile electrice exterioare. Sub acțiunea forțelor electromecanice, numite ponderomotoare, apar fenomene electrohidromecanice, care pot să se manifeste sub aspect electrohidrostatic (EHS), când interacțiunile aduc doar la modificarea câmpului de presiune, fluidul rămânând în stare de *repaus* sau sub formă electrohidrodinamică când interacțiunea provoacă și *mișcări hidrodinamice*, numite de asemenea și *electroconvective* (convecție electrică). Dat fiind faptul că statica, după cum e știut, poate fi considerată caz particular a dinamicii (viteza zero) sub EHD poate fi subînțeles și cazul EHS.

Actualitatea EHD se explică prin diversitatea de efecte fizice, care apar la interacțiunile EHD și diversitatea posibilităților aplicative ale acestor efecte. Menționăm doar câteva din ele: reglarea și intensificarea schimbului de căldură în lichide și gaze; convertizarea de energie – electrică în mecanică (pompe EHD) și viceversa – mecanică în electrică (generatoare EHD); separarea electrică a mediilor eterogene (emulsii, suspensii, aerosoli etc.). Un loc aparte printre cele enumerate îl ocupă cazul particular de separare a mediilor eterogene – *epurarea* sau *curățarea* lor.

Curățarea lichidelor de impurități mecanice este utilizată pe larg în practică, iar necesitatea realizării acestui proces este dictată de diverse motive. Uleiul de transformator se curăță pentru: diminuarea tangentei unghiului de pierderi; sporirea rezistenței de străpungere electrică; funcționarea durabilă a transformatoarelor. Uleiurile vegetale - pentru îmbunătățirea calității de gust; prelungirea termenilor de păstrare; atribuirea aspectului exterior de realizare a produselor. Carburanții pentru motoare și uleiul de mașină – pentru reducerea eroziunii pieselor motoarelor, sporirea resurselor de funcționare. Solvenții organici – pentru utilizarea multiplă.

Metodele tradiționale de epurare cu filtre mecanice (FM), utilizate la decantare într-un câmp gravitațional sau centrifugal, posedă anumite neajunsuri: viteză foarte mică de decantare, iar la un volum mare de producție necesită vase încăpătoare și terenuri mari pentru plasarea acestora, deci investiții capitale majore și pierderi în timp. FM limitează curățarea particulelor cu dimensiuni mari, deoarece din lichid sunt îndepărtate doar particulele cu o dimensiune mai mare decât porii filtrului. De aceea se caută metode noi care ar extinde posibilitățile și ar îndepărta imperfecțiunea metodelor deja cunoscute.

Cercetarea întreprinsă este consacrată problemei filtrării sau *epurării electrice (EE)*. Sub aspect teoretic abordează tema interacțiunii EHD a câmpului electric creat din exterior în filtrul electric (FE), cu efect de transfer de masă, o temă vastă și de o importanță incontestabilă pe întregul domeniu EHD. În același timp sunt evidente și necesitățile de soluționare al problemelor de separare, cu care zi de zi se confruntă: industria alimentară (purificarea uleiurilor vegetale), industriile de mașini (epurarea uleiurilor tehnice, carburanților), industria medicinală (probleme de fracționare-sedimentare la diverse analize, inclusiv celor sanguine) etc. Drept urmare putem concluziona că tema abordată este actuală și de o importanță incontestabilă atât din punct de vedere științific, cât și aplicativ.

Teza conține rezultatele cercetărilor teoretice și experimentale ale interacțiunilor EHD dintre mediile eterogene și câmpurile electrice, care constituie esența fizică a filtrări electrice. Studiului sunt supuse trei spețe de impurități (faza dispersată solidă): dielectrice, semiconductoare și conductoare de curent electric. Faza închisă – lichid dielectric, care poate fi ideal sau slab conductor de electricitate (lichide tehnice). Câmpurile electrice sunt *constante* și *puternic neomogene*, astfel încât, începând cu o tensiune critică, provoacă fenomene de descărcare electrică gen "coronă" (analog cazului gazelor), care la rândul său conduc la încărcarea electrică a particulelor dispersate și separarea lor din lichid sub acțiunea forțelor coulombiene.

Scopul cercetărilor este elaborarea unui model teoretic, adaptat la calculul ingineresc al proceselor de filtrare electrică, care prevede următoarele obiective, în ansamblu privite ca un plan succint de realizare: formularea problemelor de cercetări experimentale și teoretice; elaborarea teoriei "filtrului – model"; acumularea și generalizarea datelor experimentale; prezentarea concluziilor și recomandărilor aplicative ale cercetărilor efectuate.

Noutatea științifică: au fost stabilite *legitățile filtrării* electrice și elaborate *modelele teoretice* respective; au fost *generalizate* datele experimentale în ecuații de similitudine;

Importanța teoretică: a fost obținută *curba de relaxare* a concentrației mediului eterogen; evidențiat rolul *parametrilor fizici* în acest proces; au fost stabilite *legitățile* de transfer nestaționar; introdusă noțiunea de *"difuziune electrică"*. *Importanța aplicativă:* au fost generalizate datele experimentale prin ecuații criteriale, aplicate la calculul ingineresc al procesului de filtrare electrică. Rezultatele tezei au fost apreciate în 25 lucrări științifice publicate, 9 raportate la conferințe internaționale (Sankt-Petersburg, Paris, București, Chișinău) și 3 brevete de invenție.

Primul compartiment este dedicat analizei materialelor la tema tezei. Se constată o mare parte de lucrări cu caracter inventiv și relativ o mică parte cu caracter teoretico-științific. În baza analizei stării problemei au fost formulate scopul și obiectivele tezei. Compartimentul doi este dedicat cercetărilor experimentale ale procesului de separare electrică în medii eterogene ideale în condiții EHS; au fost descrise instalația experimentală și metodicele efectuării experimentelor; rezultatele experimentale au fost interpretate prin două modele teoretice de filtrare electrică, care sunt în concordanță cu datele experimentale. Al treilea compartiment a fost dedicat cercetărilor experimentale de mai departe, însă referitor la particule disperse semiconductoare și conductoare de electricitate și teoriei transferului de masă în astfel de medii. A fost introdusă noțiunea de difuzie electrică, în baza căreia s-a elaborat modelul teoretic respectiv. Rezultatele teoretice sunt confirmate prin cele experimentale. Compartimentul patru se referă la epurarea în flux a uleiului de transformator de impurități conductoare și semiconductoare, interpretărilor teoretice ale acestora. Toate compartimentele se finalizează cu concluzii. La sfărșitul tezei sunt prezentate concluzii și recomandări generale.

1. STADIUL ACTUAL PRIVIND PROBLEMA DE SEPARARE A LICHIDELOR ETEROGENE

1.1. Actualitatea problemei și metode de soluționare

Remarcăm că prin separare se subînțelege diversitatea proceselor de divizare a unui amestec eterogen în componentele ce îl constituie. Industria de prelucrare se confruntă cu problema de epurare. Necesitatea de extragere a unei sau mai multor componente dintr-un mediu eterogen este acută în industria de extragere (a mineralelor). În medicină, biologie și alte domenii apar probleme de fracționare a componentelor ca în cazul analizei sanguine. Separarea lichidelor de diverse tipuri de impurități se referă la categoria epurare sau curățare [1-3], fiind deosebit de importantă pentru uleiurile tehnice și vegetale pentru că au o vastă aplicabilitate practică [1-15]. Actualitatea epurării este dictată de diferite motive. Uleiul de transformatoare se epurează [6,9] în scopul îmbunătățirii parametrilor electrofizici, micșorării tangentei unghiului de pierderi dielectrice, majorării rezistenței de străpungere și durabilității de funcționare a aparatelor și instalațiilor în care sunt utilizate aceste lichide. Problemei rezistenței de străpungere a lichidelor de lichidului. Influența directă a gradului de epurare a lichidului dielectric asupra proprietăților electrofizice și conductibilității electrice specifice este bine cunoscută și discutată detaliat în majoritatea publicațiilor consacrate lichidelor dielectrice, în monografiile de prestigiu [16 – 18].

Referitor la problemele de actualitate a cercetărilor întreprinse, constatăm că uleiurile vegetale sunt epurate [2, 3, 11, 12, 14,15] pentru îmbunătățirea calităților gustative, majorarea termenului de păstrare, ameliorarea aspectului de marfă, dar și în scopuri de extragere a cerii din lichid în corespundere cu metodologia descrisă, spre exemplu în [13]. Problemele de diminuare a eroziunii între piesele motoarelor cu ardere internă și majorare a duratei de exploatare datorită epurării uleiului de mașină și uleiului de motor sunt examinate în monografia [1], în care se discută metodele electrice de epurare și control a combustibililor navali. Necesitatea și posibilitățile practice de utilizare a câmpurilor electrice privind regenerarea dizolvanților organici la rectificarea lor sunt cercetate în lucrarea [5].

Bazele teoretice ale rafinării uleiurilor vegetale, sunt examinate în monografia [2], în care o atenție deosebită este acordată metodelor existente de rafinare-hidratare. În [6] sunt expuse bazele teoretice ale deshidratării electrice și desalinizării electrice a emulsiilor petroliere. Lucrarea [19] reflectă probleme de protecție a atmosferei de impurități, în special, sunt analizate aspectele ecologice ale mediului ambiant.

Astfel, se demonstrează importanța practică a proceselor de separare (divizare a fazelor sistemelor eterogene), care găsesc aplicații în energetică, industria constructoare de mașini, electrotehnică, radioelectronică, industria petrochimică, industria alimentară și medicinală.

Metodele tradiționale de epurare a lichidelor de impurități mecanice [8], bazate pe sedimentarea în câmp gravitațional cu utilizare centrifugală [20] și a filtrelor mecanice, au anumite dezavantaje: viteza de sedimentare este destul de mică, fiind demonstrată prin cercetarea proceselor și aparatelor din industria alimentară [3]; în cazul producerii la scară industrială, metodele examinate necesită suprafețe mari pentru amplasarea instalațiilor respective, corespunzător, investiții capitale substanțiale și timp. În plus, soluțiile coloidale rezistente nu se separă prin metoda de decantare. Centrifugarea are un șir de avantaje în raport cu decantarea, dar necesită tehnică sofisticată și este energofagă. Filtrele mecanice limitează epurarea după dimensiunea particulelor, deoarece din lichid sunt înlăturate particule cu dimensiunea mai mare decât porii filtrului și necesită regenerare sau schimbarea materialului filtrant și presiune suficientă pentru învingerea rezistenței straturilor de filtrare, din aceste considerente sunt efectuate cercetări pentru identificarea metodelor noi care ar permite diversificarea posibilităților și înlăturarea dezavantajelor metodelor cunoscute [1, 6 -15].

În scopul unei epurări mai fine a combustibililor și a altor lichide dielectrice sunt aplicate metode electrice [1, 2, 9,11-15], bazate pe efectul de separare a fazelor sub acțiunea câmpurilor electrice puternice (E>1 KV/cm). Conductivitatea electrică specifică a lichidelor supuse epurării este limitată în intervalul: $10^{-12} < \sigma < 10^{-9} \Omega^{-1} m^{-1}$. Din aceste lichide fac parte uleiurile de motor pe bază de petrol și cele sintetice (MK-8, MC-20, MC-20, B-3B, uleiul de transformator), precum și lichidele pentru sistemele hidraulice AMΓ-10, BMΠ 3.

Metoda electrohidrodinamică de epurare constituie obiectul de studiu al prezentei lucrări și se demonstrează prin numeroase surse bibliografice că se aplică pentru lichide dielectrice și gaze, bazându-se pe următoarele efecte fizice: electrizare [21–23], electroforeză [24, 25], convecția electrică [22, 26, 27], dielectroforeză [17], structurare [22], sedimentare electrostatică [28].

Efectul de electrizare este analizat în lucrarea clasică [21] dedicată electrizării statice. Problema aplicării acestui efect la lichide dielectrice, în condițiile de transfer de căldură, a fost abordată în monografia [22], în care sunt examinate diverse mecanisme de încărcare electrică a lichidelor dielectrice slab conductoare. Relația dintre densitatea de sarcină electrică ρ , de curent electric **j** și neomogenitatea timpului de relaxare electrică $\tau = \varepsilon/\sigma$ a mediului este $\rho = \mathbf{j} \cdot \nabla \tau$, unde: ε - permeabilitatea dielectrică absolută, σ - conductivitatea electrică specifică a mediului, precum și

mecanismul, condiționat de descărcarea electrică prin efect "coronă". Fenomenelor de electrizare este dedicată lucrarea [23] și se referă la diverse procese și instalații electrohidrodinamice, cum ar fi convertizoarele de energie EHD (pompe, generatoare, schimbătoare de căldură etc.). Noțiunile și efectele de dielectroforeză și electroforeză sunt legate de transportul particulelor, migrațiune și în măsură deplină, adecvat reflectate în lucrările [17, 24, 25]. În capitolul 3 al prezentei lucrări se demonstrează că forța care acționează asupra particulelor la separarea electrică în condițiile unui câmp electric exterior puternic neomogen nu este de natură dielectroforeză, ci coulombiană condiționată de descărcarea prin efect coronă. Distribuția acestei forțe, în caz general, este dată de relația $\rho \mathbf{E} = \mathbf{j}/k$, în care: ρ este densitatea volumică a sarcinilor libere în mediu, \mathbf{E} – intensitatea câmpului electric exterior, \mathbf{j} – vectorul densității curentului electric, condiționat de sarcinile volumetrice libere, k– coeficientul de mobilitate a purtătorilor de sarcină electrică de semnul electrodului (coronar) activ. Această forță acționează la distanțe relativ mari de la suprafața electrodului, provocând fenomenul de "vânt electric" [22].

Fenomenele electrohidrodinamice și electroconvective sunt prezente aproape în orice proces din lichidul dielectric aflat sub acțiunea câmpului electric suficient de puternic. Importante informații din punct de vedere atât teoretic, cât și aplicativ se conțin în monografiile [26, 27], consacrate interacțiunilor câmpurilor electrice și hidrodinamice [26], aducând un aport deosebit și la dezvoltarea electrogazohidrodinamicii [27], dar și aplicării ei în scopuri de separare electrică, generare a energiei electrice (generatoare EHD), pompare a lichidelor și gazelor dielectrice (pompe EHD).

În procesul de separare electrică faza dispersată se acumulează în regiunea colectorului, formând structuri solide sub formă de carcasă. Referitor la transferul de căldură în suspensii cu prezența câmpului electric, asemenea structuri sunt examinate în [22] (vezi de asemenea literatura indicată în această sursă). Ele sunt analoage celor ce apar la epurarea electrică a lichidelor dielectrice ideale (capitolul 2), fiind menținute prin "dipol-dipol" interacțiune reciprocă dintre particule. În cazul particulelor conductoare și slab conductoare, crearea structurilor în procesul de EE nu se observă (capitolul 3), însă în asemenea cazuri apare un nou efect cel de *difuzie electrică* (capitolul 3).

Problemele de separare a fazelor, în special, cele de separare electrică sunt abordate în monografia [28], consacrată *electrogazodinamicii sistemelor disperse*. În lucrare atenția principală se acordă epurării electrice a gazelor în câmpul descărcării coronă, constatându-se că principiile fizice sunt asemănătoare cu cele din lichide. De asemenea, sunt examinate mecanismele de electrizare a particulelor fazei disperse și dedusă relația Potenier pentru sarcina

particulei în câmpul descărcării coronă. În opinia autorilor [28] cauza principală a reținerii particulelor în filtrul electric este efectul *decantării electrice*, care conduce la ecranarea câmpului electric exterior. Aceste probleme sunt abordate și examinate în capitolul 3.

Ca factor de forță pentru efectele de decantare, câmpul electric are specificul său în comparație cu câmpurile gravitaționale și inerțiale și în anumite condiții prezintă metoda cea mai eficientă de epurare, iar în unele cazuri, chiar unica posibilă, însă dacă filtrele electrice larg utilizate pentru epurarea gazelor (de ardere în energetică, reziduuri dăunătoare din industria chimică, metalurgică etc.) funcționează eficient [27-29], atunci pentru mediile lichide sunt inutilizabile. Se explică acest lucru prin viscozitatea și densitatea fazei portante considerabile, dar și apariția amestecării-agitării electroconvective intensive care împiedică separarea fazelor.

Filtrele electrice pentru lichide au particularitățile lor [30-36], care sunt examinate în cap.2. Este necesar de menționat că lichidele au viscozitate și densitate mai sporită în comparație cu gazele, însă efectele EHD cauzate de descărcarea prin efectul coronă, în ambele cazuri sunt de același ordin. Aceasta are loc deoarece în lichide valoarea curenților este mică și mobilitatea purtătorilor de sarcină corespunzător este mai mică. Raportul dintre densitatea curentului electric și coeficientul de mobilitate a ionilor, adică densitatea forței electrice, sunt de același ordin.

În lucrarea [30] sunt examinate fenomenele deshidratării electrice a emulsiilor "apă-ulei vegetal" ce însoțesc rafinarea uleiului vegetal. Este demonstrat, câmpul electric exterior constant conduce la coagularea micro-picăturilor de apă, deci prin înlăturarea apei se obține epurarea uleiului. Remarcăm că metoda electrică de deshidratare este una dintre cele mai eficiente metode de rafinare a uleiurilor vegetale [30]. Lucrarea [31] este consacrată problemelor generale ale teoriei de filtrare și derivatelor sale aplicabile pentru suspensii, deși rezultatele prezentate posedă un caracter teoretic general la compartimentul separarea fazelor eterogene. Lucrările [32, 33] sunt apropiate după tematica sa, deoarece se referă la problematica epurării produselor petroliere [32], iar uleiurile pentru motoarele de avion și lichidele speciale, studiate în lucrarea [33], au origine petrolieră (conțin fracții petroliere).

Analiza surselor bibliografice demonstrează că există un număr suficient de lucrări în care sunt abordate atât aspectele teoretice, cât și cele practice ale proceselor de separare electrică [31-42]. Lucrările [34, 35] sunt consacrate problemelor și metodelor de majorare a eficienței de funcționare a filtrelor electrice, datorită modernizării elementelor constructive. Această observație se referă și la majoritatea propunerilor cu privire la majorarea calității instalațiilor de filtrare. Una dintre principalele probleme ale separării sistemelor eterogene ține de problema evidențierii particulelor disperse de dimensiuni submicronice de așa numita epurare/filtrare fină. Acestor probleme sunt consacrate lucrările [36, 37], în care este descrisă instalația pentru epurarea electrică fină [36], iar procesele care au loc sunt explicate în baza teoriei din [37]. Epurarea produselor petroliere în câmp electric continuu este studiată în lucrarea [38], în care sunt abordate detailat mecanismele fizice ale epurării electrice și stabilite metodicele de organizare ale procesului. O atenție deosebită se acordă proprietăților dielectrice ale mediului epurat. Lucrarea [39] este dedicată separării electrice a substanțelor cu conținut de fosfor, iar mecanismul de epurare electrică este corelat cu interacțiunile dipolare. Un material amplu și original privind prelucrarea electrică în câmpul descărcării prin efect coronă, este destinat electrotehnologiilor [40].

1.2. Filtre electrice. Modele existente

Există un număr impresionant de certificate de autor și brevete, de exemplu, [43-77] în ex-URSS și Federația Rusă, [78-83] - SUA, [84-87] - Japonia, [88-91] - Anglia, [92, 93] - Germania, [94]-Franța, care conțin descrierea filtrelor electrice. Astfel constatăm că problemele epurării electrice prezintă interes sporit în multe țări. Desigur, în cadrul prezentului studiu este imposibilă o descriere sumară a fiecărui certificat de autor și brevet. Cititorul interesat să aprofundeze cunoștințele în domeniu poate apela nemijlocit la certificatele respective. În continuare vom examina doar cele tipice și apropiate cercetărilor competitorului. Invenția [43] este destinată epurării lichidelor și gazelor dielectrice de impurități mecanice și permite simplificarea construcției. Suprafața interioară a carcasei epuratorului/filtrului este confecționată din material dielectric, iar volumul interior al carcasei executate în formă conică este împărtit în două de un perete despărțitor impermeabil. Ambele spații sunt umplute cu material conductor granulat și execută funcția de electrozi volumetrici de decantare. În baza acestor date ne putem imagina principiul de funcționare a filtrului electric. El este bazat pe interacțiunea coulombiană între particulele de impurități încărcate și electrozii de sedimentare. Particularitatea lui constă în generalitate, deoarece poate fi utilizat și pentru epurarea lichidelor, dar și a gazelor. Principalul dezavantaj constă în construcția complicată.

Câmpurile electrice sunt utilizate și pentru deshidratarea uleiurilor, materialele respective fiind reflectate în multe cercetări și invenții. Invenția [69] este destinată preparării combustibilului în diverse ramuri ale industriei, în special pentru sporirea gradului de epurare a combustibilului de

apă prin aplicarea câmpurilor electrice. Separatorul electric include o chiuvetă cu racorduri de admisie și refulare a combustibilului, sistem de câmp creat de electrozii activi conectați la sursa de tensiune înaltă și blocul de alimentare a electrozilor pasivi. Blocurile de electrozi pasivi și activi sunt confecționate sub forma unui ansamblu de plăci metalice și conductori cilindrici cu interval prestabilit al raportului dintre diametrul electrozilor cilindrici și lățimea plăcilor.

Toate blocurile de electrozi sunt amplasate paralel unul în raport cu celălalt în volumul de lucru al separatorului electric. În scopul controlului operativ al gradului de hidratare cu apă a combustibilului este utilizat blocul de electrozi pasivi, unde în rândul inferior al conductorilor cilindrici ei sunt izolați electric de sistemul de electrozi activi în formă de plăci, iar racordurile/capetele de ieșire de la ambele sisteme sunt unite cu un microampermetru. La ieșirea separatorului electric pentru combustibili pe izolatori este montată o plasă metalică cu înveliş din material electroizolant, cu stabilitate la ulei și apă, de exemplu fluoroplastul, destinat pentru captarea picăturilor de apă de dimensiuni foarte mici care la rândul lor din anumite considerente nu au reușit să coaguleze în separator.

Un asemenea sistem de electrozi asigură trei tipuri de interacțiuni a micropicăturilor (globule) de apă: datorită sarcinii particulelor electroconductoare, ca rezultat al acțiunii sarcinilor electrozilor, precum și momentului dipol al particulelor. În rezultatul acestor interacțiuni are loc coagularea eficientă a micropicăturilor în picături macro, care sedimentează pe fundul separatorului electric, asigurând procesul de epurare a combustibilului.

Invenția [72] este una care nu trebuie ignorată, deoarece reprezintă un filtru electric pentru lichidele dielectrice cu regenerarea electrică a electrozilor, conține carcasa/chiuveta și electrozii decantori executați în formă de plăci cu orificii care formează canale pentru curgerea lichidului și echipată cu pereți despărțitori din material dielectric. Electrozii cu pereții despărțitori formează celule – acumulatori de impurități, electrozii decantori sunt conectați la sursa de tensiune înaltă cu potențial electric de polaritate alternantă, ce diferă prin faptul, că sursa de tensiune este executată în formă a două blocuri: primul generează tensiune înaltă la electrozi pe durata de funcționare a filtrului electric, iar al doilea fiind deconectat; al doilea bloc generează tensiune înaltă la electrozi în procesul de regenerare al lor, când primul bloc este deconectat. Constatăm că și această invenție este destul de complicată constructiv, însă soluționează o problemă importantă, ca autocurățirea/epurarea filtrului electric.

Brevetul [73] - filtrul electric pentru epurarea lichidelor și gazelor dielectrice cu electrod izolat și orificii se referă la instalațiile pentru epurarea mediilor dielectrice de impurități mecanice și

constă dintr-o chiuvetă și electrozi decantori, executați în formă de plăci metalice cu orificii care formează canale pentru curgerea lichidelor sau gazelor epurate. Electrozii decantori sunt conectați la sursa de tensiune înaltă cu potențial electric de polaritate alternantă. Orificiile în electrozi – colectori sunt echipate cu elemente de intercalație din material dielectric (polipropilenă), care sunt presate în aceste orificii. În partea centrală a elementelor de intercalație sunt executate orificii pentru curgerea mediului epurat. Grosimea pereților elementelor de intercalație în orificii este egală cu (3-5) mm, ca sub acțiunea câmpului electric pe suprafețele lor să nu aibă loc sedimentarea particulelor mecanice, și aceste elemente de intercalație au funcția cu proeminențele sale frontale să fie după planul electrod-precipitant din ambele părți cu mărimea egală cu distanța dintre electrozi, egală cu (3-5) mm, în funcție de tensiunea aplicată pe electrozi. În părțile frontale ale elementelor de intercalație sunt executate rigole radiale pentru asigurarea curgerii lichidelor sau gazelor. Electrozii vecini la asamblare sunt amplasați astfel încât părțile proeminente ale elementelor de intercalație ale unui electrod să fie între părțile proeminente ale electrodului vecin în spațiul dintre acești electrozi. Invenția permite înlăturarea sedimentării impurităților mecanice pe suprafețele orificiilor și astfel permite majorarea capacității de acumulare a impurităților mecanice în filtrul electric și a timpului de funcționare până la următoarea curățire/regenerare. Pe lângă complexitatea descrierii filtrului electric dat, invenția se mai caracterizează prin redarea superficială a principiului de funcționare.

Mai apropiată de cercetările întreprinse în teza dată este invenția [75] - *filtru electrohidrodinamic*, care se referă la mijloace de separare a particulelor solide din mediile lichide prin utilizarea efectelor câmpului electric. În chiuveta filtrului este amplasat electrodul de polaritate pozitivă în formă de placă cu înveliş poros care este amplasat în lungul peretelui chiuvetei și un sistem de electrozi de polaritate negativă, amplasați ortogonal peretelui chiuvetei și electrodului pozitiv. Fiecare electrod de polaritate negativă este confecționat în forma unui ac, amplasat cu rost în membrana/manta cilindrică și care este unită cu canalul de evacuare a lichidului filtrat. La aplicarea tensiunii asupra electrodului în spațiul dintre electrozi apar curgerile electrohidrodinamice care antrenează particulele de impurități. Ultimele sunt reținute de învelișul poros pe electrodul pozitiv, fără a nimeri în zona fantei din apropierea electrodului negativ, ca și consecință a fenomenelor de sarcină. Lichidului filtrat la existența pompării exterioare. Epurarea unică a uleiului micșorează concentrația particulelor de impurități aproximativ de 10 ori.

Eficiența epurării este determinată de mecanismul de formare a sarcinii la granița dintre "metalul

electrodului – lichid" și este reglată prin alegerea materialului electrozilor, de exemplu nichelaluminiul. Din descrierea construcției filtrului electric rezultă că curgerile EHD poartă un caracter de "vânt electric", deoarece apar în regiunea câmpului electric neomogen puternic, deci la ac. Prin esența fizică a procesului putem concluziona că invenția poate fi atribuită la tip "coronă", examinată anterior în *Introducere*.

Brevetul [77] sub denumirea, filtru electric pentru lichide și gaze dielectrice cu electrozi neparaleli" se referă la instalațiile de epurare a lichidelor și gazelor dielectrice de impurități mecanice. Rezultatul tehnic constă în majorarea eficienței de epurare. Ca și celelalte filtre, acesta constă dintr-o chiuvetă închisă prin părțile frontale cu capace, în care sunt montate racordurile de admisie și refulare pentru lichidul epurat. În interiorul chiuvetei sunt amplasați electrozii precipitanți, unul dintre care este confecționat în formă de con secționat cu orificii în partea centrală, iar al doilea în formă de con fără orificii. Primul electrod are în partea laterală un strat electroizolant pentru prevenirea scurtcircuitului și acest electrod este aderat precis la suprafața interioară a chiuvetei. Al doilea electrod după instalare are o distanță dintre suprafața laterală și chiuveta pentru curgerea lichidului epurat. Între electrozi sunt amplasate coloane din material dielectric, printre care lichidul curge liber. Perechea de electrozi mentionată sunt amplasați unul către altul cu părțile late formând un canal cu contracție. Aceste perechi de electrozi sunt asamblate consecutiv, formând filtrul electric. Către fiecare electrod în pereche este aplicat potențialul său electric de la sursa de alimentare. Invenția este semnificativă prin faptul că datorită neparalelismului electrozilor câmpul electric devine neomogen în direcția longitudinală, de aceea forțele electrice cresc în direcția dată. În afară de aceasta, potențialul electrozilor este alternant, din care motiv apar vârtejuri electrohidrodinamice, favorabile transportării particulelor spre capcanele electrice. Ca dezavantaj se poate menționa complexitatea constructivă.

În baza studiilor efectuate în domeniul filtrelor electrice, se pot trage câteva concluzii generale. Toate au construcție destul de complicată; sunt create în baza intuiției fizice și mai puțin în baza calculelor științific argumentate; unul și același filtru electric va avea eficiență diferită de epurare pentru diferite lichide și diverse tipuri de impurități. De aceea este necesar să se indice destinația filtrului electric, tipul lichidelor epurate (dielectrici ideali, slab conductori, etc.), și tipul particulelor (dielectrici ideali, semiconductori, conductori electrici, etc.).

Cu toate că persistă o diversitate de denumiri ale certificatelor de autor ale filtrelor electrice, particularitățile lor constructive și procedeele de epurare electrică, cum ar fi "Separatorul electric" [58,63,64,67], "Dispozitiv pentru filtrarea particulelor solide" [60], "Dispozitiv pentru epurarea lichidelor de particule în suspensie" [65], "Instalație pentru epurarea continuă a

lichidelor" [66] etc., totuși esența fizică de funcționare ale filtrelor electrice este unică. Filtrele electrice se deosebesc în special din punct de vedere constructiv. Practic toate, inclusiv și cele elaborate de autor, de exemplu [95-98] conțin o chiuvetă cu racorduri de admisie și de evacuare, în care sunt instalați electrozi, conectați la sursa de tensiune înaltă, cu capcane pentru impurități, special prevăzute sau existente într-un mod sau altul (în cele mai simple - pereții interiori ai chiuvetei și suprafețele electrozilor).

Filtrul electric funcționează în modul următor: la pompare prin FE are loc electrizarea lichidului [21], polarizarea [17] și livrarea lui datorită electroconvecției [22, 99] spre capcane, apoi sedimentarea în ele a impurităților, fără a exclude întoarcerea unei părți de impurități în lichid datorită fenomenului de electroconvecție, dar și difuziune. Deci efectul de epurare este necesar de examinat ca rezultat al confruntării a două procese: sedimentarea și formarea structurilor de impurități în capcane [100], ce conduc la separarea fazelor, pe de o parte, și amestecarea electroconvectivă [99], care se opune acestui proces, pe de altă parte.

Prin urmare la dimensionarea filtrelor electrice este necesar de a ține cont de un șir de factori, care prevăd atât intensificarea decantării electrice și formarea structurilor, cât și atenuarea curgerilor convective în capcane. Din categoria acestora fac parte următoarele grupe de factori:

- electrici: tensiunea şi intensitatea curentului dintre electrozi, polaritatea tensiunii aplicate, caracterul repartizării câmpului electric în celula de epurare, valoarea sarcinii particulelor de impurități;
- parametrii fizici al mediului (lichidului epurat): viscozitatea, densitatea, permeabilitatea dielectrică, conductivitatea electrică specifică atât a fiecărei faze separat, cât și a amestecului;
- tehnologici: temperatura și presiunea mediului epurat, debitul lichidului prin filtrul electric, concentrația inițială de impurități, productivitatea specifică a instalațiilor și altele;
- constructivi: schema filtrului electric, raportul dimensiunilor unor elemente ale filtrului electric, forma și dimensiunile electrozilor, tipul și parametrii suprafețelor de izolare.

În teză au fost cercetate filtre electrice ale căror caracteristici sunt descrise mai jos.

În afară de șirul de lichide tehnice, metodele electrice de epurare sunt aplicabile, după cum s-a menționat, și pentru uleiurile de proveniență vegetală [2, 3], în special uleiul de floarea-soarelui [7, 11, 12, 14, 15, 30, 101], precum și pentru uleiurile inflamabile [8, 9] și dizolvanții organici [5]. Unei epurări mai eficiente sunt supuse, de regulă, lichidele impuritățile cărora au

conductivitate electrică specifică mai mare decât lichidul, și timp mai mic de relaxare electric $\tau = \varepsilon / \sigma$) [6], ceea ce condiționează o încărcare electrică mai eficientă [100].

În teză sunt prezentate rezultatele experimentale obținute pe modele de filtre electrice cu capcane [100, 101], care prezintă electrozi suplimentari cu potențial flotant. Aceasta înseamnă că electrozii nu sunt conectați la alți electrozi, de aceea ei percep potențialul mediului înconjurător.

1.3. Aspecte teoretice de funcționare a filtrului electric

Aspectele teoretice ale epurării electrice sunt cercetate în lucrările [102, 103], unde sunt examinate fenomenele de relaxare electrică în filtrele electrice și dedusă formula exponențială de diminuare a concentrației remanente a particulelor disperse în funcție de timp [102]. Pentru modele de diferită construcție în lucrarea [100] sunt stabilite legitățile de bază ale procesului de epurare ca funcție de timp pentru diferite tensiuni aplicate la filtrele electrice și debite ale lichidului epurat (ulei vegetal și ceară). S-a demonstrat că valoarea remanentă a particulelor în filtrele electrice pentru unele și aceleași intervale de timp diminuează esențial cu creșterea tensiunii U aplicate la filtru și crește odată cu majorarea debitului de lichid Q vehiculat prin el. Aceasta demonstrează eficiența metodei electrice de epurare și preferențial al regimurilor hidrostatice în comparație cu cel dinamic.

Unele aspecte fizice ale proceselor electrice de epurare în plan teoretic sunt redate în lucrarea [103], care demonstrează că diminuarea exponențială clasică a concentrației de impurități funcție de timp expusă în lucrarea [102], nu este exactă și este prezentată dependența corectată a concentrației remanente de timp ținând cont de acțiunea de ecranare a stratului decantor de impurități asupra câmpului exterior [103]. Astfel sunt create premizele pentru identificarea formulelor de calcul generalizatoare, aplicabile în scopuri practice.

După cum s-a menționat, principiile de funcționare ale filtrelor electrice poartă un caracter electrohidrodinamic (EHD), întrucât interacțiunea unui câmp electric de înaltă tensiune cu un fluid dielectric sau slab conductor de curent electric, inevitabil va duce la curgeri EHD sau electroconvective, ceea ce este constatat într-un șir de lucrări, unele deja menționate [22, 26, 99]. Însă mai facem referință la publicațiile [104-107], care în mod nemijlocit sunt consacrate curgerilor EHD. Astfel monografia [104] conține o descriere amplă a rezultatelor experimentale în ceea ce privesc fenomenele de electrizare a lichidelor dielectrice. Este demonstrat că repartițiile experimentale ale potențialului câmpului electrostatic în interstițiul dintre armaturile condensatorului plan-paralel în apropierea nemijlocita de suprafețele electrozilor au maxime, ceea ce ne vorbește despre structura bipolară a repartiției densității de sarcină electrică. În aceiași

22

lucrare este evidențiat rolul impurităților. Principiul de bază al filtrării electrice constă în interacțiunea directă a câmpului electric exterior cu particulele de impurități (dispersii) din lichid, care trebuie să fie eliminate. Pe acest aspect s-au poziționat publicațiile [108-112], dar și o serie de cercetări efectuate în România [113-118], printre care se numără și rezumatul tezei de doctorat [113]: Contribuții la studiul proceselor de separare electromecanică a impurităților combustibililor lichizi și ale uleiurilor pentru motoare și transformatoare. Denumirea tezei ne vorbește de la sine, fiind o lucrare ce conține aspecte teoretice și este de o actualitate aplicativă evidentă. În [113] a fost realizată analiză dimensională a procesului de electroseparare și identificate criteriile de similitudine ale acestuia. S-a dedus relația de calcul a eficienței procesului. S-a elaborat modelul matematic al cineticii de separare a particulelor din lichide dielectrice. Pentru simularea dependențelor concentrației particulelor și a timpului de procesare în raport cu criteriile de similitudine a fost elaborat un program de calcul în softul Mathcad 14. Au fost trasate graficele dependențelor concentrației particulelor și a timpului de procesare în raport cu tensiunea electrică, dimensiunea particulelor, permitivitățile dielectrice etc. S-au obținut și cercetat caracteristicile volt-amper ale separatorului pentru lichidele dielectrice testate în stare pură: uleiul de transformator, motorina Eurodiesel 5 și uleiul pentru motoare Diesel. Pentru mediile menționate și controlate cu particule de SiO₂, apă și cupru s-au trasat graficele respective ale dependențelor teoretice și experimentale în funcție de timp și raza particulelor. Au fost stabilite efecte de curgeri electrohidrodinamice ale lichidului dielectric [113].

1.4. Problema de cercetare și direcția de soluționare

În baza studiului efectuat în problema separării mediilor eterogene prin metode electrice în ansamblu pe lângă aspectele pozitive ale cercetărilor și filtrelor electrice existente au fost depistate și un șir de neajunsuri:

- *a)* sub aspect teoretic:
 - nu sunt evidențiate mecanismele fizice ale fenomenelor de transfer de masă în filtrele electrice existente, care depind de mai mulți factori, de care nu întotdeauna se ține cont, cum ar fi: tipul fazelor închise și disperse, mai cu seamă în dependență de conductivitatea lor electrică; tipul câmpurilor electrice; particularitățile constructive ale separatorului;
 - nu se acordă atenția cuvenită rolului sarcinilor electrice volumetrice;
 - nu se acordă atenție "vântului" ionic (electric) în fenomenele de transfer;
 - lipsește teoria adecvată, în baza căreia ar fi posibilă proiectarea separatoarelor electrice.

- *b) sub aspect practic:*
 - lipsesc cercetări fizice experimentale ale procesului de transfer de masă în separatoarele electrice;
 - pentru mecanismele date lipsesc confirmațiile lor experimentale;
 - în baza mecanismelor fizice şi teoriei lor adecvate lipsesc principiile de proiectare ale separatoarelor electrice;
 - lipsesc mostre experimental-industriale, menite pentru implementarea practică a rezultatelor deja cunoscute.

Prin analiza celor menționate *problema de cercetare și direcțiile de soluționare a acesteia* vor fi următoarele:

- 1. Elaborarea unor modele experimentale de filtre electrice, ținând cont de neajunsurile celor existente, pentru compararea lor cu scopul selectării celui mai eficient și optim dintre ele.
- 2. Studiul teoretic și experimental al fenomenelor de transfer de masă ce au loc în ele.
- 3. Generalizarea datelor experimentale în ecuații și parametri de similitudine.
- 4. Concluzii și recomandări practice.

1.5. Scopul și obiectivele lucrării

Scopul prezentei lucrări este elaborarea unei teorii adaptate la calculul adecvat ingineresc, în baza cărui să fie posibil calculul de dimensionare al filtrelor electrice pentru destinația dată și parametrii prestabiliți. Generalizarea datelor experimentale sub forma unei ecuații adimensionale, ceea ce va permite efectuarea calculelor inginerești; interpretarea fizico-teoretică a rezultatelor.

Obiectivele lucrării:

- modelul teoretic al procesului de transfer de masă în separatorul (filtrul) electric;
- mostra experimentală pentru verificarea conceptului teoretic și concluziile respective;
- cercetarea experimentală a procesului de transfer;
- compararea teoriei cu rezultatele experimentale;
- concluzii și recomandări practice;
- sondajul posibilităților de implementare a rezultatelor obținute.

1.6. Concluzii

- 1. În rezultatul analizei stadiului actual al cercetărilor privind problema de separare a lichidelor eterogene a fost reflectată actualitatea și importanța problemei abordate.
- 2. Au fost formulate scopul și obiectivele tezei.
- 3. A fost efectuat studiul bibliografic, analiza surselor citate.
- 4. Au fost analizate principiile fizice de funcționare a filtrelor electrice.
- 5. Au fost menționate neajunsurile în cercetările respective existente, formulată problema de cercetare și indicate direcțiile de soluționare.

2. Separarea fazei solide de cea lichidă în suspensii dielectrice prin metode electrice.

2.1. Premise generale de cercetare experimentală

2.1.1. Principiile fizice de funcționare a filtrului electric

Principiile de funcționare a filtrelor electrice poartă un caracter electrohidrodinamic (EHD), după cum s-a menționat în *Introducere*, deoarece interacțiunea unui câmp electric de înaltă tensiune cu un fluid dielectric sau slab conductor de curent electric, inevitabil va duce la interacțiuni EHD sau la convecție electrică [23, 26, 99]. Însă principiul care stă la baza filtrării electrice constă în interacțiunea directă a câmpului electric cu particulele de impurități (dispersii) din lichid, care trebuie să fie eliminate [1,2]. Aceste interacțiuni la rândul lor fiind de natură unică (coulombiană), au propriul specific electric: pur coulombian ($\mathbf{F_1} = q \cdot \mathbf{E}$) sau "dielectric", datorită structurii dipolare a moleculelor [$\mathbf{F_2} = (\mathbf{p} \cdot \nabla)\mathbf{E}$]. De aceea, procesul de separare a fazei solide de cea lichidă depinde și de tipul câmpului exterior (omogen, ne omogen, variabil, constant), dar și de tipul impurităților: dielectrice, conductoare sau semiconductoare. De menționat este faptul că, în linii generale, este vorba nu numai de "impurități", ci și de o separare oarecare a mediilor eterogene, de exemplu, la efectuarea analizelor sanguine în medicină, biologie [119].

Sub acțiunea forțelor sus-menționate, particulele de impurități se deplasează în direcția electrozilor de semn electric opus față de cel al particulelor, în cazul forțelor de primul tip sau în direcția câmpului ne omogen de intensitate maximă, în al doilea caz. Astfel, impuritățile într-un mod sau altul se depun pe suprafața electrozilor, fiind extrase din lichid, ca apoi să fie evacuate și din filtru, de regulă, prin spălarea acestuia cu soluții speciale. După cum reiese din cele menționate, electrozii pe care se depun impuritățile concomitent joacă și rolul de capcane, de aceea și se numesc astfel. Este necesar de a avea în vedere că capcanele pentru impurități în filtrele electrice au particularități constructive speciale pentru tipul dat de filtru (menirea acestuia). De obicei, acestea sunt confecționate sub formă de labirinturi pentru a avea o suprafață mai mare, dar și pentru fixarea mai durabilă a impurităților [100].

Rolul nominalizat al convecției electrice, de asemenea, este foarte important și anume sub două aspecte: pe de o parte, evident, acest fenomen dăunează separării, întrucât contribuie la amestecul mediului, iar pe de altă parte, fluxul EHD (electroconvectiv) poate servi drept mijloc de transfer al particulelor disperse spre capcanele electrice. Anume în aceasta și constă rolul primordial al fenomenelor EHD în procesele de filtrare electrică.

În cele ce v-a urma, sunt descrise filtrele electrice utilizate pentru diverse lichide și tipuri de impurități, care diferă prin construcție. Însă toate se referă la epurarea lichidelor dielectrice:

uleiuri de transformator; de mașini; vegetale; țițeiuri; solvenții organici; diferite impurități insolubile (particule solide, picături, praf etc.) ce pot fi utilizate în diverse domenii: energetică, industria alimentară, construcția de mașini, industria electrotehnică și radioelectronică, tehnologia petrochimică.

2.1.2. Particularități constructive generale

În experimentele – pilot, drept platou de lucru au servit diverse filtre electrice, în linii generale, reprezentând o chiuvetă din sticlă organică în formă de paralelipiped (cu anumite dimensiuni) sau un cilindru (în unele cazuri) cu racorduri de ieșire și intrare, instalate în interiorul electrozilor (de înaltă tensiune, având contact cu pământul), conectați corespunzător la sursa de înaltă tensiune și la circuitul contactului cu pământul, precum și la capcanele pentru impurități.

Ca electrod de înaltă tensiune a servit un segment de conductor de cupru cu diametrul de 2 *mm*, și lungime 12 *cm* cu un înveliş dielectric *perforat*, conectat la polul negativ al sursei de înaltă tensiune și fixat pe capacul chiuvetei, pe când drept electrod de contact cu pământul a servit o placă de metal instalată pe adâncul chiuvetei.

O atenție sporită s-a acordat construcției capcanelor pentru impurități, în acest scop fiind utilizate: un șir de electrozi alternativi cu plăci (convențional este numit filtrul electric nr. 1, figura 2.1), din care cele pozitive au fost legate la pământ; mai multe plăci dielectrice, amplasate orizontal (filtrul electric nr. 2) sau vertical (filtrul electric nr. 3), formând o distanță între ele; o placă dielectrică cu găuri (filtrul electric nr. 4), amplasată pe un electrod plat; un șir de plăci metalice, paralele electrodului plat, izolate de electrod, dar și unul de altul (filtrul electric prezentat în figura 2. 2).

La elaborarea construcției filtrului electric s-a urmărit scopul ca în el să aibă loc curgerea electroconvectivă a lichidelor aceasta fiind necesară pentru transportarea rapidă a impurităților spre capcane și asigurarea condițiilor pentru o fixare mai durabilă a impurităților în capcane. Acest scop a fost atins prin utilizarea electrodului cu un înveliş dielectric perforat [30], însă curățarea, într-o măsură oarecare, depindea de semnul electrodului de tensiune înaltă. Dacă va fi utilizată ceara în calitate de impurități, iar uleiul de floarea soarelui - de fază portantă, polaritatea negativă a electrodului de înaltă tensiune va fi mai preferabilă.

Alte scopuri – fixarea impurităților în capcane, adică realizarea efectelor structurale și a depunerilor au fost atinse, utilizând capcane cu suprafețe dezvoltate și cu labirinte, însă cu o rezistență hidraulică mică, constând din elemente conductoare (cu potențial flotant) și elemente semiconductoare. Toate construcțiile nominalizate, într-o măsură sau alta, corespund acestor

cerințe. Totuși, după cum s-a stabilit ulterior, cel mai eficient s-a dovedit a fi filtrul electric, la care au fost utilizați, în calitate de capcană, electrozi intermediari cu potențiali flotanți. În continuare sunt descrise filtrele electrice particulare, protejate prin brevete de invenție.

2.1.3. Filtre electrice utilizate în cercetare

Sunt descrise trei filtre electrice, care având principii de funcționare comune, dispun de propriile particularități constructive. Toate au fost testate pe cale experimentală și brevetate [95, 96, 97]. În urma mai multor probe experimentale s-a ajuns la concluzia că, în cercetările ulterioare, este suficient de a utiliza doar unul, cel mai eficient, cu numărul convențional 5.

2.1.3.1. Filtru electric 1 [95]

E cunoscut filtrul electric [1], care constă din doi electrozi plan-paraleli, pe părțile inferioare ale cărora sunt lipite plăci poroase dielectrice, care rețin impuritățile mecanice, ce pătrund pe acestea.

Dezavantajele acestui dispozitiv constă în aceea că particulele de impurități fiind încărcate nimeresc pe plăcile poroase, unde se rețin. În dispozitivul respectiv nu este prevăzută încărcarea cu sarcină și pe plăci nimeresc particulele ce au obținut sarcină incidental ca rezultat al fluctuațiilor din straturile de lichid adiacente colectoarelor, ceea ce duce la reducerea eficacității procesului de epurare. Pe lângă aceasta, la dispozitivul respectiv trebuie schimbate periodic plăcile poroase, pe măsura îmbibării acestora cu particule de impurități.

Mai este cunoscută construcția filtrului electric, care constă dintr-o chiuvetă dielectrică, parțial umplută cu lichid tratat, pe partea inferioară a căreia este amplasat electrodul de legare unit la pământ, iar deasupra suprafeței libere a lichidului sunt amplasați doi electrozi cu ace, conectați la sursa de înaltă tensiune. Datorită descărcării prin efect coronă, electrozii cu ace electrizează lichidul și creează condiții pentru transportarea impurităților sub acțiunea forțelor electrostatice și separarea particulelor de impurități de la faza portantă [101].

Dezavantajul dispozitivului respectiv constă în faptul că lipsesc colectoarele (capcanele) pentru impurități, în care particulele ar fi menținute. Curgerile electroconvective antrenează particulele de impurități, astfel împiedică localizarea acestora și, corespunzător, procesul de separare. În plus, electrozii de coronare amplasați în aer, complică construcția dispozitivului, iar descărcarea prin efect coronă duce la formarea ozonului, oxidarea lichidului tratat și a elementelor constructive ale filtrului electric.

Este cunoscută și construcția filtrului electric, fiind cea mai apropiată soluție care include: o chiuvetă; racorduri de admisie și evacuare; electrozi alternanți, care formează între ei colectoare pentru impurități; canal pentru refularea lichidului. În acest dispozitiv, drept capcane pentru impurități servesc interstițiile dintre electrozi [120]. Dezavantajul dispozitivului constă în faptul că lipsește mecanismul de încărcare a particulelor și de transportare a acestora în direcția capcanelor, astfel încât în capcane nimeresc particulele din straturile de lichid adiacente; în plus, în interstițiul dintre electrozi are loc convecția electrică, care împiedică localizarea în capcane a particulelor de impurități. Toate acestea reduc eficacitatea procesului de epurare. Însă scopul invenției constă tocmai în majorarea eficacității.

Filtrul electric pentru lichide (figura 2.1.) include o chiuvetă, racorduri de admisie și evacuare, electrozi alternanți, care formează între ei colectoare pentru impurități, canal pentru refularea lichidului, în care este amplasat emitorul - un electrod cu înveliş dielectric perforat.

Prezența electrodului cu înveliş dielectric perforat, amplasat în fluxul exterior de lichid, asigură încărcarea electrică a acestuia și a curgerilor electroconvective ("vântul ionic") suficient de efective pentru transportul impurităților spre colectoare, unde vor fi captate. În figura 2.1 este prezentată schema filtrului electric [95]:



Fig. 2.1. Filtru cu capcane metalice

1 – chiuveta; racordurile de admisie 2 și de evacuare 3; 4, 5 - electrozii alternanți, care formează între ei colectoarele de impurități 6; 7 - canalul pentru refularea lichidului; 8 - emitorul cu înveliș dielectric perforat.

Cu săgeți este indicată direcția de refulare a lichidului și a curgerilor electroconvective.

Filtrul funcționează în modul următor. La umplerea cu lichid și aplicarea tensiunii înalte la emitorul 8 și electrozii 5 de aceeași polaritate are loc electrizarea lichidului și sub acțiunea forțelor coulombiene apar curgeri electroconvective în direcția de la emitorul 8 spre electrozii 4 și 5 și colectoarele 6 - interstițiile dintre electrozi, unde ca un rezultat al acțiunii dipol-dipol ale particulelor de impurități, acestea se localizează, astfel se efectuează epurarea lichidului.

Eficacitatea de epurare a filtrului propus, fiind determinată ca raport dintre concentrația remanentă de impurități și cea inițială într-o unitate de timp, este de două ori mai înaltă decât în soluția cea mai apropiată.

2.1.3.2. Filtrul electric 2 [96]

Dispozitivul (figura 2.2) constă dintr-o chiuvetă cu racorduri de admisie și evacuare, în care sunt amplasați doi electrozi marginali și un grup de electrozi intermediari cu potențial flotant, care servesc în calitate de capcane pentru impurități [96].

Prezența electrozilor cu potențial flotant duce la reducerea intensității convecției electrice, ceea ce poate majora substanțial eficiența epurării, însă faptul că nu sunt prevăzute mijloace și căi de transportare a impurităților spre capcane, diminuează eficacitatea procesului de epurare.

Invenția soluționează următoarea problemă - un electrod este amplasat în partea de jos a chiuvetei și este executat în formă de placă legată la pământ, iar cel de-al doilea - în partea de sus, efectuat în formă de tijă cilindrică cu înveliş dielectric perforat, iar electrozii intermediari sunt confecționați ca rame dreptunghiulare, amplasate orizontal, izolate la două capete cu izolatori atât între ei, cât și de electrodul amplasat în partea de jos a chiuvetei.

Rezultatul constă în îmbunătățirea eficacității procesului de epurare, ridicarea fiabilității și randamentului filtrului electric. Prezența învelișului dielectric pe unul dintre electrozii marginali asigură electrizarea mediului și acțiunea forțelor coulombiene asupra acestuia, iar confecționarea electrozilor intermediari în formă de rame dreptunghiulare asigură transportul particulelor de impurități în interstițiul dintre electrozi și sedimentarea acestora pe electrozi, fapt ce sporește eficacitatea procesului de epurare. În figura 2.2 este prezentată schema filtrului electric, care constă din chiuveta 1 cu racord de admisie 2 și racord de evacuare 3, doi electrozi 4 și 5, primul cu înveliș dielectric perforat, între electrozii 4 și 5 este amplasat un grup de electrozi intermediari 6, la capete izolați de la electrodul 5, amplasat în partea de jos a chiuvetei și, între ei, prin izolatorii 8. Cu săgeți este indicată direcția de evacuare a lichidului și a curgerilor electroconvective. Principiul de funcționare constă în următoarele. Când este umplut cu lichid și aplicată diferența de potențial la electrozii 4 și 5, în apropierea electrodului 4, datorită prezenței învelişului dielectric perforat, are loc electrizarea lichidului şi, sub acțiunea forțelor coulombiene în lichid, apar curgeri electroconvective circulare, în direcția de la electrodul de tensiune înaltă 4 prin orificiile 7 și interstițiile dintre electrozii 6; în plus, electrozii 6 obțin un anumit potențial flotant datorită izolării de la electrozii marginali și între ei cu izolatorii 8 și, totodată, servesc drept capcane pentru impurități, în care particulele se sedimentează pe suprafețele acestora.



Fig. 2.2. Filtru combinat

1- chiuveta; 2-racord de admisie; 3-racord de evacuare; 4, 5-electrozi; 6- electrozi intermediari; 7-orificii; 8-izolatori.

Prezența grupului de electrozi 6 mărește suprafața capcanelor, însă deoarece potențialul electrozilor 6 este flotant, turbulența lichidului este mare, ceea ce favorizează sedimentarea pe electrozi a particulelor de impurități.

2.1.3.3. Filtrul electric 3 [97]

Acest filtru este similar cu cele precedente, însă e modificat după cum urmează a fi descris. Filtrul nu a fost supus unor cercetări, fiind doar numai testat pe cale experimentală și acceptat pentru utilizare în perspectivă. Dezavantajul dispozitivelor examinate constă în faptul că nu poate fi utilizat rațional spațiul de deasupra emiterului cu înveliş dielectric perforat. De asemenea, nu s-a planificat la nivelul necesar aplicarea câmpului electric de-a lungul direcției de mişcare a lichidului de la racordul de admisie spre cel de evacuare, nu există gradientul de schimbare a tensiunii câmpului electric, ceea ce duce la diminuarea eficacității epurării în direcția mişcării lichidului.

Această problemă poate fi soluționată, doar dacă filtrul este confecționat dintr-un corp metalic cilindric legat la pământ, figura 2.3 [97].

În partea inferioară și superioară se află racorduri de admisie și de evacuare a lichidului, electrodul cilindric de tensiune înaltă cu inele dielectrice perforate și electrozi inelari amplasați coaxial, uniți prin intermediul unor lamele elastice de contact cu corpul filtrului. Între electrozii inelari sunt instalate aripioare dielectrice plane, formând secțiuni, constituite din trei aripioare dielectrice și doi electrozi inelari.

Aripioarele dielectrice și electrozii inelari sunt dotați cu ferestre, prevăzute de-a lungul corpului. Inelele dielectrice perforate sunt amplasate vizavi de electrozii inelari, totodată, distanța dintre aripioarele dielectrice și electrozii inelari în interiorul fiecărei secțiuni se micșorează în direcția racordului de evacuare.



Fig. 2.3. Filtrul cilindric

1 – corp cilindric, 2, 3 – respectiv, racord de admisie și de evacuare, 4 - electrod cilindric de înaltă tensiune, 5 - electrozi inelari, 6 - inele dielectrice perforate, 7- aripioare dielectrice plane, 8- secțiuni constituite din trei aripioare dielectrice și doi electrozi inelari, 9 – ferestre.

Confecționarea corpului cu interstiții inelare între electrozi este tehnologic avantajos din punct de vedere al tehnicii securității și funcționării fiabile a dispozitivului. Amplasarea racordurilor pe fețele corpului asigură refularea lichidului de-a lungul acestuia, ceea ce echivalează cu procesul ciclic de epurare în toate secțiunile dispozitivului, ducând la creșterea eficacității procesului în ansamblu. Prezența inelelor pe electrodul cilindric conectat la sursa de tensiune înaltă și a învelișului dielectric perforat pe acestea, creează un câmp electric puternic neomogen, care favorizează electrizarea mediului și duce la intensificarea proceselor de transportare și sedimentare a impurităților.

Amplasarea aripioarelor în secțiuni asigură transportarea transversală a lichidului, localizează impuritățile în secțiuni și mărește eficacitatea procesului de epurare. Utilizarea inelelor învelite cu dielectric perforat sporește eficacitatea procesului de separare a amestecului în urma încărcării pe suprafața electrodului și a lichidului și, totodată, reduce posibilitatea străpungerii electrice, sporind eficiența procesului de epurare. Prezența electrozilor metalici legați la pământ asigură curgerea sarcinilor și menținerea câmpului electric stabil.

Folosirea inelelor cu înveliş dielectric perforat pe electrodul conectat la sursa de tensiune înaltă și a doi electrozi legați cu pământul permite circulația lichidului în secțiuni, ceea ce duce la umplerea totală a interstițiului dintre aripioare, asigurând filtrului un volum de funcționare mai mare. Deoarece electrodul legat cu pământul este amplasat mai jos de aripioarele dielectrice, posibilitatea de străpungere electrică este redusă, și crește fiabilitatea funcționării filtrului. Reducerea distanței dintre aripioarele dielectrice și electrozii legați la pământ în direcția racordului de admisie spre cel de evacuare permite optimizarea procesului de epurare, atât în partea de admisie, cât și în cea de refulare a filtrului, deci, în întreg volumul filtrului.

Posibilitatea schimbului poziției aripioarelor permite identificarea schemei geometrice optime de amplasare a acestora pentru fiecare lichid și, totodată, asigură simplitatea regenerării.

Schema dispozitivului este prezentată în figura 2.3. Filtrul constituie un corp cilindric metalic legat cu pământul 1, având în părțile inferioară și superioară racorduri de admisie 2 și evacuare 3 a lichidului, electrod cilindric de tensiune înaltă 4 cu inele dielectrice perforate 6, și electrozi inelari 5, amplasați coaxial, uniți prin intermediul unor lamele elastice de contact cu corpul 1. Între electrozii inelari 5 sunt instalate aripioare dielectrice plane 7, formând secțiuni 8, constituite din trei aripioare dielectrice 7 și doi electrozi inelari 5. Aripioarele dielectrice perforate 6 sunt amplasate vizavi de electrozii inelari 5. Distanța dintre aripioarele dielectrice 7 și electrozii inelari 5 în interiorul fiecărei secțiuni 8 se micșorează în direcția racordului de evacuare 3.

Filtrul funcționează în felul următor. Când este umplut cu lichid și se aplică tensiune înaltă, are loc electrizarea lichidului și a particulelor de impurități. Sub acțiunea forțelor coulombiene și datorită prezenței ferestrelor 9 în aripioarele 7, electrozii 5 și în secțiunile 8 are loc circulația lichidului. Totodată, din cauza utilizării aripioarelor dielectrice plane 7, ce exclude reîncărcarea particulelor de impurități, acestea se sedimentează pe aripioarele 7. Dat fiind faptul că interstițiile dintre aripioarele 7 și ale electrodului 5, legate la pământ, sunt mari, nu se produce străpungerea electrică în partea de admisie a filtrului, unde concentrația particulelor de impurități este înaltă. Grație interstițiilor mici dintre aripioarele 7 din partea de refulare, are loc epurarea intensivă a lichidului, în care concentrația impurităților este mică. Toate acestea permit utilizarea rațională a întregului volum al filtrului, asigurând preliminar epurarea de impurități cu dimensiuni mari și funcționarea fiabilă în partea de admisie a lichidului și epurarea fină a lichidului în partea de refulare la ieșirea din filtru.

Dispozitivul a fost testat la epurarea uleiului de transformator de impurități - de oxid de crom cu dimensiuni medii de circa 50 µm. Concentrația inițială a impurităților constituia $\varphi_0 = 0,073\%$, concentrația remanentă după o durată de prelucrare de 30 min. nu depășea $\varphi_0 = 0,002\%$, cea mai apropiată soluție φ_0 fiind egală cu 0,02 %.

2.2. Standul experimental și metodica cercetărilor

2.2.1. Standul experimental

Standul experimental și metodica cercetărilor este în conformitate cu publicația [100]. Schema standului este prezentată în figura 2.4 și include: filtru electric 1, vas sub presiune 2 cu lichid examinat; conectat la intrare în filtru cu furtunul 3 și ventilul 4. Racordul de ieșire al filtrului electric este cuplat prin furtunul 7 și ventilul *5 la celula optică de măsurare 6 a calorimetrului* (în figura 2.4 nu este prezentată). Electrodul filtrului electric de înaltă tensiune s-a conectat la polul negativ al sursei de înaltă tensiune SÎT-50 și kilowattmetrul C-96, iar în circuitul contactului cu pământul a filtrului a fost conectat microampermetru.



Fig. 2.4. Schema standului experimental.

1- filtru electric; 2 – vas cu suspensie; 3, 7 – furtuni de cuplare; 4 și 5 - ventile; 6 – chiuvetă pentru măsurarea optică.

2.2.2. Metodica efectuării cercetărilor experimentale

Experimentele de bază au fost efectuate în următoarea ordine succesivă. În primul rând au fost pregătite mediile de lucru. La curățarea uleiului de floarea-soarelui de ceară - se pregăteau suspensiile corespunzătoare sub formă de bile de ceară de mărime microscopică de diverse concentrații, ce au fost stabilite în baza metodicii cunoscute deja [121] după densitatea optică a acestora cu ajutorul calorimetrului fotoelectric de concentrație KΦK 2. Menționăm, că această metodică e aplicabilă nu doar în cazul epurării uleiului de floarea soarelui de particule de ceară [122-125], dar și a altor lichide de diverse impurități [126-136], în particular, al uleiului de transformator de impurități dielectrice, semiconductoare și conductoare de curent electric [136].

Conform rezultatelor obținute, a fost determinată dependența concentrației la ieșirea din filtrul electric $\varphi(t)$ sau concentrația relativă la ieșire $\varphi^*(t) \equiv \varphi/\varphi_0$, unde φ_0 este concentrația la intrarea în filtrul electric.

Experimentele s-au desfășurat în două regimuri: hidrostatic - când amestecul, cu porțiuni (într-o singură celulă) a fost procesat cu câmp electric cu ventilele 4 și 5 închise și în regim de flux – cu ventilele deschise, când lichidul cu jet continuu curgea uniform din chiuveta experimentală. În ambele cazuri probele lichidului prelucrat au un volum cu mult mai mic decât volumul celulei (probele fiind prelevate peste fiecare 5 minute).

De subliniat, că în regim de flux, din cauza debitului mic în comparație cu volumul general al celulei, deosebiri esențiale în urma experiențelor efectuate nu au fost observate, în comparație cu regimul static.

Inițial, ne-am propus să clarificăm influența particularităților constructive ale filtrului electric asupra capacității de filtrare pentru a găsi o construcție optimă, cu toate că soluționarea acestei probleme, după cum se pare, nu este clară în totalitate, deoarece depinde și de proprietățile fizice ale lichidului curățat. Dar, totuși, după cum au arătat experientele, din multiplele construcții geometrice și fizice analoage pentru acest lichid se poate de selectat o variată optimă.

2.3. Rezultatele obținute

2.3.1. Influența construcției electrofiltrelor asupra procesului de epurare

În figura 2.5 sunt prezentate dependențele relative $\varphi * (t) \equiv \varphi / \varphi_0$, obținute la utilizarea filtrelor electrice cu capcane de diverse construcții, care au demonstrat că eficiența de curățare în condiții similare, depinde esențial de factorii constructivi ai filtrelor electrice, în general, și de capcanele pentru impurități, în special.

Au fost examinate cinci filtre electrice, nr.1 - nr. 5, a căror particularități constructive au fost menționate. În toate filtrele cercetate, într-o măsură sau alta, se observă efectul de curățare electrică a lichidului, deși în unul dintre ele și, anume: în nr. 1 (figura 2.5, curba 4), după un interval de cinci minute s-a constatat creșterea concentrației $\varphi^*(t) \equiv \varphi/\varphi_0$ cu timpul. În primul rând, aceasta denotă că un asemenea filtru electric poate fi recomandat pentru procese de curățare inițială, de scurtă durată. În al doilea rând, este clară cauza direcției acestei dependențe $\varphi^*(t)$. Particulele de impurități, încărcate negativ în câmpul electrodului negativ de înaltă tensiune "coronă", se depun pe electrodul de metal pozitiv sau pe plăci metalice neutre (cu potențial flotant). În scurt timp, la $t \sim 5$ minute, stratul de eterosarcină, ce s-a format pe capcanele

cu aripioare, într-o mare măsură ecranează câmpul electric exterior și procesul de curățare se reduce. Este necesar de accentuat, că creșterea concentrației, cu timpul, nu este tipică pentru filtrul electric nr. 1 (figura 2.1), dar se observă doar la anumite diferențe de potențiale între electrozi.

Mai eficient este filtrul electric nr. 5 (figura 2.2), care, în primul rând, asigură dezvoltarea suprafețelor capcanelor (un număr mare de electrozi intermediari cu suprafețe mari) cu potențialul lor flotant, ce exclude amestecarea intensivă electroconvectivă a lichidului în interiorul capcanelor și, totodată, favorizează sedimentarea stabilă pe acestea a particulelor de impurități.



Fig. 2.5. Dependența raportului concentrației reziduale inițiale de timpul de procesare pentru diverse construcții de filtre electrice.

1 – filtru electric nr. 2; 2 – filtru electric nr. 4; 3 – filtru electric nr. 3; 4 – filtru electric nr. 1; 5 – filtru electric nr. 5.

Din rezultatele obținute rezultă că electrosepararea este condiționată, în special, de depunerea impurităților pe suprafețele încărcate ale capcanelor și, într-o măsură mai mică – de structurare. De exemplu, în cazurile cu capcanele confecționate din material dielectric (filtrele electrice nr. nr. 2, 3, 4), ce joacă rolul de carcasă, cu o structură de consolidare, curățarea efectivă s-a dovedit a fi mai inferioară decât în filtrele electrice, prevăzute pentru depunerea impurităților datorită electrizării acestora (filtrele electrice nr. 1 și nr. 5). Deoarece cel mai eficient s-a dovedit a fi filtrul electric nr. 5, cercetările experimentale ulterior au fost desfășurate anume pe acest filtru electric.

2.3.2. Influența tensiunii electrice asupra procesului de epurare

În figura 2.6 sunt prezentate curbele $\varphi(t)$ la diferite tensiuni în regim de flux cu debitul de Q=10 ml/min , care de fapt sunt exponente "secționate", legate cu o încetare aproape bruscă a procesului de curățare la $t = t_0 \approx (20 \div 25)$ minute, *ceea ce pare credibil, deoarece la circulația rapidă* a lichidului (debit mare), acesta poate să nu reușească să fie "procesat". Însă, ipoteza trebuie să fie confirmată. După cum vom vedea în continuare, există și alte cauze care explică
fenomenul stopării totale a curățării cu timpul, în special, legate de ecranarea câmpului exterior (vezi p. 3.2). Mai mult ca atât, poate că nu într-o așa măsură, dar asemenea regularități se observă și în regimurile hidrostatice de curățare.



Fig. 2.6. Dependența concentrației reziduale de timpul procesării pentru suspensii uleiului de floarea-soarelui - ceară (0,5 %); U, 10³ V: 1 -9; 2 -15; 3 - 18; 4 -20; 5-23.

În figura 2.6 se observă o influență esențială a tensiunii câmpului electric asupra procesului de curățare electrică, anume spre intensificarea acestuia. Forma generală a curbelor și direcția acestora cere generalizarea în termeni de similaritate. Totuși, este necesar de a cunoaște tabloul fizic al procesului respectiv și explicarea ulterioară a acestor criterii.

În figura 2.7 este reprezentată dependența raportului concentrației inițiale de concentrația remanentă. Se observă că graficul acestei dependențe în medie reprezintă o linie dreaptă paralelă la axa φ_0 .

2.3.3. Separarea prin metoda de trepte

Cauza diminuării concentrației, în funcție de timp, în filtrul electric constă în ecranarea câmpului electric exterior de către impuritățile, ce se depun pe electozii-capcane ai filtrului. Pentru ameliorarea procesului de epurare se cere curățarea periodică a filtrului electric, de altfel, ca și al unui oricare alt filtru. Dat fiind faptul că impuritățile au semn electric opus față de cel al electrodului pe care se depun, această curățare se efectuează prin o comutare simplă a polarității tensiunii la celula de lucru, în rezultatul căreia impuritățile sunt brusc "scuturate" de pe electrozii-capcane, apoi evacuate prin spălarea filtrului cu o soluție specială. După fiecare procedură de curățare a filtrului, procesul începe cu epurarea porțiunii de lichid care a fost deja filtrată, concentrația inițială a căreia este cea finală a porțiunii date. Perioada de timp dintre două curățări consecutive ale filtrului se va numi ciclu de epurare sau treaptă.

Pe cale experimentală (figura 2.7) s-a constatat că raportul concentrației inițiale φ_0 față de cea finală, adică remanentă (la infinit) φ_{∞} este o mărime aproximativ constantă, una și aceiași pentru toate ciclurile ("constanta filtrului"- C)



Fig. 2.7. Dependența raportului concentrației inițiale față de cea remanentă.

Plecând de la definiția concentrației:

$$\frac{\varphi_0}{\varphi_{\infty_1}} = \frac{\varphi_{\infty_1}}{\varphi_{\infty_2}} = \frac{\varphi_{\infty_2}}{\varphi_{\infty_3}} = \dots = \frac{\varphi_{\infty_n}}{\varphi_{\infty_{n+1}}} \equiv C,$$

Se poate arăta că

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{C^n},$$

n fiind numărul de cicluri.

În figura 2.8, ca exemplu este reprezentat graficul epurării în trepte a uleiului de floarea - soarelui de impuritățile din ceară prin n=3 trepte.



Fig. 2.8. Epurarea suspensiei "floarea-soarelui – ceară" în trei cicluri.

Se observă că perspectiva epurării prin metoda treptelor constă în aceea că gradul de epurare nu este limitat și concentrația remanentă poate fi chiar foarte mică conform relației de mai sus.

2.4. Generalizarea datelor experimentale în funcție de timp și tensiunea electrică

La generalizarea rezultatelor experimentale se remarcă două circumstanțe importante. În primul rând, dependența din figura 2.6 la sectoarele inițiale ale acestora poartă un caracter exponențial de diminuare. În al doilea rând, când t $\rightarrow\infty$, după cum a fost menționat $\varphi(t)$ nu tinde către propria limită nulă, dar spre o oarecare valoare $\varphi_{\infty} \neq 0$. Acest rezultat permite de a prezenta curbele din figura 2.6 în formă exponențială,

$$\frac{\varphi - \varphi_{\infty}}{\varphi_0 - \varphi_{\infty}} = \exp(-\alpha \cdot t) , \qquad (2.1)$$

unde α este o anumită constantă pozitivă, după cum este prezentată în [102], care poate fi o funcție pătratică de tensiune $\alpha \sim U^2$. Dependența (2.1), cu toate că reflectă un caracter general al curbelor figurii 2.6, nu este o curbă trunchiată. Aceasta probabil ar fi expresia:

$$\phi^{*}(t) \equiv \frac{\varphi - \varphi_{\infty}}{\varphi_{0} - \varphi_{\infty}} \equiv \frac{\varphi^{*} - \varphi_{\infty}^{*}}{1 - \varphi_{\infty}^{*}} = \begin{cases} e^{-\alpha t}, & 0 \le t \le t_{0}, \\ e^{-\alpha t_{0}} \equiv \phi_{\infty}^{*}, & t > t_{0} \end{cases}$$
(2.2)

unde este introdusă o notație nouă $\phi^*(t)$ pentru partea stângă (2.1) și $\phi^*_{\infty} \equiv \varphi_{\infty}/\varphi_0$.

Parametrii t_0 și ϕ_{∞}^* pot fi stabiliți direct din datele experimentale. Pentru găsirea parametrului principal α , este necesar ca aceste date să fie prelucrate. Vom examina două modele de prelucrare; primul – cu un singur parametru, dependența stabilită anterior $\alpha \sim U^2$, al doilea – cu doi parametri.

2.4.1. Modelul cu un parametru $\alpha \sim U^2$

La epurare, limitând timpul până la t=20 minute din relațiile (2.1), (2.2) obținem

$$K = \frac{1}{t \cdot U^2} \cdot \ln \frac{\varphi_0 - \varphi_\infty}{\varphi - \varphi_\infty} = \text{const}, \ (0 < t \le 20) \text{ minute},$$
(2.3)

unde K – notație generală a expresiei (2.3), constantă, așa cum urmează din relația (2.1).

Această relație poate fi prezentată sub forma unei dependențe liniare de tipul

$$Y = \frac{1}{U^2} \cdot \ln \frac{\varphi_0 - \varphi_\infty}{\varphi - \varphi_\infty} = K \cdot t , \quad (0 \le t \le 20) \text{ minute.}$$
(2.4)

În tabelul 2.1 sunt prezentate datele experimentale, ce corespund graficului din figura 2.6, în care primul rând arată denumirea (cu litere mici latine) coloanelor, cu aliniatele noi se termină datele după unele curbe pentru intervalele temporare de la 5 până la 20 minute (ultimul aliniat). În tabelă sunt punctate concentrațiile relative $\varphi^*(t) \equiv \varphi(t)/\varphi_0$. Timpul limitat de prelucrare a datelor

până la (20 ÷ 25) minute se explică prin faptul că, în această perioadă de timp, practic se termină acțiunea câmpului electric asupra procesului de curățare. Scăderea ulterioară a concentrației impurităților în timp, după cum s-a menționat și se vede din graficele prezentate în figura 2.5 (cu excepția curbei 4) și în figura 2.6, de fapt încetează. Mai jos de tabelă sunt prezentate semnele tensiunii adimensionale U_* , raportată la tensiunea primei curbe (9 κ V), precum și a concentrației la (φ_{∞}^*), raportate la concentrația inițială, unica pentru toate curbele, $\varphi_0 = 0,5\%$. În tabel sunt prezentate concentrațiile relative: $\varphi^*(t) \equiv \varphi(t) / \varphi_0$.

	Α	b	С	d	Ε	f	G	Η	Ι	j
n/ d	t, min	U_*^{2}	tU_*^2	$arphi^{*}$	1- $arphi_{\!\infty}^*$	$arphi^*$ - $arphi^*_\infty$	e/f	lng	K=h/c	$\overline{Y_i} = \overline{K}_i \cdot$
1	5	1	5	0,80	0,73	0,53	1, 38	0,32	0,06	0,40
2	10	1	10	0,62	0,73	0,35	2,35	0,74	0,07	0,80
3	15	1	15	0,46	0,73	0,19	3,84	1,35	0,09	1,20
4	20	1	20	0,38	0,73	0,11	6,64	1,89	0,09	1,60
5	5	2,78	13,90	0,62	0,78	0,400	1,95	0,67	0,05	0,30
6	10	2,78	27,79	0.41	0,78	0,19	4,11	1,41	0,05	0,60
7	15	2,78	41,69	0,28	0,78	0,06	13,00	2,56	0,06	0,90
8	20	2,78	55,58	0,24	0,78	0,02	39,00	3,66	0,07	1,20
9	5	4	20	0,43	0,84	0,27	3,11	1,13	0,06	0,25
10	10	4	40	0,26	0,84	0,10	8,40	2,13	0,05	0,50
11	15	4	60	0,22	0,84	0,06	14,00	2,64	0,04	0,75
12	20	4	80	0,17	0,84	0,01	84,00	4,43	0,06	1,00
13	5	4,94	24,69	0,34	0,92	0,26	3,54	1,26	0,05	0,20
14	10	4,94	49,37	0,22	0,92	0,14	6,57	1,88	0,04	0,40
15	15	4,94	74,06	0,16	0,92	0,08	11,50	2,44	0,03	0,60
16	20	4,94	98,74	0,13	0,92	0,05	18,40	2,91	0,03	0,80
17	5	6,53	32,67	0,24	0,96	0,20	4,80	1,57	0,05	0,20
18	10	6,53	65,33	0,12	0,96	0,08	12,00	2,48	0,04	0,40
19	15	6,53	98,00	0,10	0,96	0,06	16,00	2,77	0,03	0,60
20	20	6,53	130,7	0,07	0,96	0,03	32,00	3,47	0,03	0,80

Tabelul 2.1 Dependența $\varphi^*(t)$ în corespundere cu figura 2.6.

U*=U/9; U*₁=1; U*₂=15/9=1,667; U*₃=18/9=2; U*₄=20/9=2,222; U*₅=23/9=2,556 $\varphi_{\infty 1}^* = 0,27; \ \varphi_{\infty 2}^* = 0,22; \ \varphi_{\infty 3}^* = 0,16; \ \varphi_{\infty 4}^* = 0,08; \ \varphi_{\infty 5}^* = 0,04; \ \overline{K}_1 = 0,08; \ \overline{K}_2 = 0,06; \ \overline{K}_3 = 0,05; \ \overline{K}_4 = 0,04; \ \overline{K}_5 = 0,04, \ s^{-1}$

În plus, sunt prezentate valorile medii aritmetice ale parametrului K_i (i=1,...,5) cu precizie de sutimi pentru toate cele cinci curbe, figura 2.6.

După cum se vede din tabelul 2.1, parametrul K_i, în pofida așteptărilor, nu are valoare constantă, dar are tendința spre creștere în funcție de timp la început, apoi spre descreștere, concluzie confirmată ulterior (p. 2.2). În figura 2.9 sunt prezentate graficele dependenții $\overline{Y_i} = \overline{K_i} \cdot t$ (i=1, 2, 3, 4, 5).



Fig. 2.9. Dependența concentrației generalizate Y de timp t.

După cum rezultă din figura dată, aceste dependențe sunt separate nesemnificativ. În scopuri practice se poate lua în calcul dependența medie generalizată cu coeficientul unghiului de grup mediu $\overline{K} = (0,08+0,06+0,05+2\cdot0,04)/5 \approx 0,05$, obținându-se relația:

$$Y = 0,05 \cdot t$$
 (2.5)

Această relație poate fi utilizată în scopuri practice pentru estimarea orientativă a influenței timpului în procesul de curățare electrică.

Următorul model este un model de precizare.

2.4.2. Modelul cu doi parametri

În acest model pentru indicele α se aplică, mai mult generală, deocamdată necunoscută, dependența

$$\alpha = \beta \cdot U_*^a, \tag{2.6}$$

unde β și α sunt parametri noi, iar β se exprimă în *s*⁻¹. Din relațiile (2.1) și (2.6) rezultă ecuația liniară:

$$y = ax + b$$
,

unde,

$$\ln \beta \equiv b; \ln U_* \equiv x; \ \ln(\frac{1}{t} \cdot \ln \frac{1 - \varphi_{\infty}^*}{\varphi^* - \varphi_{\infty}^*}) \equiv y,$$
(2.7)

necunoscuți fiind coeficienții *a* și *b, care se determină prin metoda* pătratelor minime și care verifică condiția de extremă

$$(y-ax-b)^2 \equiv F(a,b) = \min(a,b),$$

unde linia arată media după variabilele x, y. De aici, rezultă ecuația metodei pătratelor minime a regresiei liniare

$$\begin{cases} \partial F / \partial a = 0\\ \partial F / \partial b = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a \cdot \overline{x} + b = \overline{y}\\ a \cdot \overline{x^2} + b \cdot \overline{x} = \overline{xy} \end{cases};$$
(2.8)

$$\overline{x} = \sum_{i} x_{i} / n; \quad \overline{y} = \sum_{i} y_{i} / n; \quad \overline{x^{2}} = \sum_{i} x_{i}^{2} / n; \quad \overline{y^{2}} = \sum_{i} y_{i}^{2} / n; \quad \overline{x \cdot y} = \sum_{i} (x_{i} \cdot y_{i}) / n.$$
(2.9)

A doua soluție a sistemului (2.8) are un aspect general matricial,

$$X = A^{-1}B, (2.10)$$

unde A^{-1} este matricea inversă, celelalte matrice în (2.10) fiind:

$$X = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}; \ A = \begin{pmatrix} \overline{x} & 1 \\ \overline{x^2} & \overline{x} \end{pmatrix}; \ B = \begin{pmatrix} \overline{y} \\ \overline{xy} \end{pmatrix}.$$
 (2.11)

Valorile medii ale variabilelor x și y se determină în baza tabelului Excel,

$$\overline{x} = 0,588; \ \overline{x^2} = 0,452; \ \overline{y} = -1,804; \ \overline{xy} = -0,942.$$
 (2.12)

Tabelul 2.2. Valorile variabilelor x și y.

t, min	U*	x=lnB	x^2	φ^*	$1-\varphi^*_{\infty}$	$\varphi^* - \varphi^*_{\infty}$	e/f	lng	i/t	lnJ=y
5	1	0	0	0,8	0,73	0,53	1,38	0,32	0,064	2,749
10	1	0	0	0,62	0,73	0,35	2,35	0,74	0,074	2,604
15	1	0	0	0,46	0,73	0,19	3,84	1,35	0,09	2,408
20	1	0	0	0,38	0,73	0,11	6,64	1,89	0,095	2,354
5	1,667	0,511	0,261	0,62	0,78	0,4	1,95	0,67	0,134	2,01
10	1,667	0,511	0,261	0,41	0,78	0,19	4,11	1,41	0,141	1,959
15	1,667	0,511	0,261	0,28	0,78	0,06	13	2,56	0,171	1,766
20	1,667	0,511	0,261	0,24	0,78	0,02	39	3,66	0,183	1,698

5	2	0,693	0,48	0,43	0,84	0,27	3,11	1,13	0,226	1,487
10	2	0,693	0,48	0,26	0,84	0,1	8,4	2,13	0,213	1,546
15	2	0,693	0,48	0,22	0,84	0,06	14	2,64	0,389	0,944
20	2	0,693	0,48	0,17	0,84	0,01	84	4,43	0,222	1,505
5	2,222	0,798	0,637	0,34	0,92	0,26	3,54	1,26	0,252	1,378
10	2,222	0,798	0,637	0,22	0,92	0,14	6,57	1,88	0,188	1,671
15	2,222	0,798	0,637	0,16	0,92	0,08	11,5	2,44	0,125	2,079
20	2,222	0,798	0,637	0,13	0,92	0,05	18,4	2,91	0,146	1,924
5	2,556	0,938	0,88	0,24	0,96	0,2	4,8	1,57	0,314	1,158
10	2,556	0,938	0,88	0,12	0,96	0,08	12	2,48	0,248	1,394
15	2,556	0,938	0,88	0,1	0,96	0,06	16	2,77	0,185	1,687
20	2,556	0,938	0,88	0,07	0,96	0,03	32	3,47	0,174	1,749
SUMA		11,76	9,032							36,07
SUM/n		0,588	0,452				Xy	0,942		1,804

Pentru matricele numerice, inclusiv soluția X, din relațiile (2.11), (2.12) se stabilește:

$$A = \begin{pmatrix} 0,588 & 1\\ 0,452 & 0,588 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} -1,804\\ -0,942 \end{pmatrix}; A^{-1} = \begin{pmatrix} -5,534 & 9,411\\ 4,254 & -5,534 \end{pmatrix} => X = \begin{pmatrix} 1,118\\ -2,461 \end{pmatrix}.$$
 (2.13)

Coeficienții α și β au valorile după cum urmează $\alpha \approx 1,118 \approx 1,12$; $\beta = \exp(-2,461) = 0,085$ (s⁻¹). Prin urmare se obține:

$$Y(t) = \frac{1}{U_*^{1,12}} \cdot \ln \frac{1 - \varphi_{\infty}^*}{\varphi^* - \varphi_{\infty}^*} = 0,085 \cdot t \quad ,$$
(2.14)

care considerabil diferă de aproximația (2.5).

Anume ultima expresie generală trebuie verificată pe cale experimentală. Pentru aceasta modificăm tabelul 2.1, înlocuind U_*^2 prin $U_*^{1,12}$. Din tabel se observă că abaterea valorilor *K* de la media generală \overline{K}_{ex} =0,083 este mult mai mică, decât în cazul precedent (tabelul 2.1). În figura 2.9 sunt prezentate graficele dependențelor $K_i(t)$, i=1,...,5. În primul rând, se stabilește că toate punctele experimentale se grupează în vecinătatea constantei \overline{K}_{ex} =0,083. În al doilea rând, se evidențiază tendința de creștere a concentrației în timp la stadiile inițiale ale procesului de epurare și, invers, de diminuare la stadiile finale. Aceasta sugerează ideea despre existența unui maximum, adică a unei tensiuni optime de epurare, concluzie, care confirmată ulterior.

Faptul că media generală a parametrului K, obținută prin calculul statistic (0,085), cu exactitatea aproximațiilor matematice coincide cu media aritmetică a acestui parametru, găsită nemijlocit pe cale experimentală (0,083), ne vorbește de la sine, că acest model este cu mult mai exact, însă și acesta nu reflectă multe nuanțe fizice ale procesului de epurare.

	а	b	С	d	e	F	g	h	i
№	t, min	$U_{st}^{ m 1,12}$	$U_{*}^{1,12}$	φ^*	$1 - \varphi^*_{\infty}$	$\varphi^*-\varphi^*_{\infty}$	e/f	lng	K=h/c
1	5	1	5	0,8	0,73	0,53	1,38	0,32	0,06
2	10	1	10	0,62	0,73	0,35	2,09	0,74	0,07
3	15	1	15	0,46	0,73	0,19	3,84	1,35	0,09
4	20	1	20	0,38	0,73	0,11	6,64	1,89	0,09
5	5	1,78	8,9	0,62	0,78	0,4	1,95	0,67	0,08
6	10	1,78	17,8	0,41	0,78	0,19	4,11	1,41	0,08
7	15	1,78	26,7	0,28	0,78	0,06	13	2,56	0,1
8	20	1,78	35,6	0,24	0,78	0,02	39	3,66	0,1
9	5	2,17	10,9	0,43	0,84	0,27	3,11	1,13	0,1
10	10	2,17	21,7	0,26	0,84	0,1	8,4	2,13	0,1
11	15	2,17	32,6	0,22	0,84	0,06	14	2,64	0,08
12	20	2,17	43,4	0,17	0,84	0,01	84	4,43	0,1
13	5	2,44	12,2	0,34	0,92	0,26	3,54	1,26	0,1
14	10	2,44	24,4	0,22	0,92	0,14	6,57	1,88	0,08
15	15	2,44	36,6	0,16	0,92	0,08	11,5	2,44	0,07
16	20	2,44	48,8	0,13	0,92	0,05	18,4	2,91	0,06
17	5	2,87	14,4	0,24	0,96	0,2	4,8	1,57	0,11
18	10	2,87	28,7	0,12	0,96	0,08	12	2,48	0,09
19	15	2,87	43,2	0,1	0,96	0,06	16	2,77	0,06
20	20	2,87	57,4	0,07	0,96	0,03	32	3,47	0,06

Tabelul 2.3. Verificarea experimentală a modelului 2.

U*=U/9; U*1=1; U*2=15/9=1,667; U*3=18/9=2; U*4=20/9=2,222; U*5=23/9=2,556 $\overline{K_1} = 0,08; \ \overline{K_2} = 0,09; \ \overline{K_3} = 0,09; \ \overline{K_4} = 0,08; \ \overline{K_5} = 0,08 => \overline{K}_{ex} = 0,083.$

Numerele liniilor coincid cu ale curbelor din figura 2.6. Influența debitului de lichid Q asupra procesului în regim de flux, proprietățile lichidelor, particulelor etc. și condițiile optime de epurare despre care s-a mai menționat.



Fig. 2.10. Dependența K_i(t).

În scopuri practice în loc de relația (2.14) poate fi recomandată ecuația, care în modelul respectiv, cu exactitate de două cifre după virgulă este prezentată astfel:

$$Y=0,08 \cdot t$$
 (2.15)

De aici poate fi obținută și soluția explicită pentru concentrație

$$\varphi^*(t) = \varphi^*_{\infty} + (1 - \varphi^*_{\infty}) \cdot \exp(-0, 08 \cdot U^{1,12}_* \cdot t).$$
(2.16)

De exemplu, pentru curba 3 din figura 1.6 vom avea

$$\varphi * (t) = 0.16 + 0.84 \cdot \exp(-0.17 \cdot t)$$
 (2.17)

Graficul acestei funcții este reprezentat în figura 2.11, în care punctele sunt cele experimentale din tabelul 2.3.



Fig. 2.11. Comparația datelor experimentale și de calcul.

Astfel, constatăm o coincidență satisfăcătoare.

2.5. Concluzii

- 1. Au fost puse în dezbatere principiile fizice ale procesului de filtrate a mediilor disperse dielectrice prin metode electrice.
- 2. Au fost descrise trei modele de filtre electrice, confecționate cu participarea activă a autorului și utilizate în cercetările efectuate și expuse în lucrare.
- 3. Au fost formulate problemele de cercetare, descrise standul experimental și metodica cercetărilor experimentale.

- 4. Prin probe și cercetări experimentale ale procesului de filtrare, efectuând modificări ale filtrelor electrice, a fost stabilită construcția optimă, care a servit pentru investigațiile ulterioare.
- 5. A fost studiată influența tensiunii electrice U asupra procesului de filtrare şi s-a constatat: cu creşterea tensiunii sporeşte procesul electrofiltrării, însă există valoarea optimă a tensiunii, cu efect maximum de purificare, ceea ce permite presetarea parametrilor optimi ai procesului de separare a impurităților mecanice în câmp electric.
- 6. A fost propusă metoda de filtrare prin trepte, ceea ce permite purificarea mediului procesat în limitele admisibile cu exactitatea prestabilită.
- 7. S-a efectuat generalizarea adimensională a datelor experimentale în baza modelului cu un parametru, apoi precizate prin modelul cu doi parametri. Precizarea s-a dovedit a fi esențială.

3. ASPECTE TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE ALE PROCESULUI DE SEPARARE PRIN METODE ELECTRICE A FAZEI DISPERSE SOLIDE ÎN SUSPENSII DIELECTRICE

În acest capitol sunt punctate unele aspecte cu caracter teoretic [103] cu privire la tematica abordată în baza rezultatelor experimentale precedente. Ideea principală privind purificarea lichidului de impurități, depuse pe electrozii – colectori, de sens electric opus acestor electrozi, pot duce la o ecranare considerabilă a câmpului electric în afara stratului. Acest fenomen, la rândul său, poate fi cauza diminuării procesului de filtrare până la dispariția totală.

3.1. Particularitățile fizice ale procesului de separare a fazelor eterogene

Mecanismul fizic de curățare electrică a lichidelor dielectrice în câmpul electric exterior, în linii generale, a fost dezbătut anterior. Particulele de impurități sub influența câmpului se polarizează, obținând moment dipolar **P** și se mai pot electriza cu o sarcină anumită q. Concomitent, particulele dielectrice de ordinul micrometrului, de exemplu în sistemele coloidale [137], de la sine posedă sarcină electrică (ξ – potențial), independent de prezența sau absența câmpului exterior, fiind supuse acțiunii forțelor electrostatice [138-140]:

$$\mathbf{f} = \begin{cases} (\mathbf{P} \cdot \nabla) \mathbf{E}, \\ q \mathbf{E}, \\ (\mathbf{P} \cdot \nabla) \mathbf{E} + q \mathbf{E}. \end{cases}$$
(3.1)

Particulele migrează spre electrozi, unde se depun, astfel efectuând procesul de epurare, care conform cercetărilor [28, 29, 100-102], poartă un caracter de relaxare:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-t/\tau} \,, \tag{3.2}$$

unde φ_0 este concentrația inițială a particulelor în lichidul curățat, τ – *timpul caracteristic, în* formula (2.1) notat prin 1/ α . Acest parametru se numește timpul de relaxare, în cazul nostru – a particulelor disperse, depinzând de un șir de factori, în special, de proprietățile mediului, de caracteristicele câmpului, particularitățile constructive ale filtrului electric, etc. [100].

Totuși, după cum au arătat cercetările experimentale, nominalizate în capitolul anterior, când $t \rightarrow \infty$ concentrația $\varphi(t)$ tinde nu spre zero, așa cum necesită dependența (3.2), dar spre una stabilă (figurile 2.5 și 2.6) φ_{∞} . Pentru a ține cont de acest lucru, s-a propus modificarea formulei (3.2), conform relației (2.1):

$$\frac{\varphi - \varphi_{\infty}}{\varphi_0 - \varphi_{\infty}} = e^{-t/\tau},\tag{3.3}$$

care verifică nu numai condiția inițială, dar și cea la infinit și această dependență nu redă suficient de satisfăcător esența procesului respectiv, ceea ce se vede la o examinare mai atentă a curbelor $\varphi(t)$ (figura 3.6), care mai degrabă sunt exponente "trunchiate", ce țin de stoparea aproape bruscă a procesului de curățare la anumite $t = t_0$, ce pare verosimil în caz de epurare în regim dinamic, întrucât la o mișcare rapidă a lichidului (consumul mare), acesta poate să nu reușească să treacă "epurarea". Dacă există limită de epurare φ_{min} aceasta poate fi observată și la curățarea în condiții hidrostatice, ceea ce la fel s-a constatat [141].

Din punctul nostru de vedere, problema este că la obținerea formulelor de tipul (3.2), (3.3) nu s-a luat în considerare o circumstanță importantă și anume cont că pe măsura sedimentării particulelor de impurități încărcate și îngroșarea stratului format pe electrod – la colector se petrece, treptat, ecranarea câmpului, ceea ce duce la o descreștere lentă, cu timpul, a concentrației. În cele ce urmează se examinează câteva aspecte teoretice ale problemelor apărute pe parcurs.

3.2. Modelul teoretic de curățare electrică, luând în considerare creșterea cu timpul a grosimii stratului de impurități depus pe electrod

Vom cerceta cazul electrohidrostatic în câmpul condensatorului plan-paralel (figura 3.1).



Fig. 3.1 Modelul de calcul al filtrului electric. I — $\xi(t)$ grosimea stratului de impurități; II — stratul de lichid

Sub acțiunea forței electrice, stabilită prin una din interacțiuni din (3.1), particulele migrează spre electrodul din partea stângă, formând un strat de grosimea $\xi(t)$, (să-l numim ξ - strat), ce depinde de timp *t*. *Problema constă în determinarea concentrației în stratul* II *ca funcție de timp*, luând în calcul deplasarea graniței fazelor. Această problemă (de tip Stefan [142]), se va soluționa din considerente fizice, în baza balanței maselor de impurități depuse pe electrod

$dm_l = isdt$,	(3.4)

pe de o parte, și a diminuării acesteia din lichid, pe de altă parte:

$$dm_l = -\gamma V d\varphi, \tag{3.5}$$

unde

$$(3.6)$$

i - densitatea fluxului de mase; γ - densitatea lichidului; V - volumul lichidului;

$$s$$
 – suprafața electrodului; u - viteza de migrare a particulelor, egală cu (3.7)

$$u = bf$$
,

f – forța ce acționează asupra particulei; b – coeficientul de mobilitatea, stabilită prin legea lui Stokes:

$$b = 1/6\pi\eta a, \tag{3.8}$$

unde η este coeficientul de viscozitatea dinamică; a-raza particulelor.

Tot aceeași masă elementară poate fi determinată cu relația

$$dm_l = \gamma_l dV_l = \gamma_l S \cdot d\xi. \tag{3.9}$$

Egalând părțile din dreapta ale relațiilor (3.5) și (3.9) și luând în considerare că $V = (l - \xi) \cdot S$, unde *l* este lungimea celulei, vom obține ecuația de legătură $\varphi(\xi)$

$$d\varphi = -\frac{\gamma_1}{\gamma} \cdot \frac{d\xi}{l - \xi},\tag{3.10}$$

unde γ_1 - densitatea " ξ – *stratului*".

Integrând relația (3.10) pentru condițiile inițiale $\varphi(0) \equiv \varphi_0$, obținem

$$\varphi = \varphi_0 + \gamma_1^* \ln(1 - \xi^*), \tag{3.11}$$

unde s-au introdus mărimi adimensionale:

$$\gamma_1^* \equiv \gamma_1 / \gamma; \ \xi^* \equiv \xi / l.$$
 (3.12)

Considerând în relația (3.11) $\varphi = 0$, se stabilește grosimea maximă $\xi_m^* - a$ stratului

$$\xi_m^* = 1 - e^{-\varphi_0 / \gamma_1^*}. \tag{3.13}$$

La concentrații mici se obține rezultatul firesc

$$\xi_m \cong \frac{\varphi_0 l}{\gamma_1^*} \,. \tag{3.14}$$

În aceste relații nu s-a ținut seama de natura forțelor care acționează asupra particulelor și de aceea poartă un caracter de "lege de conservare a maselor" de impurități.

Egalând părțile din dreapta ale formulelor (3.4) și (3.5) și luând în considerare (3.11), rezultă ecuația pentru $\xi^*(t)$:

$$\frac{\gamma_1^* l}{b} \cdot \frac{d\xi^*}{[\varphi_0 + \gamma_1^* \ln(1 - \xi^*)]f} = dt, \tag{3.15}$$

unde f este forța care se exercită asupra particulei în vecinătatea ξ – stratului, adică $f = f(\xi)$. Integrând (3.15) și ținând cont de acest lucru, vom găsi $\xi^*(t)$, iar apoi conform (3.11) și dependența finală $\varphi(t)$. În linii generale, anume așa se soluționează problema inițial formulată. În continuare se examinează câteva cazuri particulare ale relației (3.1).

3.2.1.Particule neîncărcate

În acest caz, fiindcă $q=0 \Rightarrow \rho=0 \Rightarrow \frac{dE}{dx} = 0 \Rightarrow E = const \Rightarrow f \equiv 0$ este imposibilă curățarea electrică în câmpul omogen la neutralitatea electrică a particulelor.

3.2.2. Particule încărcate

Dacă q \neq 0, atunci ξ – stratul se va încărca opus semnului electrodului, pe care se sedimentează particulele. În spațiul dintre electrozi apare o structură formată din două straturi: faza solidă (la impuritățile solide) - I și lichidă - II cu densitatea de sarcini - ρ_1 și ρ_2 corespunzător.

Pe lângă sarcinile volumetrice, la granița de separare a fazelor, din cauza diferenței timpului de relaxare electrică a fazelor: $\tau_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_1 / \sigma_1$, și $\tau_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_2 / \sigma_2$ va apărea și sarcina superficială (vezi mai jos).

Găsim intensitățile $E_I(x)$, $E_{II}(x)$ și $E(\xi)$ în straturi și la hotarul acestora.

După cum se vede,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}^{(1)},$$

unde \vec{E}_0 este intensitatea în lipsa ξ – stratului, $\vec{E}^{(1)}$ – corectare, determinată de apariția acestuia.

ZONA I

$$\frac{dD_I^{(1)}}{dx} = \rho_1 \Longrightarrow D_I^{(1)} = \rho_1 x + c', \ x \in [0; \xi],$$
$$D_I^{(1)}\Big|_{x=0} = 0 \Longrightarrow c^1 = 0 \Longrightarrow D_I^{(1)} = \rho_1 x.$$

ZONA II

$$\frac{dD_{II}^{(1)}}{dx} = \rho_2 \Longrightarrow D_{II}^{(1)} = \rho_2 \cdot x + c'', \ x \in (\xi; l).$$

La granița de separare a fazelor avem

$$D_{II}(\xi) - D_{I}(\xi) = j(\tau_{2} - \tau_{1}) = \sigma \Longrightarrow \rho_{2}\xi + c'' - \rho_{1}\xi = \sigma_{q} \Longrightarrow c'' = \rho_{1}\xi - \rho_{2}\xi + \sigma_{q} \Longrightarrow$$

$$\Longrightarrow D_{II}^{(1)} = \rho_{1}\xi + \rho_{2}(x - \xi) + \sigma_{q} \Longrightarrow E_{II}^{(1)}(x) = \frac{1}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{2}}[\rho_{1}\xi + \rho_{2}(x - \xi) + \sigma_{q}], \quad x \in [\xi, e].$$

$$(3.16)$$

De aici rezultă:

$$E(\xi) = E_0 + \frac{\rho_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} \xi, \qquad (3.17)$$

unde:

$$E_0 = \frac{U}{l} + \frac{\rho_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_2},\tag{3.18}$$

U - diferența de potențiale. Forța de polarizare (3.1) este

$$f_p = P \frac{dE_{II}(x)}{dx} \bigg|_{x=\xi} = \frac{P}{\varepsilon_0 \varepsilon_2} \cdot \rho_2.$$

Luând în considerare, că momentul dipolar $P \sim E$, iar densitatea $\rho_2 \sim q\varphi$, pentru forța absolută vom obține

$$f = (1+\alpha) \cdot qE(\xi). \tag{3.19}$$

Dacă e vorba despre condensatorul plan la concentrațiile mici de impurități în (3.19) α – poate fi neglijat.

Substituind (3.19) în (3.15) și având în vedere (3.17), se obține

$$\frac{\gamma_1^* l}{qb} \cdot \frac{d\xi^*}{[\varphi_0 + \gamma_1^* \ln(1 - \xi^*)](E_0 - A\xi^*)} = dt,$$
(3.20)

unde parametrul A prezintă

$$A = -\frac{\rho_1 l}{\varepsilon_0 \varepsilon_2}.$$
(3.21)

Abordările teoretice desfășurate sunt utile și pentru concentrațiile mari, dar în practică, concentrațiile lichidelor curățate vor constitui valori și mai mici. De aceea, cu exactitate până la $\varphi \sim 10\%$ în (3.20) $\ln(1-\xi^*) \cong -\xi^*$, ceea ce simplifică cu mult integrarea ecuației (3.20). Rezultatul final este:

$$\xi(t) = \frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - \nu e^{-\lambda t}} \cdot \xi_m,\tag{3.22}$$

unde ξ_m este grosimea maximă a stratului, adică $\xi_m = \xi|_{t\to\infty}$, coincide cu valorile de mai sus (3.14), în care $\gamma_1^* \approx 1$, așa după cum densitatea $\gamma_1 \cong \gamma$. În plus, mai este și indicat,

$$v = \frac{A\varphi_0}{E_0}; \ \lambda = \frac{bqE_0(1-\nu)}{l}; \ A = -\frac{\rho_1 \cdot l}{\varepsilon_0 \varepsilon_2}$$
(3.23)

În continuare, conform relației (3.11) se obține

$$\varphi^* = \frac{(1-\nu) \cdot e^{-\lambda t}}{1-\nu \cdot e^{-\lambda t}},\tag{3.24}$$

unde este introdusă normarea concentrației la φ_0

$$\varphi^* \equiv \varphi / \varphi_0.$$

(3.25)

De aici se vede că în zona de descreștere $\varphi^*(t)$ a dependenței (3.24) se deosebește de cea tradițională (3.2), (3.3). Ținând seama de ipotezele admise în p. 2.1. se poate de așteptat la o concentrație estimată cu una din relațiile

$$\varphi^{*} = \begin{cases} \frac{(1-\nu^{-\lambda t})}{1-\nu \cdot e^{-\lambda t}}, 0 \le t \le t_{0}, \\ \frac{(1-\nu^{-\lambda t_{0}})}{1-\nu \cdot e^{-\lambda t_{0}}}, t \ge t_{0}. \end{cases}$$
(3.26)

unde timpul t_0 , *după cum s-a mai menționat e caracteristic pentru epurarea în regim dinamic.* Acesta poate fi evaluat în funcție de timp, după care concentrația (după formula (3.2)) cade de *e ori*, sau experimental în funcție de timp până la $\varphi(t) = const$.

3.3. Comparație cu experimentul

Rezolvând ecuația (3.24) în raport cu $e^{-\lambda t}$ și logaritmând, obținem:

$$\lambda t - \ln[1 - \nu(1 - \phi^*)] + \ln \phi^* = 0.$$
(3.27)

Ridicată la pătrat, apoi considerându-se valoarea medie după parametrii experimentali $t \, \text{si} \, \phi^*$, se pune problema de căutare a funcției minime pe baza relației

$$\overline{(\lambda t - \ln[1 - \nu^*(1 - \varphi^*)] + \ln \varphi^*)^2} = \min(\lambda, \nu).$$

Derivând această expresie după λ și v, obținem sistemul metodei pătratelor minime:

$$\begin{cases} \lambda \cdot \overline{t^2} + v \cdot \overline{t(1-\varphi^*)} = -\overline{t \ln \varphi^*} \\ \lambda \overline{t(1-\varphi^*)} + v \overline{(1-\varphi^*)^2} = -(1-\varphi^*) \ln \varphi^* \end{cases}$$
(3.28)

După datele graficului (figura 2.6, curba 1)se întocmește tabelul 3.1:

n/d	<i>t</i> , minute	φ^*
1	5	0,72
2	10	0,58
3	15	0,42
4	20	0,32

Tabelul 3.1. Datele normate φ_0 la concentrația impurităților φ^* la diferite timpuri de epurare t

Valoarea medie se stabilește cu formule generale de tipul

$$\overline{A} = \frac{\sum A_i}{n}, (n = 4)$$

Sistemul de ecuații (3.28) ia forma:

$$\begin{cases} 187, 5\lambda + 6,975\nu = 10,6875 \\ 6,975\lambda + 0,2634\nu = 0,3983 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda = -0,0501 \\ \nu = 0,1845 \end{cases}$$

Formula (3.24) are aspectul

$$\varphi_{teor}^* = \frac{0,815 \cdot e^{-0,0501t}}{1 - 0,1845e^{-0,0501t}}.$$
(3.29)

În tabelul 3.2 sunt aduse valorile φ_{teor}^* , calculate după această formulă, și cele experimentale.

<i>t</i> , min.	5	10	15	20	25	30	35
φ^{*}_{exp}	0,72	0,58	0,42	0,32	0,30	0,30	0,35
$arphi^*_{teor}$	0,74	0,57	0,42	0,32	0,25	0,19	0,15

Tabelul 3.2. Comparația valorilor experimentale și de calcul φ^* la diferite timpuri t de epurare a lichidului în filtrul electric

Din tabel se observă că până la $t = t_0 = (20 \div 25)$ minute, curba teoretică (3.29) corespunde cu datele experimentale. Divergența începe cu $t \ge 22$ min., în același timp, în (3.29) exponentul

$$e^{-0.05t} = e^{-\frac{t}{t_0}} \Longrightarrow t_0 = \frac{1}{0.05} = 20 \text{ (min.)},$$

ceea ce corespunde cu interpretarea t_0 .

Astfel, în corespundere cu relațiile (3.26) și (3.29) se deduce relația finală

$$\varphi^* = \begin{cases} 0.815e^{-0.0501t/(1-0.1845e^{-0.0501t})}, t \le 20 \text{ min} \\ 0.32, t \ge 20 \text{ min} \end{cases}$$
(3.30)

3.4. Determinarea parametrilor statistici v și λ în baza datelor experimentale

Determinarea parametrilor statistici ν și λ se expune în baza publicațiilor [143,144]. Având drept scop de a clarifica efectul cantitativ al influenței câmpului electric, precum și particularitățile mediului, dar și a altor caracteristice asupra procesul de curățare electrică, este necesar de a găsi valorile numerice ale parametrilor ν și λ , luând în considerație datele tuturor curbelor din figura 2.6, ce corespund tuturor tensiunilor U aplicate la filtrul electric.

Din formula (3.29) rezultă că parametru ν nu este chiar atât de mic ($\nu \le 0,2$), însă, totuși, se poate spera că pentru alte curbe ν nu va depăși valoarea pentru curba *1*. Reieșind din aceasta, s-a soluționat sistemul (3.28) pentru alte curbe din figura 2.6. Rezultatele respective sunt prezentate în tabelul 3.3.

După cum se vede din tabelul 3.3, situația s-a agravat, parametrul v nu diminuează dar crește, depășind valoarea v=1 și mai departe depășește unitatea, ceea ce demonstrează ilegalitatea liniarizării logaritmului la obținerea formulei (3.28) ($\ln[1-v(1-\phi^*)] \approx -v(1-\phi^*)$), și contrazice formulei teoretice (3.26), care presupune v<1.

Nr. curbelor	λ , min. ⁻¹	ν	U, κV
1	5,01-10 ⁻²	1,85-10-1	9
2	4,23-10 ⁻²	8,04-10-1	15
3	3,96-10 ⁻²	1,26	18
4	4,52-10 ⁻²	1,34	20
5	5,97-10 ⁻²	1,60	23

Tabelul 3.3. Valorile λ și ν din sistemul de ecuații (3.28)

Astfel, se ajunge la concluzia, că modelul liniar (3.28) este impropriu pentru căutarea parametrilor principali ai problemei ν și λ (cu excepția cazului curbei *1*) și este necesar ca în mod primordial, să fie soluționată problema neliniară.

Un alt mod de abordare ar fi următorul. Datele de pe prima linie în tabelul 3.3 pot fi considerate ca fiind confirmate. În continuare, λ descrește, trecând peste minimum și se apropie aproximativ de valoarea inițială, în limita variației λ , fapt, ce sugerează de a lua în aproximația "zero", λ egală cu o valoare medie, fie, $\lambda = \lambda_0 = 0,05 \text{ min}^{-1}$, ceea ce am și făcut. Dacă ν se exprimă prin cunoscuta λ_0 , atunci soluția problemei este

$$\nu = \frac{1 - \varphi^* e^{\lambda_0 t}}{1 - \varphi^*}.$$
(3.31)

Totodată, valoarea v poate fi găsită sub două aspecte: ca medie aritmetică cu formula

$$\overline{\nu} = \frac{\sum \nu_i}{n} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1 - \varphi_i^* e^{\lambda_0 t_i}}{1 - \varphi_i^*},$$
(3.32)

și după metoda pătratelor minime, conform egalității

$$\tilde{\nu} = \frac{\overline{(1-\varphi^*)(1-\varphi^*e^{\lambda_0 t})}}{\overline{(1-\varphi^*)^2}}.$$
(3.33)

Rezultatele evaluării sunt prezentate în tabelul 3.4, în care, pe lângă datele inițiale pentru t și φ^* sunt prezentate valorile obținute pentru v, calculate prin formula (3.31). Totodată, este prezentată devierea relativă medie pătratică $\delta = (\sigma_v / \tilde{v}) \cdot 100\%$, unde $\sigma_v = \sqrt{(v_i - \tilde{v})^2}$, caracterizează gradul apropierii aproximării la adevăratele valori. Se vede că mai puțin veridică e prezentată curba *1* $(\delta = 32\%)$. Din tabelul 3.4 rezultă că, v este într-o descreștere monotonă pentru toate curbele, însă cu variații de amploare neesențiale. Dar asta e deja o regularitate, ce demonstrează că exponentul puterii λ , ar trebui să fie constant de-a lungul fiecărei curbe, dar cu toate acestea, valoarea admisă $\lambda_0 = 0,05 \text{ min.}^{-1}$ nu oglindește întru tot mărimea reală. Pentru soluționarea definitivă a problemei respective există diverse metode, însă cea mai simplă și exactă se dovedește a fi alegerea metodei "furcii" (echivalentă metodei coardă). Ideea metodei constă în faptul că dacă dependența teoretică (3.31) e adecvată, atunci pentru unele valori λ funcția v(t) poate fi în descreștere, ca și în cazul nostru (tabelul 3.4), iar pentru altele – în creștere. Selectând două astfel de valori extreme λ , prin metoda împărțirii în jumătate a intervalului, se poate de identificat soluția pentru care aproximativ $v(t) \cong const$. Aceasta și va fi soluția căutată. Rezultatele calculelor sunt prezentate în tabelul 3.5.

nr. curbei		1		2		3		4		5	
Nr.	<i>t</i> , min.	$arphi^{*}$	V	$arphi^{*}$	V	$arphi^{*}$	ν	$arphi^{*}$	v	$arphi^{*}$	V
1	5	0,72	0,270	0,62	0,527	0,43	0,786	0,34	0,854	0,24	0,910
2	10	0,58	0,104	0,41	0,549	0,26	0,772	0,22	0,817	0.12	0,912
3	15	0,42	0,191	0,28	0,566	0,18	0,755	0,16	0,787	0,10	0,876
4	20	0,32	0,191	0,24	0,457	0,17	0,648	0,13	0,743	0,07	0,871
V			0,189		0,527		0,740		0,800		0,892
v			0,183		0,520		0,731		0,814		0,890
δ,%			32,3		8,20		7,60		5,30		2,10
U, кV			9		15		18		20		23

Tabelul 3.4. Valoarea parametrului ν calculat cu formulele (3.31) - (3.33)

În figura 3.2 sunt prezentate graficele dependențelor $\lambda(U)$, $\nu(U)$; $\nu(U)$ curba are forma S figurativ; $\nu(U) \rightarrow 1$ la creșterea U. Cursa curbei $\lambda(U)$ explică căderea bruscă a efectului de epurare cu creșterea tensiunii mai înalte față de cea corespunzătoare $\lambda = \lambda_{max}$; curba $\lambda(U)$ are maximă în pofida aparenței unui minimum eronat din tabelul 3.3. Valoarea $\lambda = \lambda_{max}$ la $U \approx (14-15)$ KV indică concomitent și o tensiune mai optimă, care poate fi recomandată în diverse aplicații.



Fig. 3.2. Dependența parametrilor λ și v de tensiunea aplicată U

Tabelul 3.5. Calculul	numeric al	parametrilor	λşiv
-----------------------	------------	--------------	------

nr. curbei	1	2	3	4	5
λ , 10 ⁻² min.	5,01	6,00	2,50	0,55	0,30
$v, 10^{-1}$	1,89/1,7	3,89/5,1	8,93/7,5	9,84	9,95
<i>U</i> , кV	9	15	18	20	23

3.5. Generalizarea datelor de cercetare

Datele experimentale obținute în prezenta lucrare se vor generaliza prin funcția

$$f(\lambda,\nu) = t, \tag{3.34}$$

unde

$$f(\lambda,\nu) \equiv \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1-\nu(1-\varphi^*)}{\varphi^*}.$$
(3.35)

Rezultatele calculului funcției generalizate $f(\lambda, \nu)$ se prezentă în tabelul. 3.6.

Nr. curbei	1	2	3	4	5
1	5,47	5,31	5,31	5,56	5,24
2	9,22	10,51	10,63	10,03	12,00
3	15,00	15,74	15,88	14,67	14,68
4	20,00	17,94	16,81	18,50	21,44

Tabelul 3.6. Calculul funcției $f(\lambda, \nu)$ cu formula (3.35)

În figura 3.3 este reprezentată graficul dependenții (3.35), întocmit după datele din tabelele 3.4 și 3.6. După cum se vede din tabelul 3.4, eroarea maximă este $\sim \frac{4}{20} \cdot 100\% = 20\%$, media pătratică $\approx 5\%$.



Fig. 3.3. Dependența generalizată $f(\lambda, \nu) = t$

Dependența generalizată $f(\lambda, \nu) = t$ în coordonatele figurii 3.3. reprezintă o dreaptă înclinată sub 45° față de axa *t*.

3.6. Dezbateri pe marginea rezultatelor. Premise teoretice

Relația fundamentală (3.24) are un caracter mai mult "arhitectural" decât fizic. Pentru a înțelege mecanismul fizic al procesului complex de curățare electrică, este necesar de a atrage atenția la formulele (3.23) pentru λ și v, care conțin trei parametri electrici: E_0 – intensitatea câmpului electric exterior, după cum se vede, este proporțională tensiunii U, q – sarcina particulei în afara ξ - stratului, ρ_1 - densitatea sarcinii în interiorul acestui strat, care va fi egală cu produsul concentrației de particule n, în interiorul stratului pe sarcina acestora, precum și în interiorul acestui strat q_1 , adică $\rho_1 = n_1 \cdot q_1$. În acest context, trebuie de accentuat, că q_1 nu e obligatoriu ca să coincidă cu q (ca urmare a scurgerilor pe colector și din alte cauze), dar ambele sarcini, probabil, vor fi proporționale cu unele tensiuni pozitive U.

Dependența directă v(U) este prezentată pe curba experimentală din figura 3.2 și aceasta trebuie să fie aproximată gradului de putere a dependenței cu un indice variabil pozitiv *m*:

$$v = C \cdot U^m, \tag{3.36}$$

C este un coeficient de proporționalitate. Cunoscând această formulă din (3.23), vom găsi

$$\rho_1 = -C \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2}{\varphi_0 l^2} U^{m+1}, \qquad (3.37)$$

unde s-a obținut $E_0 = U/l$.

Părții drepte (3.37) va fi proporțională și sarcina particulelor ξ - stratului ($q_1 \sim U^{m+1}$). Valorile C și *m* pot fi găsite din datele experimentale (curba 2, figura 3.2), așa că problema cu privire la valorile numerice λ și ρ_1 poate fi considerată ca fiind soluționată.

Sarcina particulelor q în afara stratului depinde de mecanismul de încărcare a acestora pe electrodul de înaltă tensiune și în fluxul conectiv electric. Dacă detaliile acestui mecanism le vom lăsa deocamdată la o parte, putem considera că, după cum s-a menționat, q este proporțional unor anumite grade s de tensiune

$$q = C_1 U^s, (3.38)$$

unde C_1 este un anumit coeficient de proporționalitate care depinde de geometria particulelor, de particularitățile electrofizice ale mediului de dispersie în întregime, iar s – un exponent, care printre altele poate fi egal și cu exponentul pentru q_1 , adică m + 1.

Utilizând formulele (3.36), (2.38), după a doua formulă (3.23) putem să stabilim dependența teoretică $\lambda(U)$ și să o comparăm cu cea experimentală, ce a fost găsită (curba *1* figura 3.2). Substituția (3.36) și (3.38) în (3.23) oferă

$$\lambda = C_1 \frac{b}{l^2} (U^{s+1} - C \cdot U^{m+s+1}).$$

Această curbă are două valori extreme, care se stabilesc prin egalarea cu zero a primei derivate $\lambda'(U) = 0$, deci

$$U_{m} = \begin{cases} 0 \\ \left[\frac{s+1}{C(m+s+1)}\right]^{\frac{1}{m}}. \end{cases}$$
(3.39)

Găsim a doua derivată

$$\lambda''(U) = C_1 \frac{bU^{s-1}}{l^2} [s(s+1) - C(m+s)(m+s+1)U^m].$$
(3.40)

Înlocuind în această formulă U^m din (3.39), obținem

$$\lambda''(U_m) = -C \frac{bU_{sp}^{s-1}}{l^2} m(s+1) < 0.$$
(3.41)

Astfel se deduce că pentru orice valori pozitive ale exponenților *m* și *s* curba $\lambda(U)$ are un maximum, care este confirmat de către curba experimentală *1 din figura 3.2.*

Pentru o estimație numerică, în primul rând, este necesar de a cunoaște valoarea numerică a coeficientului *C*, dar și a exponentului *m. Încercarea prezentării tradiționale a dependenței* (3.36) în rețeaua logaritmică coordonată nu a dat rezultatele scontate, întrucât, după cum s-a văzut, exponentul *m este mărimea variabilă în toată gama de variații U. Aceasta și este clar, fiindcă după cum rezultă din figura* 3.2, funcția $\lambda(U)$ are asimptota orizontală ($\lambda = 1$). Prin urmare, această funcție este complicată exponențial și, deocamdată, nu ne punem scopul aproximării ei printr-o formulă analitică unică. Totuși, în scopul estimării, pe sectorul (0 - 18) κ V o putem considera în serie de puteri, dar și găsi valorile *C și m, de exemplu*, cu metoda pătratelor minime prin trei puncte (9; 1,89); (15; 3,89); (18; 8,93). Rezultatul va fi următorul $\nu = 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot U^{2,14}$.

În tabelul 3.5 este prezentată valoarea lui v, calculată cu această formulă. Astfel, se vede $C = 1,55 \cdot 10^{-3}$; m = 2,14; U, κV , dependența fiind aproape pătratică, așa că pentru o estimare ulterioară se poate de luat $C = 1,6 \cdot 10^{-3}, m = 2$.

Cu formula (3.39) evaluăm tensiunea, care reprezintă exponentul maxim λ (cu formulele exacte pentru *C şi m*), obținând *s* =1 (formula Potenier [28])

$$U_m = \left[\frac{(1+1)\cdot 10^3}{1,55\cdot (2,14+1+1)}\right]^{\frac{1}{2,14}} \approx 14,6 \approx 15 \text{ (kV)},$$

care, practic, corespunde exact datelor experimentale (vezi curba *1 din figura* 3.2). Astfel, se poate de tras concluzia generală, precum că în pofida unor aproximații majore, conceptele teoretice în baza dependenței obținute mai înainte (2.24), sunt confirmate pe deplin și de datele experimentale.

Trebuie de remarcat că aici nu s-a luat în considerare curentul de fluid electroconvectiv. După cum se pare, în acest caz, impuritățile dielectrice în mediul dielectric, factorul convecției cedează factorului de transfer prin migrația masei spre deosebire de cazul particulelor mai conductoare [136]. În perspectivă, urmează de a preciza și examina nuanțele fizice noi în procesul de curățare electrică cu orientarea, în primul rând, spre scopul final al cercetărilor – aspectul de aplicare.

3.7. Posibilitățile de dispariție totală a procesului de separare și explicațiile respective

Din graficele experimentale, figurile 2.5, 2.6, cap. 2, după cum s-a mai menționat, rezultă, că pentru valori relativ mari ale timpului, procesul de separare a fazelor sub acțiunea câmpului electric, practic, dispare. Dar apare întrebarea: este această dispariție aparentă, din cauza descreșterii rapide a funcției exponențiale, ce descrie procesul de variație a concentrației cu timpul, sau, de facto, are loc dispariția efectului de separare? Deocamdată, nu există un răspuns univoc la această întrebare, însă în cele ce urmează, vom demonstra că sunt posibile situații fizice de dispariție a procesului de separație, cel puțin, din două motive: 1) ecranarea spațiului de electrizare a particulelor (emiter) de către sarcina electrică a stratului depus pe colector; 2) creșterea rezistenței electrice a acestui strat.

3.7.1. Rolul ecranării electrice

În ipoteza existenței stratului încărcat se poate de înțeles de ce efectul de curățare cu timpul scade. Aceasta se întâmplă din cauza ecranării câmpului electric exterior de câmpul stratului respectiv. Încetarea bruscă a separației poate fi explicată cu ajutorul efectului coronă de descărcare electrică. Să presupunem, că intensitatea critică U_c corespunde unei intensități electrice critice E_c , la începutul descărcării electrice în lichid; că, în continuare am inițiat procesul de evidențiere a unei oarecare curbe $\varphi^*(t)$ la o intensitate $U>U_c$ și, prin urmare, $E>E_c$. În măsura acumulării particulelor încărcate pe colector, la fixarea tensiunii aplicate U, din cauza efectului de ecranare, intensitatea câmpului în vecinătatea punctelor de ionizare, cu timpul va descrește, concomitent se va reduce curentul de descărcare, însă nu acest lucru e important, dar de fapt are scăderea intensității câmpului. Această scădere poate să conducă la intensități egale cu cele critice (inițiale) și procesul de descărcare electrică coronă se va stopa.



Fig. 3.4 Modelul de calcul al filtrului electric

În modelul [103] pe care îl vom examina considerăm că stratul depus este omogen și densitatea de sarcini în acesta e stabilă, egală cu ρ_1 conform figurii 3.4. De asemenea, mai este un al doilea strat; se presupune că și acesta este omogen, cu o densitate volumetrică ρ_2 , semnele sarcinilor fiind identice și coincid cu semnul electrodului coronar, în cazul dat ele sunt negative. E firesc ca odată cu timpul, în procesul de epurare, ρ_2 va descrește, iar la finele procesului această sarcină, în primă aproximație, poate fi neglijată în comparație cu ρ_1 . În astfel de cazuri conform teoremei Gauss – Ostrogradschi, intensitatea ecranizată poate fi evaluată cu formula

$$E_1(x > \xi) = \frac{1}{2\varepsilon_1} \cdot \rho_1 \cdot \xi , \qquad (3.42)$$

unde ξ este grosimea stratului, indicele «1» atribuindu-se caracteristicii stratului. Dat fiind că $\rho_1 < 0$, ne convingem că această sarcină duce la diminuarea câmpului în regiunea descărcării coronă. Deoarece cu timpul partea dreaptă a relației (3.42) crește, atât din contul creșterii ρ_1 (cauza fiind o simplă etanșare de particule), cât și majorării grosimii stratului ξ , în acest caz ecranarea poate fi destul de eficace, chiar până la o valoare a intensității egală cu cea critică E_c . Într-adevăr,

$$E_1 \sim \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot |\rho_1| \cdot \xi \sim \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot |\mathbf{j} \cdot \nabla \tau_1| \cdot \xi \sim \frac{1}{\varepsilon_1} \cdot j \cdot \frac{\tau_1}{\xi} \cdot \xi \sim \frac{j}{\sigma_1} \le E_0,$$

intensitatea E_1 nu e mai mare decât cea inițială E_0 , însă poate fi de același nivel, ce confirmă cele menționate mai sus.

Considerăm că intensitatea totală în vecinătatea electrodului de ionizare e egală cu cea inițială E_0 cu scăderea ecranării (3.42). În acest caz, condiția existenții separației arată

$$E = E_0 - \frac{\left|\rho_{\rm L}\right|\xi}{2\varepsilon_{\rm I}} > E_c \,. \tag{3.43}$$

Din această formulă vom găsi grosimea limită ξ_{mE} a stratului de particule depus, determinată de intensitatea inițială și densitatea de sarcină,

$$\xi < \frac{2\varepsilon_1 \cdot (E_0 - E_c)}{|\rho_1|} \equiv \xi_{mE}.$$
(3.44)

Apariția intensității E_0 , se stabilește după tensiunea de lucru U la filtrul electric, fiind direct proporțională cu această valoare: $E_0 \sim U$, de aceea, cu cât e mai mare tensiunea U, cu atât e mai mare și grosimea stratului critic, dar totodată e mai mică concentrația reziduală minimală φ_{∞} . După cum urmează din (2.44), valoarea ξ_{mE} reprezintă grosimea maximă a stratului, care poate apărea în procesul de curățare electrică la tensiunea respectivă (intensitate) la filtrul electric. Nu trebuie confundată valoarea ξ_{mE} cu valoarea maximă ξ_m , determinată de întreaga masă a particulelor disperse în lichid, cu condiția de sedimentare totală a acestora în strat (vezi formula (3.46)). Evident, în ce privește cea din urmă condiție întotdeauna $\xi_{mE} < \xi_m$.

Timpul maxim de epurare t_c , după care procesul de separare a fazelor se întrerupe, poate fi calculat din formula pentru dependența grosimii stratului în funcție de timp [103],

$$\xi(t) = \frac{1 - exp(-\lambda t)}{1 - v \cdot exp(-\lambda t)} \cdot \xi_m, \tag{3.45}$$

$$\xi_m \cong \varphi_0 l / (\gamma_1^*) \,, \tag{3.46}$$

unde ξ_m - grosimea maximă a stratului (la t $\rightarrow \infty$), care prin concentrațiile inițiale mici φ_0 o prezintă formula (3.46); *l*-distanța între electrozi, presupuse plane; $\gamma \equiv \gamma_1 / \gamma$; γ_1 - densitatea particulelor de substanță; γ - densitatea mediului (γ ~1). Ceilalți parametri se stabilesc cu relațiile:

$$v \equiv A\varphi_0 / E_0; \quad \lambda \equiv bqE_0 (1-v) / l; \quad A = -\rho_1 l / \varepsilon_2.$$
(3.47)

Prin logaritmarea formulei (3.45) se obține expresia pentru timpul critic t_c , adică timpul minim necesar pentru efectuarea procesului de CE

$$t > t_c = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{1 - \nu \cdot B}{1 - B}; B = \frac{2 \cdot \varepsilon_1 \cdot (E_0 - E_c)}{|\rho_1| \cdot \xi_m} = \frac{\xi_{mE}}{\xi_m}; b = 1/(6\pi\eta a),$$
(3.48)

unde *b* este coeficientul de mobilitate după Stokes; η – viscozitatea dinamică; *a* – raza particulei (unică pentru toate). Vă prezentăm o evaluare numerică a duratei procesului de curățare *t_c*, dacă se consideră: curățarea la 80 %, adică. $B = \xi_{mE} / \xi_m = 0.8$; $\nu = 0.2$; $\lambda = 0.05$ min.⁻¹ [103].

Prin formulă (3.48) se obține $t_c \approx 29$ minute, ceea ce corespunde datelor experimentale [103].

3.7.2. Rolul rezistenței electrice

Considerațiile de mai sus cu privire la fenomenul de prag de curățare au avut un caracter "electrostatic", nu s-a ținut cont de existența curenților prin filtrul electric, dar o atenție deosebită s-a acordat formării sarcinii. Acum să examinăm această problemă din punct de vedere a legii Ohm, observând în prealabil, că dispariția efectului separației electrice, în principiu, poate fi explicată și fără considerarea nemijlocită a proceselor de formare a sarcinii.

Realmente, luând în calcul densitatea medie a curenților electrici $j_1 = j_2 \equiv j$ în straturile «1» și «2» și ținând cont că $E_1 = -d\varphi_1 / dx$ și $E_2 = -d\varphi_2 / dx$, se obține,

$$\int_{0}^{\xi} \sigma_{1} d\varphi_{1} = \overline{\sigma}_{1} \cdot \varphi_{1} \Big|_{0}^{\xi} = \overline{\sigma}_{1} \cdot [\varphi_{1}(\xi) - \varphi_{1}(0)] = \overline{\sigma}_{1} \cdot U_{1} = j \cdot \xi,$$

$$\int_{\xi}^{l} \sigma_{2} d\varphi_{2} = \overline{\sigma}_{2} \cdot \varphi_{2} \Big|_{\xi}^{l} = \overline{\sigma}_{2} \cdot [\varphi_{2}(l) - \varphi_{2}(\xi)] = \overline{\sigma}_{2} \cdot U_{2} = j \cdot (l - \xi).$$

În așa mod, pentru $j_1 = j_2$, vom obține

$$\bar{\sigma}_1 \cdot U_1 \cdot (l - \xi) = \bar{\sigma}_2 \cdot U_2 \cdot \xi , \qquad (3.49)$$

unde $\overline{\sigma}_1$ și $\overline{\sigma}_2$ reprezintă valorile medii corespunzătoare primului ($x \in [0; \xi)$) și celui de al doilea ($x \in (\xi; l]$) interval, cu căderile de tensiune respectivă U_1 și U_2 . Vom găsi aceste tensiuni alcătuind încă o ecuație, conform căreia suma acestora trebuie să fie egală cu tensiunea generală respectivă U la filtrul electric, adică

$$U_1 + U_2 = U. (3.50)$$

Din formulele (3.49) și (3.50) după unele calcule, vom găsi:

$$U_{1} = \frac{\overline{\sigma}_{2} \cdot U}{\overline{\sigma}_{2} \cdot \xi + \overline{\sigma}_{1} \cdot (l - \xi)} \cdot \xi ; U_{2} = \frac{\overline{\sigma}_{1} \cdot U}{\overline{\sigma}_{2} \cdot \xi + \overline{\sigma}_{1} \cdot (l - \xi)} \cdot (l - \xi) .$$

$$(3.51)$$

De aici, intensitatea medie corespunzătoare a câmpurilor pe sectoare este egală:

$$\overline{E_1} = \frac{U_1}{\xi} = \frac{\overline{\sigma}_2 \cdot U}{\overline{\sigma}_2 \cdot \xi + \overline{\sigma}_1 \cdot (l - \xi)}; \ \overline{E_2} = \frac{U_2}{l - \xi} = \frac{\overline{\sigma}_1 \cdot U}{\overline{\sigma}_2 \cdot \xi + \overline{\sigma}_1 \cdot (l - \xi)}$$
(3.52)

Aceste expresii sunt consecințe directe ale legii lui Ohm și e remarcabil că sunt valabile indiferent de prezența sau lipsa electrizării mediului, adică pot fi egale cu zero sau nu densitățile de sarcină ρ_1 și ρ_2 . La prima vedere acest lucru ar părea straniu, însă de fapt nu, deoarece

conductivitățile specifice medii $\overline{\sigma}_1$ și $\overline{\sigma}_2$ nu țin cont de aceste sarcini. La $\rho_1=0$ și $\rho_2=0$ automat, pur și simplu, vom obține $\overline{\sigma}_1=\sigma_1$ și $\overline{\sigma}_2=\sigma_2$.

Referitor la interpretarea fenomenelor de prag, interesul principal este intensitatea câmpului în zona a doua în care are loc încărcarea particulelor. Notând raportul $\bar{\sigma}_1/\bar{\sigma}_2 \equiv \mu$ și ținând seama că $l \gg \xi$, formula (3.52) pentru E_2 devine

$$E_2 = \frac{\mu \cdot U}{\xi + \mu \cdot l} = \frac{\mu}{\xi_* + \mu} \cdot \frac{U}{l}, \qquad (3.53)$$

unde $\xi_* \equiv \xi/l$ prezintă grosimea relativă a stratului. Dacă pentru uleiul de floarea-soarelui vom considera $\overline{\sigma}_2 \sim 10^{-9} \ \Omega^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ [13], iar pentru stratul de ceară $\overline{\sigma}_1 \sim 10^{-13} \ \Omega^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$, atunci vom obține $\mu \sim 10^{-4}$. Mai departe, $\xi \approx \xi_m \approx \varphi_0 \cdot l \approx 5 \cdot 10^{-3} \cdot l$. Conform relației (3.53) intensitatea E_2 în regiunea descărcării coronă, după aceste date, se atenuează de 50 de ori în comparație cu $(U/l) \approx E_0$, adică cu un ordin sau două. Se pare că o astfel de diminuare a câmpului electric este destul de suficientă pentru dispariția descărcării coronă, ceea ce este identic cu ecranarea câmpului exterior (pentru « ξ – strat»).

Astfel, valoarea de *prag* a intensității câmpului electric la care începe procesul *de curățare* electrică, se explică prin faptul că aceasta are *prag la descărcarea* electrică ($E=E_c$). Deoarece orice proces de CE începe cu o intensitate mai mare decât valoarea critică $E_0 > E_c$ (vezi formula (3.44)), atunci pe măsura finisării acestui proces, din cauza motivelor indicate mai sus, are loc căderea intensității E_0 pînă la E_c , la menținerea tensiunii inițiale U. Trecerea $E_0 \rightarrow E_c$ este datorată fie ecranării câmpului E_0 din contul sarcinilor electrice « ξ – strat», fie că e identică cu mărirea bruscă a rezistenței electrice a acestui strat. Mai degrabă au loc acțiuni ai ambilor factori.

În încheiere vom remarca că la filtrele electrice, în principiu, pot fi aplicate și câmpuri electrice variabile, dacă timpul de relaxare electrică a particulelor este cu mult mai mic decât perioada de variație a câmpului electric extern, în așa mod, ca pentru o semiperioadă de variație a câmpului, încărcarea particulei poate să reușească să-și schimbe semnul său electric. Însă din diverse motive, câmpurile variabile în filtrele electrice sunt utilizate mai rar decât cele constante. Unul din motive fiind schimbările neregulate de faze ale câmpului extern, dar și procesele de încărcare electrică al particulelor, diferite după parametrii fizici.

3.8. Cercetarea experimentală a procesului de separare a fazei disperse solidă de cea lichidă în suspensii dielectrice prin metode electrice. Dispersii semiconductoare și conductoare de curent electric

3.8.1. Rezultatele experimentale

3.8.1.1. Premise introductive

Anterior au fost examinate procesele de separație electrică, adică epurarea lichidelor dielectrice de particule cu rezistență electrică specifică mare, precum cele de ceară (în uleiul de floareasoarelui (cap. 2 și 3)). Totodată, în diverse domenii ale industriei, particulele de impurități pot să aibă o conductivitate cu mult mai mare, fiind semiconductoare sau conductoare, adesea, apare necesitatea de curățare a diverselor lichide dielectrice de aceste impurități, de exemplu poate fi vorba despre curățarea uleiului de motor de particule metalice microscopice ce s-au format în rezultatul frecării între suprafețele pistoanelor și cilindrelor motorului.

Pot fi aduse și multe alte exemple [1, 8], de aceea în cele ce urmează vom aborda probleme ce țin de separarea electrică a lichidelor dielectrice (tehnice) de impurități semiconductoare și conductoare de curent electric. În mod firesc, această cercetare trebuie să completeze procesul anterior – particulele dielectrice (ideale). În afară de acesta, lipsa datelor experimentale, în special, pentru uleiurile tehnice și particule mai conductoare, complică generalizările criteriale, importante la calculul separatoarelor electrice industriale.

Mai jos vom prezenta rezultatele cercetărilor experimentale referitor la procesul de curățare electrică a uleiului pentru transformatoare cu două tipuri de impurități: de crom Cr_2O_3 – semiconductor, și cărbunele activat electric – C. Dimensiunile particulelor nu depășesc ~10 µm, iar concentrația inițială constituie $\varphi_0 = 0,05\%$.

Standul experimental și metodica de cercetare sunt aceleași, ca și pentru particulele de ceară în uleiul de floarea soarelui (capitolul precedent). Datele experimentale au fost prelucrate în coordonatele t și $\varphi^*(t) \equiv \varphi(t) / \varphi_0$, unde $\varphi(t)$ – concentrația mediului la ieșirea din filtrul electric, măsurată prin luare de probe peste fiecare 5 minute după inițierea procesului de curățare.

3.8.1.2. Dispersiile semiconductoare

Dependențele tipice experimentale sunt prezentate în figura 3.5. E de menționat că poartă același caracter, ca și în cazul "uleiul floarea-soarelui + ceară", (cap.2, figura (2.5; 2.6)), ceea ce demonstrează mecanismul fizic, practic, comun al procesului de transfer de masă în ambele

cazuri. Concentrația mică inițială ($\varphi_0 = 0,05\%$), în comparație cu cazul impurităților de rezistență mare ($\varphi_0 = 0,5\%$) este limitată de posibilitatea formării unui câmp electric suficient de puternic, necesar pentru menținerea efectului de curățare. Deși curbele pe această figură sunt determinate în regim dinamic, le vom interpreta de pe pozițiile EHS, în prealabil observând că debitul, după cum și era de așteptat, are impact doar asupra valorii concentrației reziduale (pentru t $\rightarrow\infty$), adică la deplasarea curbelor pe verticală, lăsându-le similare (vezi figura 3.5). Nu se observă o mare deosebire între curățarea electrică dinamică și cea statică. Regimul dinamic de curățare urmează să fie prezentat în capitolul următor.

Curbele 1, 2 din figura 3.5. corespund debitului constat de lichide (Q = 7 ml/min) la diverse tensiuni ale filtrului electric: U = 6 kV și respectiv 9 kV. Se observă că odată cu creșterea tensiunii U sporește curățarea profundă.



Fig. 3.5. Dependența concentrației de impurități reziduale Cr_2O_3 în uleiul de transformator în funcție de timp $\varphi_0 = 0,05 \%$, U, 10³ V: 1-6; 2-9; 3-15; Q, ml/min.: 1, 2 -7,0; 3 - 10,0.

Despre influența consumului (debitului) asupra procesului de EE, se va discuta în continuare, însă de accentuat, că debitul de lichid în regim continuu acționează contrar tensiunii câmpului electric, adică cu cât e mai mare consumul, sunt mai mari concentrațiile de impurități la ieșirea din filtrul electric. Totuși, curba 3 cu toate că corespunde consumului maximum (Q = 10,0 ml/min), s-a dovedit a fi mai joasă față de celelalte (1,2). Nu e contradicție, deoarece acestei curbe îi corespunde și tensiunea maximală ($U = 15\kappa V$) și aceasta demonstrează faptul că se poate atinge o eficacitate înaltă a filtrelor electrice chiar și la consumuri mari din contul creșterii compensatoare a tensiunii de funcționare a FE. Vizual s-a constatat că particulele nu formează strat pe suprafața capcanelor colectorului, ca particulele de ceară. În cazul particulelor semiconductoare ele formează un nor, ce ocupă tot spațiul colectorului. Se observă tendințe slabe de structurare în regiuni de variație bruscă a câmpului electric, la marginile electrozilor.

3.8.1.3. Dispersii conductoare

Dependențele tipice $\varphi^*(t) = \varphi(t) / \varphi_0$, care sunt analoage celor anterioare, le vom examina de pe aceleași poziții EHS. Curbele respective sunt prezentate în figura 3.6. Spre deosebire de cazul dispersiilor semiconductoare (figura 3.5), avem o cădere inițială a concentrației cu timpul mai rapidă, și practic, în primele (5÷10) minute lichidul se curăță în proporție de (80÷90) la sută.



Fig. 3.6. Dependența concentrației de impurități reziduale de particulele de cărbune în uleiul de transformator φ_0 =0,05 %, U, 10³ V: 1-5; 2-7; Q, ml/min.: 1-10; 2-8.

Celelalte deducții referitor la influența câmpului și debitului asupra procesului de curățare rămân în vigoare. Vizual, particulele conductoare ca și cele semiconductoare, nu se depun pe suprafețele capcanelor sub formă de strat, dar formează un nor dens, împrăștiat în spațiul colectorului, spre deosebire de particulele semiconductoare, mișcarea lor e mai intensivă și nu se observă tendința de structurare.

3.8.2. Particularitățile fizice de separare electrică a particulelor semiconductoare și conductoare

Particularitățile distinctive de curățare electrică marcate în cazul particulelor semiconductoare și conductoare în comparație cu cele dielectrice (din ceară), pot fi explicate simplu: particulele nimerind pe contra-electrod (colector) cedează propria sarcină, se reîncarcă cu sarcină de același semn electric, ca și contra-electrodul, apoi sub acțiunea forțelor de respingere Coulomb se desprind, deplasându-se în direcție opusă, ceea ce nu are loc la particulele dielectrice, care se depun pe pereții colectorului. Un astfel de proces, în ansamblu, duce la formarea norilor de particule electrizate. În cazul particulelor semiconductoare există, tendința structurării, deși această tendință nu este bine pronunțată, spre deosebire de cazul particulelor conductoare, când avem o mișcare pur haotică, preponderent pe direcția liniilor de forță a câmpului electric.

O particularitate comună pentru toate particulele este aceea că la toate tensiunile U la filtrul electric (emiter) există "timpul critic" t_c , la expirarea căruia curățarea electrică, practic se întrerupe complet. În acest caz, se stabilește o oarecare concentrație reziduală constantă, minimă φ_{\min} , cu cât aceasta este mai mică, cu atât tensiunea aplicată la filtru electric este mai mare. Această particularitate în cazul particulelor dielectrice [100] a fost explicată mai sus (vezi cap. 2) [144]: fie prin mecanismul ecranării câmpului exterior cu sarcină eterogenă, sedimentată pe electrozi-capcane sub formă de strat, fie prin creșterea rezistenței electrice (ohmice) a acestui strat. Totodată, rămâne valabilă și aparenta dispariție "completă" a procesului de curățare din cauza diminuării rapide a funcției exponențiale de relaxare cu timpul. În cazul particulelor semiconductoare și conductoare, după cum s-a menționat, particulele nu formează straturi pe suprafața colectorului, de aceea sunt necesare alte explicații.

3.8.3. Rolul difuziei în procesul de separare a fazelor

În cazul particulelor dielectrice, de exemplu, din ceară, la lipirea acesteia pe pereții electrozilorcapcane, procesul difuziei inverse a particulelor de pe pereți, nu joacă nici un rol, deoarece lipsesc gradienții de concentrație a particulelor, necesari pentru acest proces. Cu totul e alta situația, dacă particulele sunt semiconductoare și conductoare, când din cauza reîncărcării [145] în locul stratului cu sarcină eterogenă aderent se formează nori de particule. În acest caz, se observă fenomenul de gradient de concentrație și rolul difuziei trebuie să fie examinat separat. Sub acest aspect, pornim de la ecuația generală a difuziei convective [146]

$$\gamma \left[\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \varphi \right] = -\nabla \mathbf{i} , \qquad (3.54)$$

unde **i** este densitatea fluxului de masă, inclusiv fluxul difuz și fluxul condiționat de forțele **f** ale câmpului electric exterior, conform formulei [146]

$$\mathbf{i} = -\gamma D \cdot \nabla \varphi + \gamma \cdot \varphi \cdot b \cdot \mathbf{f} , \qquad (3.55)$$

unde γ este densitatea de masă a mediului (amestecului); D – coeficientul de difuzie; b – coeficientul mobilității particulelor disperse. În această formulă produsul *bf n*u este altceva decât viteza de migrare directă a particulelor \mathbf{v}_E , proporțională cu forța, care în câmpul electric este coulombiană $\mathbf{f} = q \cdot \mathbf{E}$. Astfel, pentru viteza de migrare a particulelor se poate scrie relația

$$\mathbf{v}_{\mathbf{E}} = b \cdot q \mathbf{E} = b \cdot q \cdot (\mathbf{j}/\sigma), \qquad (3.56)$$

unde q este sarcina electrică a particulei; \mathbf{E} – intensitatea câmpului; $\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E}$ – densitatea de curent electric; σ – conductivitatea electrică specifică a mediului.

Înlocuind expresia (3.55) în relația (3.54) și ținând cont de (3.56), precum și de ecuația de continuitate $\nabla \mathbf{j} = 0$, în cazul unidimensional al câmpurilor electric și de viteze, vom obține:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + w \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \ 0 < z < l,$$
(3.57)

unde l - distanța dintre electrozi, iar w - viteza totală

$$w \equiv \upsilon + \frac{b|q|j}{\sigma},$$

v - fiind o viteză "efectivă" a vântului electric. Ecuația (3.57) cu privire la o presupusă constantă w este foarte simplificată, deoarece la această etapă ne interesează doar aspectul calitativ al problemei. La ecuația (3.57) trebuie alăturate condițiile inițiale și la frontiere. Să considerăm cazul când concentrația la momentul inițial t = 0 era constantă, egală cu φ_0 , în tot spațiul celulei experimentale. Totodată, să admitem că pe suprafața impenetrabilă tare a colectorului (la z =0) densitatea fluxului de masă (3.55) este egală cu zero. În așa mod, condițiile la limită sunt:

$$\varphi(z,t)\big|_{t=0} = \varphi_0 = const; \left(\frac{\partial\varphi}{\partial z} + \beta\varphi\right)\Big|_{z=0} = 0, \qquad (3.58)$$

unde $\beta \equiv w/D$. În continuare, urmează să soluționăm problema nestaționară (3.57) cu condițiile la limită (3.58), care în principiu sunt realizabile, prin prisma, metodei operaționale Laplace [152]. Ne vom limita cu examinarea cazului, nu mai puțin important, transferului de masă staționar, acesta fiind una din problemele prioritare.

3.8.3.1. Repartiția staționară a concentrației dispersiilor în spațiu

Vom găsi soluția staționară, presupunând că ea are loc atunci când t $\rightarrow \infty$, rezultând $\partial \varphi / \partial t \rightarrow 0$. Prima condiție (3.58), deocamdată nu va fi necesară, a doua trebuie respectată pentru orice moment, inclusiv la t $\rightarrow \infty$. Luând în considerare acest lucru, din (3.4) vom obține o ecuație diferențială obișnuită

$$\frac{d^2\varphi}{dz^2} + \beta \cdot \frac{d\varphi}{dz} = 0, \qquad (3.59)$$

cu soluția generală de forma,

 $\varphi(z) = C_1 + C_2 \exp(-\beta z),$

unde constanta de integrare C_1 are valoarea zero. Soluția respectivă poate fi pusă sub forma unei funcții exponențiale

$$\varphi(z) = \varphi_s \cdot \exp(-\beta z), \qquad (3.60)$$

unde $\varphi_s \equiv \varphi(0)$ este valoarea concentrației pe suprafața electrodului inferior (colectorului) în spațiul dintre electrozi $z \in [0;l]$. Despre legalitatea acestei dependențe staționare se poate de judecat și după faptul că ea reprezintă distribuția Boltzmann. Într-adevăr, dacă se ține cont de relația Einstein dintre coeficientul de difuzie *D* și mobilitatea *b* [146]

$$D=bkT,$$
(3.61)

precum și de notația β în (3.58), din (3.60) găsim distribuția Boltzmann

$$\varphi(z) = \varphi_s \cdot \exp(-W_p / kT), \qquad (3.62)$$

unde k este constanta lui Boltzmann; T – temperatura absolută; $W_p = f \cdot z$ – energia potențială a particulelor. Acest lucru se vede foarte clar în exemplul forței de gravitație $f=m_0 \cdot g$, unde m_0 este masa particulei. Din punct de vedere fizic, egalitățile (3.60) – (3.62) reflectă dispariția totală a densității fluxului de masă (3.53), adică, echilibrul dinamic dintre transferul substanței sub acțiunea câmpului forțelor externe **f** și transferul invers de masă prin difuzie. Acest echilibru se păstrează în toate punctele de referință ale dependențelor indicate.

Dacă presupunem că efectul de curățare constă doar în separarea particulelor pe colector, fără a schimba masa generală în chiuveta de lucru, ajungem la concluzia că redistribuirea spațială a particulelor nu schimbă concentrația medie $\overline{\varphi}$ a acestora.

Această concentrație este egală cu cea inițială $\overline{\varphi} = \varphi_0$. Astfel, în medie (3.60), poate fi găsită distribuția staționară a concentrației, în prealabil stabilind φ_s :

$$\overline{\varphi} = \varphi_0 \Longrightarrow \varphi_s = \frac{\beta \cdot l}{1 - \exp(-\beta l)} \cdot \varphi_0 \,. \tag{3.63}$$

Prin substituirea (3.63) în (3.60), se obține distribuția definitivă a concentrației

$$\varphi(z) = \frac{\beta \cdot l \cdot \exp(-\beta \cdot z)}{1 - \exp(-\beta \cdot l)} \cdot \varphi_0, \qquad (3.64)$$

care conține doar parametrii β , ϕ_0 și l, stabiliți pe cale experimentală.

3.8.3.2. Concentrația reziduală

Prin concentrație reziduală se subînțelege concentrația măsurată după finisarea procesului de curățare electrică, o vom nota cu $\overline{\varphi}_{\infty}$ (la t $\rightarrow \infty$). Aceasta coincide cu concentrația în zona de curățare, adică în afara zonei colectorului. Dacă ultima (zona emiterului) ocupă o oarecare grosime "efectivă" $0 < z < \xi$ (după înălțime), atunci zona de curățare va ocupa grosimea $\xi < z < l$. În fond, din această zonă se prelevează probe pentru măsurare. De aceea, pentru a stabili concentrația reziduală, este suficient să se găsească concentrația medie $\overline{\varphi}_{\infty}$ în limita $\xi < z < l$, adică integrând (3.60) și ținând cont de (3.63):

$$\overline{\varphi}_{\infty} = \frac{1}{l-\xi} \cdot \int_{\xi}^{l} \varphi_{s} \cdot \exp(-\beta \cdot z) \cdot dz \Longrightarrow \overline{\varphi}_{\infty} = \frac{\varphi_{0}}{1-(\xi/l)} \cdot \frac{\exp(-\beta \cdot \xi) - \exp(-\beta \cdot l)}{1-\exp(-\beta \cdot l)}$$
(3.65)

Această expresie este asimptotică ($t \rightarrow \infty$) cu caracter calitativ, deși explică imposibilitatea unei epurări ideale, însă dispariția "bruscă" a efectului de curățare rămâne a fi inexplicabilă. Cauzele [144], ce conduc la efectul de dispariție completă a epurării în cazul particulelor dielectrice, cu un anumit grad de probabilitate, pot rămâne în vigoare și în cazul particulelor semiconductoare. Dar, după cum s-a menționat, soluționarea definitivă a problemei revine experimentelor.

3.8.3.3. Dezbaterea pe marginea rezultatelor

Dependența exponențială (3.64) calitativ descrie în mod verosimil distribuția, observată în practică. Spre regret, situația e mai nefavorabilă în ceea ce privește distribuția respectivă în raport cantitativ, cauza fiind valoarea foarte mică a coeficientului de difuzie *D*. În legătură cu aceasta, vom evalua simplexul adimensional $\beta \cdot l$, calculând în prealabil *D*, conform corelației (3.61), acceptând coeficientul mobilității în conformitate cu formula Stokes

$$b=1/(6\pi\eta r),$$
 (3.66)

unde η este viscozitatea dinamică a mediului; r – raza particulei considerată aceeași pentru toate particulele. Substituind (3.66) în (3.61), obținem formula pentru coeficientul de difuzie

$$D = kT/(6\pi \eta r).$$
 (3.67)

Dacă se consideră $k=1,38\cdot10^{-23}$ J/K; T=300 K; $r=10^{-7}m$; $\eta=2\cdot10^{-2}$ Pa·s (uleiul de transformator), se obține D ~ 10^{-13} m²/s. Dacă ținem cont de relația (3.58) parametrul estimat va fi:

$$\beta \cdot l = (w \cdot l)/D. \tag{3.68}$$
Pentru $w \sim 10^{-5} \text{ m/s}$; $l \sim 10^{-3} \text{m}$, vom găsi $\beta \cdot l \sim 10^{5}$, în timp ce pe rezultatele rezonabile numerice se poate conta la valoarea acestui parametru $\beta \cdot l \sim 10^{-1} \div 10^{1}$. De aici și concluzia generală cu privire la modelul de difuzie cantitativ, nefondat pentru descrierea proceselor studiate.

Esența lipsei de temei a modelului examinat se reduce la faptul că în timpul epurării amestecului, practic, toate particulele (după motivele teoretice aduse) trebuie să se concentreze în stratul limită foarte îngust pe colector, cu grosimea de $\delta \sim 1/\beta \sim 10^{-8}$ m. Acesta este un strat foarte subțire, cu o grosime de $\sim 10^2$ straturi moleculare, iar particulele de impurități se observă, cu ochiul liber, în formă de nor în regiunile zonei colectorului. Totodată, din formulele (3.64), (3.65) rezultă formal concluzia corectă privind imposibilitatea curățării ideale, deoarece conform acestor formule în zona evacuării lichidului curățat, concentrația medie a particulelor niciodată nu va fi egală cu zero. Mai mult ca atât, toate formulele obținute rămân valabile, dacă este corectat coeficientul de difuzie, luând în considerare reîncărcarea electrică a particulelor, ceea ce vom încerca să facem mai jos.

3.8.3.4. Corecția modelului de difuzie prin "difuzia" electrică

Din cele expuse mai sus se poate trage concluzia că modelul teoretic de difuzie cu privire la descrierea procesului de curățare electrică ar putea fi util, dacă coeficientul de difuzie D ar fi cu mult mai mare. Însă pentru început este necesar de a fi elucidate mecanismele fizice, care ar putea oferi o asemenea contribuție substanțială la revenirea fluxului de masă. Unul dintre aceste mecanisme a fost deja notat. E vorba despre reîncărcarea particulei, care încă nu a fost luată în considerare. Mișcarea particulei reîncărcate în direcția inversă, sub influența forței de respingere electrostatică și este mecanismul respectiv, care ar putea aduce claritate în tabloul fizic al proceselor ce au loc.

Densitatea sarcinilor electrice condiționate de reîncărcarea particulelor pot fi determinate cu formula generală

$$\rho = \nabla(\varepsilon \mathbf{E}) = \nabla(\varepsilon \mathbf{j}/\sigma) = \mathbf{j} \cdot \nabla \tau = \frac{d\tau}{d\varphi} \cdot \mathbf{j} \cdot \nabla \varphi, \qquad (3.69)$$

unde $\tau = \varepsilon/\sigma$ este timpul Maxwell de relaxare și ε permeabilitatea dielectrică absolută. La obținerea (3.69) s-a ținut cont de ecuația continuității densității curentului electric (vezi mai sus). Densitatea fluxului de masă condiționată de sarcina (3.69) va fi stabilită în modul următor:

$$\mathbf{i}' = \gamma_1 \cdot b \cdot q \cdot \mathbf{E} = b \cdot m_0 \cdot (n_1 \cdot q) \cdot \mathbf{E} = b \cdot m_0 \cdot \rho \cdot \mathbf{E} = b \cdot m_0 \cdot \frac{\mathbf{j}}{\sigma} \cdot \frac{d\tau}{d\varphi} \cdot (\mathbf{j} \cdot \nabla \varphi), \qquad (3.70)$$

unde m_0 este masa particulei; n_1 - numărul acestora în unitate de volum; $\gamma_1 = m_0 \cdot n_1$ - densitatea masei. Această mărime trebuie să fie alăturată la partea dreaptă (3.55), obținând

$$\mathbf{i} = -\gamma D \cdot \nabla \varphi + \gamma \cdot \varphi \cdot b \cdot \mathbf{f} - b \cdot m_0 \cdot \frac{\mathbf{j}}{\sigma} \cdot \left| \frac{d\tau}{d\varphi} \right| \cdot (\mathbf{j} \cdot \nabla \varphi) , \qquad (3.71)$$

unde s-a atras atenția că timpul de relaxare diminuează odată cu creșterea concentrației din cauza măririi conductivității. Ținând seama de (3.71), pentru ecuația (3.57) se găsește

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D_* \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + w \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \qquad (3.72)$$

Deci tot aceeași ecuație, (3.57), dar cu coeficientul de difuzie modificat

$$D_* \equiv D + \frac{bm_0 \cdot j^2}{\gamma \cdot \sigma} \cdot \left| \frac{d\tau}{d\varphi} \right|, \tag{3.73}$$

Termenului al doilea al ecuației (3.73) – i se poate atribui sensul de coeficient de difuzie "electric", ceea ce înseamnă

$$D_e = \frac{bm_0 \cdot j^2}{\gamma \cdot \sigma} \cdot \left| \frac{d\tau}{d\varphi} \right| = \mu \cdot \frac{j^2}{\sigma} \cdot \left| \frac{d\tau}{d\varphi} \right|.$$
(3.74)

Accentuăm că difuzia, inclusiv și cea "electrică", în virtutea direcției opuse, nu este favorabilă pentru separația fazei, din contra, joacă un rol negativ în procesul de separație electrică, cu toate acestea, duce la rectificarea distribuțiilor observate experimental $\varphi(z)$. Pentru verificarea supoziției înaintate, este necesar de a evalua parametrul D_e . Se face notația

$$\mu \equiv \frac{bm_0}{\gamma} = \frac{2 \cdot r^2 \cdot \gamma_0}{9 \cdot \eta \cdot \gamma}, \qquad (3.75)$$

unde γ_0 este densitatea materialului special. În continuare, conform modelului de mediu de dispersie dielectric, au fost obținute următoarele formule [147]:

$$\varepsilon = \varepsilon_2 + \varphi \cdot \frac{3(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2}; \ \sigma = \sigma_2 + \varphi \cdot \frac{3(\sigma_1 - \sigma_2)\sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2}, (3.76)$$

unde indicii «1» și «2» se referă la faza dispersă și cea închisă. Ținând cont de faptul că conductivitatea particulelor este mult mai mare decât cea a fluidului purtător, adică $\sigma_1 >> \sigma_2$ și considerând $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$, se obține

$$\frac{d\tau}{d\varphi} = -\frac{3 \cdot \tau_2}{\left(1 + 3 \cdot \varphi\right)^2} \cdot (3.77)$$

Din (3.74) pe baza relațiilor (3.75) - (3.77) rezultă

$$D_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{r^2}{\eta} \cdot \frac{\gamma_0}{\gamma} \cdot \frac{\varepsilon_2 \cdot E^2}{1 + 3 \cdot \varphi}, \qquad (3.78)$$

unde intensitatea câmpului electric este dată de relația

$$E = j / [\sigma_2 \cdot (1 + 3 \cdot \varphi)]. \tag{3.79}$$

În scopul estimării, termenul 3 φ din (3.78), (3.79) poate fi eliminat, din cauza valorii foarte mici ($\varphi \le 5 \cdot 10^{-3}$). Dacă presupunem că r~10⁻⁶ m; $\eta \sim 10^{-2}$ Pa·s; $\gamma_0 / \gamma \sim 1$; $\varepsilon_2 \sim 2 \cdot 9 \cdot 10^{-12}$ F/m; E~10⁶V/m, pentru coeficientul de difuzie electrică vom găsi $D_e \sim 10^{-9}$ m²/s, fiind de patru ordine mai mare decât coeficientul de difuzie obișnuit (vezi mai sus). În acest caz, $\beta \cdot l \le 10$ și se încadrează în intervalul valorii indicate mai sus, necesar pentru o descriere adecvată a transferului de masă în limita modelului examinat cu coeficientul de difuzie modificat. De observat, că spre deosebire de D, coeficientul de difuzie "electric" D_e crește pătratic, odată cu creșterea razei particulei, ceea ce trebuie de avut în vedere la calcule.

Drept exemplu, vom examina distribuția $\varphi(z)$, conform formulei (3.64), în mod aproximativ propunându-ne $\beta \cdot l \approx 5$. Considerăm $l=5 \cdot 10^{-2}$ m $=> \beta \approx 10^2$ m⁻¹. Atunci se ajunge la cazul particular

$$\varphi^* \equiv \varphi(z) / \varphi_0 \approx 5 \cdot \exp(-z) , \qquad (3.80)$$

unde z se exprimă în *cm*, și am neglijat exp(-5) în numitorul (3.64). Coeficientul 5 înaintea egalității (3.80) arată că concentrația particulelor pe colector e de cinci ori mai înaltă față de cea medie sau de cea inițială. În general, această valoare ar trebui să fie mai mare.

Analog, cu formula (3.65) se poate estima concentrația reziduală. De exemplu, dacă presupunem că $exp(-5) \ll 1$, $\xi/l = 0,4$ din (3.65) vom găsi

$$\overline{\varphi}_{\infty} \approx \frac{\varphi_0 \cdot [\exp(-\beta \cdot \xi) - \exp(-\beta \cdot l)]}{1 - (\xi/l)} \Longrightarrow \overline{\varphi}_{\infty} \approx \frac{\varphi_0 \cdot [\exp(-0, 4 \cdot 5) - \exp(-5)]}{1 - 0, 4} \approx 0.2 \cdot \varphi_0,$$

rezultat care se află în bună concordanță cu datele graficelor din figurile 3.5, 3.6.

Pe marginea rezultatelor obținute se poate spune că o simplă corectare a modelului de difuzie duce la rezultate raționale relative nu numai de calitate, ci și la rezultate cantitative ale procesului de curățare electrică, însă rămân nesoluționate o serie de probleme precum dispariția bruscă a

curățării, durata curățării, etc. Pentru soluționarea acestora este necesară abordarea unor probleme mai complicate, posibil neliniare și nestaționare de transfer de masă, care de fapt constituie obiectul de studiu.

3.8.4. Dependența concentrației impurităților de timp

3.8.4.1. Noțiuni introductive

O caracteristică importantă a oricărui filtru electric este timpul de curățare, mărime care nu poate fi găsită în baza soluționării staționare a problemei. În afară de aceasta, datele experimentale cu privire la filtrarea electrică sunt prezentate sub aspectul dependenței concentrației la ieșirea din filtrul electric în funcție de timp (figurile 2.5; 2.6; 3.5; 3.6). Pentru interpretarea teoretică a acestor dependențe este necesar de a căuta caracteristici nestaționare. Acest paragraf [148] este, într-o măsură oarecare, continuarea celui precedent, având drept scop de a răspunde la aceste întrebări. Ținând cont de complexitatea soluționării problemelor nestaționare vom căuta abordări aproximative, accesibile pentru calculele inginerești de optimizare și proiectare a filtrelor electrice. Deoarece la examinarea de mai departe, o mare însemnătate au particularitățile constructive ale filtrului și principiul de funcționare a acestuia, concis vom examina aceste probleme referitoare la FE, prezentate în schema generală din figura 2.1.

3.8.4.2. Particularitățile constructive ale electrofiltrului

Filtrul electric experimental din figura 2.1 este prezentat schematic în figura 3.7. Pe electrodul din partea de sus 1, care reprezintă un conductor de cupru cu lungimea 10 cm și diametru 2 mm, cu izolație emailată perforată, s-a aplicat o tensiune negativă. Prin analogie cu gazele, perforațiile au jucat rolul acelor coronare și la o tensiune suficientă apărea descărcarea cu efect coronă, însoțită de vânt electric (VE).



Fig. 3.7. Schema de principiu a filtrului electric.

Acest electrod cu crestături 3 este emitor (injectorul sarcinii). Drept contra-electrod a servit o placă orizontală legată la pământ 2, în apropierea căreia a fost montat sistemul de plăci metalice 4, izolate electric de electrozii 1 și 2. Plăcile primeau potențialii mediului ambiant (potențiali "flotanți", vezi și figura 2.1). Un așa sistem a jucat rolul capcanelor pentru particulele de impurități. Separația fazelor are loc din cauza că, dispersiile în câmpul electrodului de ionizare (emiter) se încarcă, în cazul nostru negativ și, sub acțiunea forțelor coulombiene $q \cdot E$, sunt respinse în jos către electrodul opus, unde și nimeresc în capcană. De aceea contra-electrodul, împreună cu capcanele, joacă rolul colectorului de particule, fapt care s-a menționat.

Conform amplasării FE din figura 3.7 vom menționa că particulele se depun în colector și datorită gravității $m_0 \cdot g$, unde m_0 este masa particulelor. Mai mult ca atât, vântul electric favorizează transportul conectiv al particulelor spre colector cu o oarecare viteză efectivă v. Rolul FE constă și în nivelarea concentrației după volumul filtrului electric.

În continuare se presupune că colectorul ocupă un spațiu cu grosimea ξ , celălalt spațiu cu grosimea $l - \xi$, unde *l* este distanța dintre electrozi, se va numi zona de curățare (figura 3.7).

3.8.4.3. Metodica de efectuare a experimentelor

Problemele legate de metodologia efectuării experimentelor au fost examinate în p. 2.2. Aici, se menționează doar pentru a înțelege esența formulării și soluționării problemei respective. În primul rând, se reamintește că epurarea electrică poate fi efectuată în două regimuri: static și dinamic. În al doilea, la consumul mic de lichid calitatea curățării se apropie de cea statică, de aceea în acest paragraf ne vom limita la cercetarea curățării statice, adică la o separație "unică" la care masa totală de impurități se desprinde de faza închisă și se deplasează spre intrarea frontală în colector, în orice moment rămânând constantă în spațiul celulei de lucru. Soluționând problema statică, putem trece la cea dinamică.

Circumstanța principală - la curbele experimentate (figurile 3.5; 3.6) pe axele ordonatelor s-au trasat concentrațiile probelor de mediu, prelevate din zona de curățare « $l - \xi$ ». Întrucât, vizavi de această zonă, este montat ventilul pentru evacuarea lichidului, concentrația respectivă și este cea necunoscută (căutată).

3.8.4.4. Formularea problemei

În condițiile experimentale (figura 3.7) urmează interpretarea teoretică a curbelor, prezentate în figurile 3.5; 3.6, adică se pune problema cu privire la găsirea concentrației medii de impurități în zona de curățare, ca o funcție de timp. Însemnând zona colectorului cu cifra «1», zona emiter cu

cifra «2», concentrațiile medii în aceste zone, ca funcție de timp, $\overline{\varphi}_1(t)$ și $\overline{\varphi}_2(t)$, se pune problema de a găsi $\overline{\varphi}_2(t)$.

Pentru soluționarea ei, se pleacă de la ecuațiile generale de convecție-difuzie [146], modificate prin introducerea coeficientului "generalizat" de difuzie D_* (vezi mai jos) [145]

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D_* \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + w \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \ 0 < z < l, \tag{3.81}$$

unde l este distanța dintre electrozi (figura 3.7),

$$w \equiv \frac{b|q|j}{\sigma} + \upsilon + m_0 g b \tag{3.82}$$

– valoarea vitezei sumare efective, primul termen reprezentând viteza directă, condiționată de forța coulombiană, b – mobilitatea particulelor, q – sarcina electrică, $E=j/\sigma$; j – densitatea de descărcare a curentului, σ – conductivitatea, v – viteza "efectivă" a vântului electric estimată cu relația [147]

$$\upsilon = c \cdot \frac{v}{d} \cdot \left(\frac{jd^3}{k\gamma v^2}\right)^{1 \to 0.5},\tag{3.83}$$

în care $v = \eta/\gamma$ este viscozitatea cinematică; κ – mobilitatea ionilor cu semnul electrodului de ionizare; d – dimensiunea caracteristică a electrodului de ionizare (coronă); c – coeficient de proporționalitate, $c\sim I$. Exponentul puterii descrește de la valoarea 1 până la 0,5 în măsura extinderii vântului electric de la regimul laminar la cel turbulent. Pentru generalizare și comparație s-a luat în vedere și viteza, determinată de gravitatea particulelor.

În ecuația (3.81) prin D_* trebuie de avut în vedere coeficientul generalizat de difuzie [145]

$$D_* \equiv D + \frac{bm_0 \cdot j^2}{\gamma \cdot \sigma} \cdot \left| \frac{d\tau}{d\varphi} \right|. \tag{3.84}$$

Al doilea termen din (3.84) poate avea sens de coeficient de difuzie, electric", fiind notat

$$D_e = \frac{bm_0 \cdot j^2}{\gamma \cdot \sigma} \cdot \left| \frac{d\tau}{d\varphi} \right|, \tag{3.85}$$

unde $\tau = \varepsilon/\sigma$ este timpul de relaxare electrică, iar mobilitatea particulelor se stabilește cu formula lui Stokes [146]

$$b = 1/(6\pi \eta r).$$
 (3.86)

Cunoscând această valoare, coeficientul de difuzie obișnuit poate fi găsit cu formula lui Einstein

$$D = kT b = kT/(6\pi \eta r),$$
(3.87)

unde k este constanta lui Boltzmann și T - temperatura absolută.

Pentru ecuația (3.81) sunt necesare condițiile inițiale și la frontiere. Considerăm concentrația la momentul inițial t=0 în celulă experimentală constantă, egală cu φ_0 . În afară de aceasta, admitem pe suprafața impermeabilă solidă a colectorului (la z=0) și pe electrodul din partea de sus (la z =l) densitatea fluxului de masă se prezintă prin relația

$$i = D_* \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} + w \cdot \varphi,$$

egale cu zero. Astfel, condițiile inițială și la frontiere sunt:

$$\varphi(z,t)\Big|_{t=0} = \varphi_0 = const; \left(D_* \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} + w \cdot \varphi \right)\Big|_{z=0; l} = 0.$$
(3.88)

În publicația [145] este soluționată problema staționară $(\partial \varphi / \partial t = 0)$, când densitatea fluxului de masă este egală cu zero pentru orice z. Mai jos vom examina ecuația nestaționară (3.81) sub aspectul problemei, ce a fost formulată mai sus, referitor la determinarea concentrației medie în funcție de timp în zona de curățare, adică a funcției $\overline{\varphi_2}(t)$ [148]. Pentru soluționarea acestei probleme e necesar de a avea cunoștințe în ceea ce privește distribuția totală $\varphi(z,t)$, care este foarte complicat de a fi găsită. De aceea, vom căuta o soluție aproximativă, utilă pentru interpretarea fizică a datelor experimentale, inclusiv, pentru calculele inginerești.

3.8.4.5. Soluționarea problemei

După cum s-a menționat, spațiul în interiorul filtrului se divizează în două regiuni. Fie ca distribuția concentrației la un moment dat $\varphi(z,t)$ are forma conform figurii 3.8. Egalitatea $z = \xi$ este ecuația graniței, ce divizează aceste două regiuni. Suprafața este limitată în partea de sus de curba $\varphi(z,t)$, iar în partea de jos de axa abscisei la $0 \le z \le l$, în baza teoremei cu privire la valoarea medie, este egală cu

$$S_0 = \int_0^l \varphi(z,t) \cdot dz = l \cdot \overline{\varphi} , \qquad (3.89)$$

unde bara asupra mărimii fizice indică valoarea medie. Vom demonstra că aceasta este egală cu concentrația inițială adică $\overline{\varphi} = \varphi_0$. Natural, întrucât toată masa din celulă poate doar să fie redistribuită în procesul de separare, rămânând în general constantă. În acest caz vom obține:

$$m = \int_{(m)} dm = \gamma \int_{0}^{l} \varphi \cdot S \cdot dz = \gamma \cdot S \cdot \int_{0}^{l} \varphi \cdot dz = \gamma \cdot S \cdot l \cdot \overline{\varphi} = \gamma \cdot V \cdot \overline{\varphi} = \gamma \cdot V \cdot \varphi_{0} \Longrightarrow \overline{\varphi} = \varphi_{0}$$

aceasta fiind egalitatea necesară. S este suprafața secțiunii transversale (de lucru) a FE.



Fig. 3.8. Distribuția $\varphi(z,t)$ după zone

Din altă parte, integrala (3.89) poate fi împărțită în două (vezi figura 3.8), după cum urmează

$$S_0 = S_1 + S_2 = \int_0^{\xi} \varphi(z,t) \cdot dz + \int_{\xi}^{l} \varphi(z,t) \cdot dz \Longrightarrow \ l \cdot \varphi_0 = \xi \cdot \overline{\varphi}_1(t) + (l - \xi) \cdot \overline{\varphi}_2(t) = const ,$$
(3.90)

unde S₁ și S₂ sunt suprafețele sub curbă $\varphi(z,t)$ de asupra segmentelor $[0;\xi]$ și $[\xi;l]$, respectiv.

Punctele ξ_1 și ξ_2 reprezintă centrele curbelor $\varphi_1(z,t)$ și $\varphi_2(z,t)$ de asupra segmentelor indicate. Pentru obținerea egalităților (3.89), (3.90) s-a folosit teorema valorii medii.

Valoarea $\overline{\varphi_2}(t)$ se obține prin integrarea ecuației (3.81) în care variabila z are limitele $\xi \le z \le l$ (vezi figurile 3.7; 3.8)

$$\int_{\xi}^{l} \frac{\partial \varphi}{\partial t} dz = \int_{\xi}^{l} \frac{\partial}{\partial z} \left(D_* \frac{\partial \varphi}{\partial z} + w \cdot \varphi \right) \cdot dz \Longrightarrow (l - \zeta) \cdot \frac{d \overline{\varphi_2}(t)}{dt} = -D_* \cdot \frac{\partial \varphi(z, t)}{\partial z} \Big|_{z = \xi} - w \cdot \varphi(z, t) \Big|_{z = \xi}, \quad (3.91)$$

unde în integrala marginală din stânga a fost schimbată ordinea de diferențiere și integrare, iar din dreapta – considerată a doua din condițiile la frontiere (3.88). Ultima - este ecuația diferențială de bază, din care urmează a fi găsită funcția căutată $\overline{\varphi_2}(t)$.

După cum urmează din partea dreaptă (3.91) este necesar de a cunoaște concentrația $\varphi(\xi,t)$ la hotarul de divizare a regiunilor cercetate $z = \xi$, ca funcție de timp t, precum și derivata respectivă $\frac{\partial \varphi(\xi,t)}{\partial z}$ la același hotar. Funcțiile indicate le vom aproxima prin necunoscuta $\overline{\varphi_2}(t)$, în raport cu care este alcătuită ecuația diferențială (3.91).

Începem cu ultimul termen (3.91), factorul principal de curățare, pentru început neglijând transferul de difuzie (primul termen din dreapta (3.91)). În acest caz ($D_* = 0$) în aproximarea de ordinul unu, pur și simplu, punem $\varphi(\xi,t) = \overline{\varphi_2}(t)$ și atunci ecuația (3.91) va prezenta:

$$(l-\varsigma) \cdot \frac{d\varphi_2(t)}{dt} = -w \cdot \overline{\varphi}_2(t), \qquad (3.92)$$

cu soluția

$$\overline{\varphi}_2(t) = \varphi_0 \cdot \exp[-wt/(l-\xi)],$$

(3.93)

care este potrivită pentru aproximarea menționată, fiind în concordanță și cu datele experimentale. Există posibilitatea de a preciza în continuare soluția, observând în figura 3.8, că funcția aproximată verifică inegalitatea $\overline{\varphi_2}(t) \le \varphi(\xi, t) \le \overline{\varphi_1}(t)$ și aceasta arată că introducând un parametru de mediere $0 \le \mu \le 1$, se poate scrie

$$\varphi(\xi,t) = \overline{\varphi_2}(t) + \mu \cdot [\overline{\varphi_1}(t) - \overline{\varphi_2}(t)], \qquad (3.94)$$

unde pentru $\mu = 0$ obținem limita inferioară pentru valoarea aproximativă $\varphi(\xi,t) = \overline{\varphi_2}(t)$, iar pentru $\mu = 1$ limita superioară $\varphi(\xi,t) = \overline{\varphi_1}(t)$. Pentru alte valori admisibile $0 < \mu < 1$, funcția $\varphi(\xi,t)$ acoperă toate valorile sale posibile. Ținând cont, că funcțiile $\overline{\varphi_1}(t)$ și $\overline{\varphi_2}(t)$ au relații de dependență (3.90), din care rezultă

$$\overline{\varphi}_1(t) = \overline{\varphi}_2(t) + \frac{l}{\xi} \cdot [\varphi_0 - \overline{\varphi}_2(t)]$$
(3.95)

valoarea $\varphi(\xi,t)$ conform (3.94), poate fi exprimată pe deplin doar prin funcția necunoscută $-\overline{\varphi_2}(t)$ și concentrația inițială cunoscută deja φ_0

$$\varphi(\xi,t) = \overline{\varphi}_2(t) + \frac{\mu l}{\xi} \cdot [\varphi_0 - \overline{\varphi}_2(t)].$$
(3.96)

Parametrul μ poate fi concretizat prin compararea datelor experimentale cu cele teoretice. Pentru estimarea și efectuarea calculelor inginerești este necesar de urmat tabelul 3.7, în care sunt prezentate unele valori parțiale μ și $\varphi(\xi,t)$; pot fi precizate pe cale experimentală după gradul de transparență a mediului sau, stabilind concentrația la intrarea nemijlocită în colector.

Tabelu	ıl 3.7

μ	0	1⁄2	3⁄4	ξ/l	1
$\varphi(\xi,t)$	$\overline{\varphi_2}(t)$	$[\overline{\varphi_1}(t) + \overline{\varphi_2}(t)]/2$	$[3\overline{\varphi_1}(t)+\overline{\varphi_2}(t)]/4$	$arphi_0$	$\overline{\varphi_1}(t)$

Ecuația (3.91) pentru funcția aproximativă (3.96) are forma

$$(l-\xi)\cdot\frac{d\overline{\varphi_2}(t)}{dt} = -w\cdot\left[\overline{\varphi_2}(t)\cdot\left(1-\frac{\mu l}{\xi}\right) + \frac{\mu l}{\xi}\cdot\varphi_0\right],\tag{3.97}$$

fiind ușor de integrat. Să trecem la generalizare prin luarea în considerare a difuziei și (3.97) va rezulta ca un caz particular.

Calculul primului termen din partea dreaptă a ecuației (3.91) îl vom efectua pe baza analogiei cu transferul termic dintre două straturi cu diferite temperaturi, când trecerea fluxului de căldură de la un strat la altul, este determinată de legea lui Newton, adică e direct proporțională cu diferența de temperatură. În cazul transferului de mase, rolul temperaturii îl joacă concentrația [152]. Procedura se reduce la aproximația derivatei prin raportul diferenței de temperatură în cazul transferului termic sau concentrației, în cazul transferului de masă – la grosimea stratului limită δ . De aceea, pentru primul termen din partea dreaptă (3.91), adică pentru fluxul de difuzie i_D vom scrie:

$$i_{D} \equiv -D_{*} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} \bigg|_{z=\xi} = -D_{*} \cdot \frac{\overline{\varphi}_{1}(t) - \overline{\varphi}_{2}(t)}{\delta} = -\alpha \cdot [\overline{\varphi}_{1}(t) - \overline{\varphi}_{2}(t)], \qquad (3.98)$$

unde $\alpha \equiv D_*/\delta$ este coeficientul de transfer de masă; δ - grosimea stratului limită din apropierea suprafeței z = ξ . Substituind (3.96), (3.98) în (3.91) și luând în considerare (3.95), se obține ecuația finală pentru funcția căutată $\overline{\varphi_2}(t)$

$$(l-\xi) \cdot \frac{d\varphi_2(t)}{dt} = -A \cdot \overline{\varphi_2}(t) + B \cdot \varphi_0, \qquad (3.99)$$

unde

$$A \equiv w + B, \ B \equiv (\alpha - \mu \cdot w) \cdot (l/\xi). \tag{3.100}$$

Aceasta și este ecuația de lucru în formă generală, dar (3.92.) și (3.97) reprezintă cazuri particulare pentru: B=0 ($\alpha = 0$ și $\mu = 0$) și $\alpha = 0$, $\mu \neq 0$, respectiv.

Ecuația are doi parametri principali: $\alpha \equiv D_*/\delta$ și μ , cu care sunt stabilite, practic, toate particularitățile procesului de separație electrică. Parametrul μ stabilește regimurile de curățare, iar α caracterizează rolul obstructiv al difuziei în acest proces. Deși ecuația (3.99) este simplă, datorită faptului că mărimile A și B pot lua valori diferite atât pozitive, cât și negative, sunt posibile un șir de variante de soluții, ce ar cuprinde, practic, toate modelele de curățare electrică. Acum vom trece la examinarea acestora.

3.8.4.6. Analiza rezultatelor

Vom reieși din soluția generală a ecuației (3.99)

$$\left|\overline{\varphi}_{2} - (B/A) \cdot \varphi_{0}\right| = \varphi_{0} \cdot \left|1 - (B/A)\right| \cdot \exp[-At/(l-\xi)], \qquad (3.101)$$

care după împărțire la concentrația inițială φ_0 , se transcrie:

$$\left|\bar{\varphi}^{*} - (B/A)\right| = \left|1 - (B/A)\right| \cdot \exp[-At/(l-\xi)], \qquad (3.102)$$

unde $\overline{\varphi}^{*}(t) \equiv \overline{\varphi}_{2}(t) / \varphi_{0}$, pentru simplitate se omite indicele «2».

În dependență de semnul *B*, vom examina următoarele modele:

Din (3.102) vom obține soluția analizată deja (3.93)

$$\overline{\varphi}^*(t) = \exp[-A \cdot t / (l - \xi)], \qquad (3.103)$$

de unde urmează la t $\rightarrow \infty$ concentrația $\overline{\phi}^* \rightarrow 0$, adică are loc curățarea totală, ceea ce în practică nu putem obține, aceasta fiind unul din dezavantajele soluției (3.103).

II. B>0=>A>0.

În acest caz, conform (3.100), B/A < 1 și din (3.102) rezultă

$$\overline{\varphi}^* = \overline{\varphi}^*_{\min} + (1 - \overline{\varphi}^*_{\min}) \cdot \exp[-A \cdot t / (l - \xi)], \qquad (3.104)$$

unde

$$\bar{\varphi}_{\min}^* = B/A = 1/[1+(w/B)].$$
 (3.105)

Din (3.103), dacă luăm în considerare egalitatea (3.100) pentru *B*, se vede că la $\mu w \rightarrow \alpha \Rightarrow \overline{\varphi}_{\min}^* \rightarrow 0$, adică în măsura în care fluxul de migrare a particulelor tinde să echilibreze fluxul de difuzie, gradul de curățare electrică se ridică. Urmează o concluzie generală evidentă: inaccesibilitatea gradului de curățare de 100 % e determinată de prezența proceselor de difuzie. Pe lângă aceasta, conform (3.103), constatăm că la creșterea vitezei sedimentării particulelor în colector *w* duce la intensificarea procesului de curățare.

III. $B < \theta \Rightarrow \mu \cdot w > \alpha \equiv D / \delta$.

În acest caz, vom nota $B = -|B| \Longrightarrow |B| = (\mu w - \alpha) \cdot (l/\xi)$ și atunci din (3.99) vom obține

$$(l-\xi) \cdot \frac{d\bar{\varphi}^*(t)}{dt} = -A \cdot \bar{\varphi}^*(t) - |B|, \qquad (3.106)$$

unde

$$A \equiv w - \left| B \right|. \tag{3.107}$$

Aici sunt posibile trei modele.

III.1.
$$A=0=>w=|B|$$
.

Soluția (3.102) pierde sensul, dar din (3.106) găsim soluția în formă de funcție liniară

$$\overline{\varphi}^* = 1 - [|B| \cdot t / (l - \xi)].$$
(3.108)

Asemenea dependențe, în experimentele [100, 136], n-au fost depistate și apropo în acest caz, timpul de curățare, e limitat de valoarea:

$$t \le t_c = (l - \xi) / |B|;$$
 (3.109)

III.2.
$$A > 0 = > w > |B|$$
.

Soluția (3.106) are forma formulei (3.102), în care a fost înlocuit $B \rightarrow -|B|$, adică

$$\overline{\phi}^* + (|B|/A) = 1 + (|B|/A) \cdot \exp[-At/(l-\xi)].$$
(3.110)

Și aici, rezultă

$$\overline{\varphi}^* = 1 - (|B|/A) \{1 - \exp[-At/(l-\xi)]\}.$$
(3.111)

Aici, la rândul său, sunt posibile trei modele.

III.2.1 |B| = A.

Din (3.101) obținem formula cunoscută deja (3.103).

III.2.2.
$$|B| < A => |B| < w/2 =>$$

$$[\mu - (\xi/2l)] \cdot w < \alpha . (3.112)$$

În special, dacă este neglijată difuzia ($\alpha = 0$), atunci din (3.112) urmează $\mu < \xi/(2l)$, care într-o măsură oarecare, limitează intervalul de valori ale parametrului μ .

Pentru t→∞

$$\overline{\varphi}^* = 1 - \left(\left|B\right|/A\right) \equiv \overline{\varphi}^*_{\min} \,. \tag{3.113}$$

•

III.2.3.
$$|B| > A => |B| > w/2 => [\mu - (\xi/2l)] \cdot w > \alpha$$

Pentru t $\rightarrow \infty$

$$\overline{\phi}^* = 1 - (|B|/A) < 0,$$
(3.114)

ceea ce nu ar trebui să fie, acest lucru înseamnă că timpul de separare este limitat. Echivalând la zero partea dreaptă a egalității (3.111), vom găsi

$$t \le t_c = -\frac{l-\xi}{A} \cdot \ln[1 - (A/|B|)].$$
(3.115)

În sfârșit, vom examina modelul

III.3. A < 0 = >w < |B|.

Vom nota $A \equiv -|A| \Longrightarrow |A| \equiv |B| - w$. Ecuația (3.54) va avea forma:

$$(l-\xi) \cdot \frac{d\bar{\varphi}^*(t)}{dt} = |A| \cdot \bar{\varphi}^*(t) - |B|.$$
(3.116)

Soluția ecuației (3.116) va fi:

$$\overline{\varphi}^* = |B|/|A| + [1 - (|B|/|A|)] \cdot \exp[|A| \cdot t/(l - \xi)].$$
(3.117)

Pentru ecuația respectivă, de asemenea, sunt posibile 3 modele.

III.3.1
$$|B| = |A|$$
.

Din (3.117) vom obține $\overline{\varphi}^*=1$, adică lipsa procesului de curățare.

III.3.2.
$$|B| < |A|$$
.

De asemenea, din (3.117) vom obține

$$\exp[|A| \cdot t / (l - \xi)] = \frac{\overline{\varphi}^* - (|B| / |A|)}{1 - (|B| / |A|)}, \qquad (3.118)$$

–egalitatea imposibilă în inegalitatea $\overline{\phi}^* \leq 1$.

III.3.3.
$$|B| > |A|$$
.

Din (3.117), în loc de (3.118), urmează

$$\exp[|A| \cdot t / (l - \xi)] = \frac{(|B| / |A|) - \overline{\varphi}^*}{(|B| / |A|) - 1}$$
(3.119)

Şi se vede că la $\overline{\varphi}^* = 0$ există timp limitat pentru curățare, egal cu

$$t_{c} = \frac{l - \xi}{|A|} \cdot \ln \frac{(|B|/|A|) - \overline{\varphi}^{*}}{(|B|/|A|) - 1}.$$
(3.120)

În așa mod, la A < 0 și B < 0 problema poate fi soluționată numai dacă |B| > |A|, de fapt, există timp de o curățare finală, stabilit de egalitatea (3.120).

Din soluțiile prezentate pentru explicarea și descrierea datelor experimentale din figurile 3.5 și 3.6, cele mai adecvate sunt (3.104), (3.105).

Pentru comparație, în figura 3.9 este prezentată curba teoretică, construită după formula (3.104), în care, conform graficului curbei 1 din figura 3.5, se constată: $\bar{\varphi}_{\min}^* = 0,19$, iar coeficientul în exponenta (3.104) egal cu $A/(l-\xi) = 0,439$, determinat de un punct: (10;0,20). După cum se observă, curba teoretică în figura 3.9 urmează curba experimentale *1* figura 3.5. Aceasta demonstrează că structura formulelor prezentate mai sus redă corect esența fizică a mecanismelor, care stau la baza acestora.

De remarcat, că pot fi estimați și alți parametri importanți pentru procesul transferului de masă. Astfel, dacă ne propunem dimensiuni liniare l = 5 cm; $\xi = 0,3l$, vom găsi A = 1,54 cm/min. Mai departe, cunoscând *A*, prin formula (3.105) vom găsi *B*=0,29 cm/min. Prin urmare, din prima formulă (3.100) putem evalua viteza, cu care particulele se depun în colectorul filtrului electric w=1,25 cm/min. În sfârșit, conform formulei a doua (3.100), considerând $\mu=0,5$, vom găsi coeficientul de transfer de masă $\alpha=1,38$ cm/min.



Fig. 3.9. Curba teoretică corespunde curbei experimentale 1 din figura 3.5.

În baza acestor parametri se poate de ajuns până la valorile inițiale și astfel pot fi stabilite toate datele necesare pentru calculul filtrului electric.

Majoritatea dintre formulele obținute au un caracter final, însă, acestea mai cuprind valori intermediare de origine - fizică, mecanică (densitate, viscozitate,) sau electrică (tensiune, curent, mobilitate). Prelucrarea datelor experimentale în cadrul raporturilor teoretice găsite deja, luând în considerare toți parametrii procesului, necesită o cercetare separată.

3.9. Concluzii

- A fost elaborat modelul teoretic de descriere al procesului de epurare a suspensiilor dielectrice de impurități solide sub formă de particule dielectrice (ceară) în baza ipotezei că particulele se depun pe pereții capcanelor electrice sub formă de strat încărcat eterogen în raport cu suprafețele menționate.
- Rezultatele teoretice sunt confirmate de datele experimentale, ceea ce demonstrează veridicitatea cercetărilor efectuate.
- 3. Prin metode statistice au fost determinați parametrii statistici și dependența concentrației impurităților de timp.

- 4. În baza acestor parametri au fost generalizate datele experimentale sub o formă a ecuației adimensionale unice, care descrie datele experimentale, în termeni de criterii de similitudine.
- 5. A fost prezentată interpretarea fizico-teoretică a rezultatelor obținute.
- 6. S-a demonstrat că efectul ecranării câmpului electric de către stratul eterogen de impurități, dar şi (sau) rezistența electrică a stratului pot duce la dispariția efectului de epurare. Dispariția efectului de epurare poate fi explicată şi prin descreşterea rapidă a funcției exponențiale.
- 7. Au fost evidențiate particularitățile fizice ale transferului de masă sub acțiunea câmpului electrostatic în medii eterogene cu particule dispersii semiconductoare și conductoare de curent electric.
- 8. A fost introdusă noțiunea de difuzie electrică (de aceeaşi direcție ca şi difuzia obișnuită), precum şi de coeficient de difuzie electrică, analogul coeficientului de difuzie obișnuită. În baza noțiunii menționate a fost corectat vectorul densității fluxului clasic de difuzie pentru cazul prezenței câmpului electric şi, totodată, corectată ecuația transferului de masă prin difuzie.
- 9. A fost soluționată ecuația pentru regimul staționar de difuzie cu coeficientul de difuzie generalizat și determinată repartiția spațială a concentrației. Cunoscând această repartiție, s-a determinat concentrația reziduală la finalizarea procesului de epurare.
- 10. Datorită construcției electrofiltrului cu două spații, a emiterului şi a colectorului, în care concentrațiile sunt diferite, dar aproximativ constante, aproximațiile necesare devin posibile pentru soluționarea aproximativă şi adecvată a problemei abordate.
- 11. Prin metoda medierii concentrației în zona de epurare a fost obținută dependența concentrației la ieșirea din filtrul electric, în funcție de timp caracteristica de bază a oricărui filtru electric, ceea ce permite efectuarea calcului ingineresc.

4. PROCESUL DE EPURARE ÎN FLUX

4.1. Noțiuni introductive

Specificul procesului de epurare în regim de flux [149,150] diferă de cel hidrostatic, în primul rând, prin faptul că gradul de epurare în regim de flux, în condiții identice, este mai redus decât în regim static și calitatea epurării (concentrația remanentă) va tinde spre cea în regim static, doar când viteza fluxului forțat va tinde către zero, mai exact, când va deveni mai mică decât o anumită valoare critică (vezi mai jos). Aceasta se datorează faptului că în regim dinamic nu tot mediul eterogen, inclus în celula de lucru, izbutește să treacă procesul de purificare.

În al doilea rând, deși gradul de epurare este mai redus decât în regim static, totuși, cantitatea de lichid purificat este mai mare. Curbele de epurare $\varphi^*(t) \equiv \varphi(t)/\varphi_0$ (vezi figurile (4.4) –(4.10)) au proprietăți caracteristice celor statice, fiind doar deplasate pe verticală în direcție superioară, cu atât mai pronunțat, cu cât e mai mare debitul de flux $Q \equiv v_0 \cdot S$, unde v_0 este viteza medie în flux, iar S aria efectivă a secțiunii transversale a filtrului electric.

Menționăm încă o particularitate specifică procesului de epurare în regim de flux: paralel cu procesul de epurare decurge și procesul de generare a energiei electrice (generator electrohidrodinamic – GEHD), efect ce se datorează faptului că lichidul filtrat la ieșirea din filtru provoacă curent electric convectiv de densitatea $j' = \rho \cdot \upsilon'$, unde ρ' , υ' sunt densitatea de sarcină electrică remanentă a mediului și viteza acestuia la ieșirea din filtru.

Puterea generatorului electric apare în urma procesului mecanic de extragere a fluidului încărcat electric în câmpul electrostatic din interiorul celulei de lucru. Acest curent sau sarcină electrică pot fi depistate prin măsurări experimentale. Prin urmare, pe lângă generarea de energie, acest efect mai poate fi utilizat și în scopuri de măsurare a concentrației remanente. Fenomenele în cauză merită o cercetare separată.

4.2. Aspecte teoretice

4.2.1. Noțiuni generale

În procesul de sedimentare electrică a impurităților din mediul dispers, la pomparea prin celula de lucru (*ABCD*, figura 4.1), componentele longitudinale ale vitezei $\bar{\nu}_0$ sunt mici, constituind $\bar{\nu}_0 \leq (0,1-1,0)$ mm/s. De asemenea, sunt mici și vitezele de sedimentare a particulelor pe electrodul de captare (*CD*) sub influența câmpului electric exterior constant. De aceea mișcarea particulelor poartă un caracter laminar. Deoarece faza purtătoare e dielectrică, iar câmpurile electrice sunt puternice ($E \geq 2$ kV/cm), în fluid apar curgeri electroconvective neregulare, dar laminare [22]. O asemenea mișcare favorizează procesul de depunere, deoarece intensifică periodicitatea căderii particulelor pe electrodul CD, ce joacă rolul și de capcane pentru amestecurile încărcate, din cauza apariției pe suprafața electrozilor a unor interacțiuni puternice cu imaginile electrostatice ale particulelor [139, 151].



Fig. 4. 1. Schema de calcul a procesului de sedimentare electrică.

Cu toate acestea, necătând la mișcările haotice ale mediului dispers, poate fi evidențiată componenta vitezei longitudinale, prin medierea ecuației Navier-Stokes pe secțiunea transversală a celulei, ca și în cazul turbulenței fluxului hidrodinamic [146]. Atunci, v_0 va fi viteza, definită prin raportul debitului Q de lichid și aria secțiunii transversale S a celulei de lucru:

$$\nu_0 \equiv Q/S. \tag{4.1}$$

Analog se poate proceda și cu componentele longitudinale ale vitezei particulelor, fiind subînțelese componente medii de migrație sub acțiunea câmpului electric u_E și convective u_0 ,

$$u = u_E + u_0 \tag{4.2}$$

Primul termen în (4.2) poate fi stabilit prin formula

$$u_E = bqE \tag{4.3}$$

unde q este sarcina particulei, b – mobilitatea acesteia, în aproximația Stokes, egală:

$$b = 1/(6\pi\eta a), \tag{4.4}$$

a - fiind raza particulei. Componenta convectivă, la rândul său, constituie două componente: forțată, condiționată de pompare v_{\perp} și electrică care este condiționată de vântul electric - v_{j} . Ultima poate fi estimată după intensitatea curentului electric în circuitul de înaltă tensiune, conform formulei [147],

$$\upsilon_{j} = c \cdot \frac{\nu}{l} \cdot \left(\frac{j}{\kappa} \frac{l^{3}}{\gamma \nu^{2}}\right)^{m}, \qquad (4.5)$$

unde ν - este viscozitatea cinematică a mediului; l - dimensiunea caracteristică a curgerii în getul de "vânt electric", j – densitatea caracteristică a curentului; k - mobilitatea particulelor încărcate ($\kappa = bq$); γ - densitatea de masă a mediului; c- coeficient de proporționalitate ($c \sim 1$).

Exponentul $1 \ge m \ge 0.5$ este în descreștere: de la m = 1 în regim laminar până la m = 0.5 la mișcare turbulentă. Viteza v_{\perp} poate fi estimată din considerente generale ale teoriei stratului limită [152]

$$\nu_{\perp} = c_0 \cdot R e^{-1/2} \cdot \nu_0, \tag{4.6}$$

unde c_0 - este coeficient empiric de proporționalitate; Re – numărul Reynolds, definit cu relația $Re = v_0 l_0 / v$, l_0 – fiind dimensiunea caracteristică a secțiunii transversale a curgerii longitudinale. Astfel, se obține:

$$u = u_E + v_j + v_\perp, \tag{4.7}$$

Curgerea este prezentată în formă de jeturi care provin de la anumite puncte (perforații) de pe suprafața emitorului. Viteza medie din preajma suprafeței emitorului va fi determinată de densitatea medie a curentului electric, egală cu

$$j = I / (\pi d_0 L),$$
 (4.8)

unde *I* - intensitatea totală a curentului prin celulă, d₀ – diametrul conductorului, *L* – lungimea acestuia, ce corespunde aproximativ cu lungimea celulei [100]. Mărimea caracteristică va fi nu distanța dintre electrozi *H*, ci diametrul conductorului, așadar, în cazul dat $l \equiv d_0$. Dimpotrivă, în formula pentru *Re* în (4.6) mărimea caracteristică nu va fi d₀, dar $l_0 \equiv H$, astfel, dimensiunile caracteristice ale gradului de turbionare vor fi determinate de cea mai mică din dimensiunile transversale ale celulei (probabil - *H*).

Trecem la întrebarea principală, referitor la influența mișcării forțate asupra concentrației de impurități reziduale la ieșirea din celulă. Vom reieși dintr-un model de curgere laminară longitudinală cu viteza v_0 , prin care în direcția transversală se mișcă particulele cu viteza constantă u, stabilită de formula (4.7). Dacă presupunem că $\vec{v}_0 = const$, $\vec{u} = const$, din figura 4.1 vom observa că, la vitezele indicate particula A din colțul marginal de sus din partea stângă nimerește în punctul A', după zona electrodului precipitator DC. Așa cum $D'C \parallel AA'$, atunci pe acest electrod vor nimeri particulele, ce se află în stratul de jos a unor nivele h. Particulele din stratul de sus ABC'D' nu vor fi supuse curățării, însă în același timp, stratul de jos DCC'D în cazul ideal ar trebui să se curețe complect.

4.2.2. Concentrația reziduală la ieșirea din filtrul electric

Din cele menționate rezultă că concentrația la ieșirea din filtrul electric poate fi determinată cu formula:

$$\varphi(t) = \frac{m_0 + m_1}{M} = \frac{m_0}{M} + \frac{m_1}{M},$$
(4.9)

unde *M* este masa generală a mediului în toată celula, m_0 – aceiași, partea *ABC'D'*; m_1 – aceiași, partea *DCC'D'*. Primul termen în (4.9) va fi egal cu

$$\frac{m_0}{M} = \frac{\gamma V_0 \varphi_0}{\gamma V} = \frac{\gamma B L (H - h) \varphi_0}{\gamma B L H} = \varphi_0 (1 - h^*), \tag{4.10}$$

 $\varphi_0 = \varphi(0)$ - este concentrația inițială (la intrare); B – lățimea celulei. În afară de aceasta, e introdusă înălțimea adimensională a stratului curățat

$$h^* \equiv h/H \,. \tag{4.11}$$

Din figura 4.1 se vede că

$$h = L \cdot tg\alpha = L \cdot \frac{u}{v_0}.$$
(4.12)

La viteze mici, inclusiv în stratul nestaționar, mai precis dacă

$$\upsilon_0 \le \upsilon_{ocr} \equiv \frac{L}{H} \cdot u, \tag{4.13}$$

toate particulele trebuie să nimerească pe electrodul colector, de aceea formula pentru h are aspectul:

$$h = \begin{cases} H, & \upsilon_0 \le \upsilon_{ocr}, \\ L \cdot \frac{u}{\upsilon_0}, & \upsilon_0 > \upsilon_{ocr}. \end{cases}$$

$$(4.14)$$

Împărțind la H și v_{ocr} respectiv, se obține

$$h^* = \begin{cases} 1, & \upsilon_0^* \le 1, \\ \frac{Lu}{H\upsilon_0}, & \upsilon_0^* > 1. \end{cases}$$
(4.14a)

Totodată * denotă viteza longitudinală adimensională

$$\nu_0^* \equiv \frac{\nu_0}{\nu_{ocr}} = \frac{H}{L} \cdot \frac{\nu_0}{u}.$$
(4.15)

Astfel, formulele (4.10) - (4.15) determină în întregime prima parte a concentrației reziduale în formula generală (4.9). A doua parte, adică m_1/M , se va determina ca și pentru curgerea ne staționară (vom nota $\varphi_1(t)$) [103]

$$\varphi_1(t) = \varphi_{10} \cdot \varphi_E \equiv \varphi_0 \cdot \frac{V_1}{V} \cdot \varphi_E = \varphi_0 \cdot h^* \cdot \varphi_E, \qquad (4.16)$$

unde φ_E (t) este concentrația adimensională, ce va fi examinată separat – pentru particulele dielectrice, semiconductoare și cele conductoare. Adunând (4.10) și (4.16) și împărțind egalitatea obținută la φ_0 , vom găsi o expresie generală pentru concentrația relativă căutată:

$$\varphi^*(t) = 1 - h^* + h^* \cdot \varphi_E = 1 - h^* \cdot (1 - \varphi_E).$$
(4.16a)

4.2.2.1. Modelul dispersiilor dielectrice

În acest caz, $\varphi_E(t)$ se determină prin expresia (3.24)

$$\varphi_E(t) \equiv \frac{1 - v}{e^{\lambda t} - v}$$

Substituind această expresie în (4.16), găsim

$$\varphi^*(t) = 1 - h^* \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda t)}{1 - \nu \cdot \exp(-\lambda t)},\tag{4.17}$$

unde în formulele respective pentru v și λ , în publicația [103], l este distanța dintre electrozi; în acest caz, trebuie să fie schimbată pe h, adică pe grosimea stratului prelucrat. În formulele pentru intensitatea câmpului E_0 urmează a fi înlocuit l prin H, deoarece E_0 este determinat de distanța

reală dintre electrozi, l = H. În rezultat, în corespundere cu formulele (3.23), pentru parametrii indicați vom obține:

$$v = \frac{\left|\rho_{1}\right|h\varphi_{0}}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{2}E_{0}}; \ \lambda \equiv \frac{bqE_{0}(1-v)}{h}; \ E_{0} \equiv \frac{U}{H} + \frac{\sigma_{q}}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{2}}; \ \sigma_{q} = j(\tau_{2} - \tau_{1}), \tag{4.18}$$

unde U este diferența potențialelor dintre electrozi, σ_q - densitatea de sarcină de suprafață interfață "sedimentat ξ - strat-mediu" (figura 4.1), $|\rho_1|$ - valoarea absolută a densității sarcinii electrice spațiale în stratul sedimentat; indexurile "1" și "2" se referă la strat de impurități și la lichid. Pentru a clarifica influența fiecărui parametru în parte în procesul de curățare electrică dependența $\varphi^*(t)$ o vom prezenta reieșind din (4.16 a):

$$\varphi^{*}(t) = 1 - \frac{Lu}{H\nu_{0}} + \frac{Lu}{H\nu_{0}} \cdot \frac{1 - \frac{\rho_{1}\varphi_{0}Lu}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{2}E_{0}\nu_{0}}}{\exp\left[\frac{bqE_{0}\nu_{0}}{Lu}\left(1 - \frac{\rho_{1}\varphi_{0}Lu}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{2}E_{0}\nu_{0}}\right)\right] \cdot t - \frac{\rho_{1}\varphi_{0}Lu}{\varepsilon_{0}\varepsilon_{2}E_{0}\nu_{0}}},$$
(4.19)

unde pentru ρ_1 este omis semnul modulului, înțeles în continuare ca valoare absolută, ce poate fi găsită după sarcina q a particulelor separate și a concentrației acestora în stratul depus

$$\rho_1 = nq = \frac{\gamma_1}{m_1} \cdot q = \frac{\gamma_1}{\gamma_0} \cdot \frac{3}{4\pi a^3} \cdot q, \qquad (4.20)$$

unde m_1 - masa unei particule; γ_1 - densitatea masei stratului; γ_0 - densitatea masei materialului, ce constituie particulele, în modelul cel mai simplu al particulelor conductoare (încărcarea capacitivă)

$$q = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_2 aU, \tag{4.21}$$

unde conform (4.18) și (4.20) avem

$$U \cong E_0 \cdot l_E \Longrightarrow \rho_1 \cong \frac{3\gamma_1 \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_0 l_E}{\gamma_0 \cdot a^3}.$$
(4.22)

(la presupusa valoare mică σ_q , din cauza $\tau_1 \approx \tau_2$), l_E este dimensiunea caracteristică care poate fi aplicată la calculul intensității caracteristice E_0 .

4.2.2.2. Dezbateri pe marginea rezultatelor obținute. Comparație cu experimentul

La început vom exprima formula (4.19) prin h^* pentru a clarifica cum acționează mișcarea

forțată asupra concentrației reziduale, fiind
că h^* e invers proporțional cu $\,\upsilon_{_0}\sim Q$,

$$h^* = \frac{Lu}{Hv_0} = \frac{LS \cdot u}{H \cdot Q} \equiv \frac{V \cdot u}{HQ}.$$
(4.23)

Vom avea

$$\varphi^{*}(t) = 1 - h^{*} + h^{*} \cdot \frac{1 - \alpha_{0} h^{*}}{e^{\frac{\beta_{0}}{h^{*}}(1 - \alpha_{0} h^{*}) \cdot t} - \alpha_{0} h^{*}},$$
(4.24)

unde s-a notat

$$\alpha_0 = \frac{\rho_1 \varphi_0 H}{\varepsilon_0 \varepsilon_2 E_0}; \quad \beta_0 = \frac{bqE_0}{H}. \tag{4.25}$$

Odată cu majorarea consumului, în conformitate cu formula (4.14) h^* diminuează de la 1, tinzând spre 0. Pentru valorile limită din (4.24) urmează

$$\varphi^{*}(t)\Big|_{h^{*} \to 1} \to \frac{1 - \alpha_{0}}{e^{\beta_{0}(1 - \alpha_{0})t} - \alpha_{0}} \equiv \frac{1 - \nu}{e^{\lambda t} - \nu},$$
(4.26)

fiindcă $\alpha_0 \rightarrow v$; $\beta_0(1-\alpha_0) \rightarrow \lambda$, adică obținem rezultatul scontat – lipsa consumului.

La $Q \rightarrow \infty$, adică la $h^* \rightarrow 0$, obținem:

$$\varphi^*(t)\Big|_{h^* \to 0} \to 1. \tag{4.27}$$

Ambele rezultate sunt firești, ca și în cazul (4.26), lichidul se consideră nemișcat, analog lucrării [103]. În cazul (4.27) – tot lichidul reușește să parcurgă celula, fără a fi supus epurării.

Formula (4.24) satisface cerințele limită după timp t.

$$\varphi^{*}(t)\Big|_{t\to 0} \to 1 - h^{*} + h^{*} = 1,$$
(4.28)

$$\left. \varphi^*(t) \right|_{t \to \infty} \to 1 - h^* + h^* \cdot \frac{1}{\infty} = 1 - h^* = \varphi^*_{\infty} \tag{4.29}$$

conform datelor experimentale [100, 102, 103] despre prezența la $\varphi^*(t)$ asimptotei $\varphi^*_{\infty} \neq 0$.

Pentru a clarifica acțiunea câmpului electric asupra procesului de curățare vom transcrie formula (4.19), ținând cont de (4.22), iar pentru claritate vom admite $u = \kappa E_0 = u_E$. În acest caz, vom obține:

$$\varphi^{*}(t) = \left(1 - \frac{L\kappa E_{0}}{H\nu_{0}}\right) + \frac{L\kappa E_{0}}{H\nu_{0}} \cdot \frac{1 - \frac{3\gamma_{1}\varphi_{0}l_{E}L\kappa E_{0}}{\gamma_{0}R_{0}^{2}\nu_{0}}}{e^{\frac{\nu_{0}}{L}\left(1 - \frac{3\gamma_{1}\varphi_{0}l_{E}L\kappa E_{0}}{\gamma_{0}R_{0}^{2}\nu_{0}}\right)^{t}} - \frac{3\gamma_{1}\varphi_{0}l_{E}L\kappa E_{0}}{\gamma_{0}R_{0}^{2}\nu_{0}}}.$$
(4.30)

Din această formulă observăm, că φ_{∞}^* se diminuează odată cu creșterea intensității câmpului (termenul în paranteze rotunde după semnul "="), adică nivelul de curățare în regim staționar $(t \to \infty)$ crește. Dar odată ce formula (4.30) conține E₀ peste tot în formă de fracție E_0/v_0 , ne putem imagina că influența câmpului asupra calității procesului de curățare este opusă influenții pompării forțate. Forma tipică a dependenței experimentale $\varphi^*(t)$ la diverse consumuri Q și tensiuni U este prezentată în figurile (4.2; 4.3) [100, 102, 103]. Curbe analogice sunt și în formula (4.17). Referitor la aspectele cantitative ale procesului e necesar de notat, că modelul stratificat de curgere a fluidului laminar prin filtrul electric, ce are formă de paralelipiped (figura 4.1.), este idealizat. Filtrul electric existent conține, de obicei, diverse dispozitive pentru captarea particulelor ("capcane") și traiectoria acestora este cu mult mai complicată, comparativ cu cea prezentată în figura 4.1. Însă situația poate fi corectată prin ajustarea coeficienților empirici în formulele pentru h^* , fiindcă aceștia, într-un fel sau altul, conțin parametri efectivi în procesul examinat. Mai mult ca atât, se admite generalizarea formulei (4.17) prin introducerea unui indice de putere lui h^* , adică înlocuirea $h^* \to (h^*)^m$, unde formula (4.17) apare ca un caz particular pentru m = 1. Această modificare este admisibilă și de aceea că nu influențează cazurile limită.





Fig. 4.2. Dependența concentrației de impurități reziduale φ^* de timpul epurării t la o intensitate constantă a câmpului E=const și la diferite debite de lichid: Q₁ - curba 1 și Q₂ - curba 2; Q₁>Q₂

Fig. 4.3. Dependența concentrației de impurități reziduale φ^* de timpul epurării t la debite constante Q=const și diferite intensități ale câmpului: E₂>E₁; E₁ - curba 1; E₂ - curba 2.

Astfel, în scopul de a obține dependențe generalizate de calcul (de tipul celor criteriale), formula (4.17) ar fi binevenit să fie prezentată în forma

$$\varphi^* = 1 - (h^*)^m \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda t)}{1 - \nu \cdot \exp(-\lambda t)},$$
(4.31)

de unde sunt mai vizibile cazurile limită particulare. Posibil, va fi necesară modificarea h^* în formulele (4.18) pentru λ și v, însă toate acestea urmează să fie cercetate.

4.2.2.3. Modelul particulelor semiconductoare și conductoare de curent electric

Pentru determinarea funcției $\varphi_E(t)$ ne vom conduce de rezultatele din capitolul 3, formulele (3.52), (3.53) cu observațiile relatate mai sus

$$\varphi_E = \overline{\varphi}_{\min}^* + (1 - \overline{\varphi}_{\min}^*) \cdot \exp[-A \cdot t / (H - \xi)], \qquad (4.32)$$

unde

$$\bar{\varphi}_{\min}^* = B/A = 1/[1 + (u/B)] \tag{4.33}$$

Pentru a ține cont de debit în formula (4.17), fracția din dreapta trebuie substituită prin partea dreaptă a expresiei (4.32), care joacă rolul funcției $\varphi_E(t)$:

$$\overline{\varphi}^{*}(t) = 1 - h^{*} \cdot \{ (1 - \overline{\varphi}^{*}_{\min}) \cdot (1 - \exp[-A \cdot t / (l - \xi)]) \}$$
(4.34)

În egalitățile de mai sus avem notațiile (vezi cap.3):

$$A \equiv u + B; \ B \equiv (\alpha - \mu \cdot u) \cdot (H / \xi)$$
(4.35)

Parametrul α este direct proporțional cu coeficientul efectiv de difuzie, majorându-se la creșterea tensiunii electrice. Dacă admitem $\alpha \sim u$, atunci din (4.35) rezultă că *B* poate fi atât pozitiv, cât și negativ, deci același lucru se constată și la *A* (vezi cap.3). După cum demonstrează analiza formulelor (4.32) – (4.35), concentrația și în acest caz depinde doar de raportul U/Q, prin urmare, ajungem la dependențe de tipurile celor prezente în figurile 4.2; 4.3.

4.3. Cercetarea experimentală a epurării în modelul dispersiilor semiconductoare și conductoare

Cu scopul de a stabili influența debitului Q asupra epurării electrice, precum și a generaliza datele experimentale, s-au efectuat cercetări complexe ale procesului de epurare electrică a uleiului pentru transformatoare de particule disperse conductoare (cărbune activat) și semiconductoare (Cr₂O₃) în cazul mișcării forțate a mediului. Rezultatele sub aspectul dependenței $\varphi^*(t) \equiv \varphi(t)/\varphi_0$ sunt prezentate în figurile (4.4) –(4.10), două dintre care (4.4) și (4.10), deja au fost folosite în cap.3 la elaborarea bazelor teoretice ale procesului de EE a

mediilor cu dispersii semiconductoare și conductoare. În acest context, s-a extins semnificativ cercul acestor cercetări după numărul de date experimentate pentru diferite tensiuni U și debite Q. Curbele 1, 2 în figura 4.4 corespund debitului constant (Q = 7 ml/min.) la diferite tensiuni aplicate filtrului electric (U= 6; 9 κ V - respectiv). Curba 3 este obținută la debit considerabil (Q=10 ml/min.), dar și tensiune înaltă (U=15 κ V). Observăm că creșterea concentrației reziduale din contul majorării debitului poate fi compensată în întregime cu majorarea tensiunii, ceea ce confirmă și concluzia generală privind caracterul opus al influenței tensiunii aplicate filtrului electric U și debitul Q. La majorarea tensiunii U gradul de curățare crește, efectul debitului Qfiind invers.

Curbele 1-3 în figura 4.5 au fost obținute la una și aceiași tensiune U=9 KV, dar la diferite debite Q = (20; 10; 4) ml/min., prin urmare cu cât e mai mic debitul de lichid prin celula de lucru, cu atât e mai mare efectul de curățare, ceea ce rezultă și din formulele (4.30), (4.34).

În figura 4.6 curbele 1, 2 sunt obținute la tensiunea U = 12 KV și consumul Q = 11.3 și 6,7 ml/min. Intensitatea curentului electric prin celula de curățare e de 21 µA și nu variază considerabil la trecerea de la o curbă la alta. Totuși, problema referitor la influența curentului asupra proceselor examinate necesită de a fi cercetată separat pentru determinarea rolului acestuia în fenomenele, legate de descărcarea prin efect coronă (vezi, de exemplu formula (4.5).



Fig. 4.4. Dependența concentrației impurităților de Cr₂O₃ în uleiul de transformator în funcție de timp:

 $\varphi_0 = 0.05 \%$; U, 10³ V: 1-6; 2-9; 3-15; Q, ml/min: 1, 2 -7,0; 3 - 10,0 ;a) experiment; b) calcul prin $\varphi * (t)$ (4.57).

Date asemănătoare la o tensiune înaltă, sunt prezentate în figura 4.7, din care rezultă că la creșterea tensiunii până la U = 15 kV, curățarea poate să atingă 100%.



Fig. 4.5. Dependența concentrației impurităților de particule Cr_2O_3 în uleiul de transformator în funcție de timp $\varphi_0 = 0.05$ %, U, 10³ V: 1; 2; 3 -9; Q, ml/min: 1 -20; 2-10; 3-4; a) experiment; b) calcul prin $\varphi * (t)$ (4.57).







Fig. 4. 7. Dependența concentrației impuritaților reziduale de particule Cr₂O₃ în uleiul de transformator în funcție de timp φ_0 =0,05%, U, 10³ V: 1; 2 - 15; Q, ml/min; 1-7,7; 2-5; a) experiment ; b) calcul prin $\varphi * (t)$ (4.57)

Datele experimentale prezentate în figurile 4.4 - 4.7 se referă la suspensiile "ulei de transformator + Cr_2O_3 ", în care particulele de impurități sunt semiconductoare. La o analiză atentă a datelor se poate observa, că la raporturi identice a tensiunii la debit și gradul de curățare este aproximativ identic, fapt care s-a menționat mai sus. Rezultatele referitoare la dispersiile conductoare (confecționate din cărbune activat), sunt prezentate în figurile (4.8. – 4.10), fiind similare celor precedente.



Fig. 4.8. Dependența concentrației impurităților reziduale de particule de cărbune în uleiul de transformator. $\varphi_0 = 0,05 \%$, U, 10^3 V: 1; 2; 3 - 5; Q ml/min: 1 -19; 2 - 10; 3 - 3; a) experiment ; b) calcul prin $\varphi * (t) (4.57)$.



transformator. $\varphi_0 = 0,05 \,\%, \, \text{U}, \, 10^3 \, \text{V}: \, 1; \, 2; \, 3 - 7; \, \text{Q}, \, \text{ml/min}: \, 1 - 17; \, 2 - 8; \, 3 - 3; \, \text{a})$ experiment ; b) calcul prin $\varphi * (t) \, (4.57)$.

Particularitățile curbelor corespunzătoare – tensiunea admisibilă e cu mult mai joasă, decât în cazul precedent (U = 10 kV), ceea ce s-a stabilit anterior. În figura 4.8 curbele 1, 2, 3 sunt obținute la tensiunea U = 5 kV și corespunzător debitul Q = (19; 10; 3) ml/min. La consumul minimal (Q=3 ml/min.) are loc curățarea completă a lichidului după 20-30 de minute. Rezultate

similare sunt prezentate în figura 4.9 curbele 1-3, U = 7 kV și Q = 17; 8; 3 ml/min. Legitățile calitative sunt aceleași, însă gradul de curățare e cu mult mai înalt.

Figura 4.10 (curbele *1*, 2) oferă o imagine generală în ceea ce privește direcția curbelor $\varphi^*(t)$ la variații simultane, cum ar fi tensiunea și debitul de lichid. Trăsăturile distinctive ale experiențelor, efectuate cu particulele conductoare, sunt rezultate mai sigure în comparație cu particulele mai puțin conductoare.



Fig. 4.10. Dependența concentrației impurităților reziduale de particule de cărbune în uleiul de transformator. $\varphi_0=0,05$ %, U, 10^3 V: 1-5; 2-7; Q, ml/min: 1-10; 2-8; a) experiment ; b) calcul prin $\varphi * (t)$ (4.57).

În încheiere, vom menționa încă o particularitate a procesului studiat. Timpul de curățare se calculează din momentul când începe procesul până în momentul la care concentrația devine egală sau mai joasă decât eroarea experimentului, aproximativ fiind egală cu timpul t_0 necesar pentru trecerea volumului *V* de lichid prin celulă, care poate fi stabilit pe baza definiției de debit

$$Q = \frac{V}{t_0} \Longrightarrow t_0 = \frac{V}{Q},\tag{4.36}$$

unde S - secțiunea transversală efectivă a filtrului electric, timpul căutat poate fi estimat după formulă a doua (4.36).

Mai jos este prezentat tabelul de valori t_{ot} , calculate după formula (4.36) la V=125 ml. și valoarea t_{0ex} – experimentală, luate din graficele $\varphi^*(t)$. Pentru cea mai mare parte a curbelor, estimarea t_{ot} este în concordanță cu valoarea t_{oe} . Coincidența, pare să evoce, că timpul necesar pentru atingerea zonei colectorului de către particulă este același ca și pentru atingerea ieșirii din FE.

					0		1					
Numărul fig.	2			3		4		5		6		
<i>U</i> , кV		9		1	2	15		5		7		
<i>Q</i> , <i>ml</i> /min.	4	10	20	6,7	11,3	5	7,7	10	19	3	8	17
t_{ot} , min.	31	13	6	19	11	25	16	13	7	40	15	7
t_{oe} , min.	25	15	8	20	12	10	10	25	11	15	15	15

Tabelul 4.1. Valorile experimentale t_{oe} și teoretice t_{ot} a timpului de epurare necesar pentru trecerea volumului întreg de lichid prin celula de măsurat

În paragraful următor vom generaliza materialul experimental prezentat în fig.(4.4 - 4.10). Dacă neglijăm fenomenul de difuzie electrică (cap.3), atunci mecanismele de CE în cazurile particulelor dielectrice, pe de o parte, și celor conductoare sau semiconductoare, pe de altă parte, în principiu coincid, deci au unul și același suport fizic.

4.4. Generalizarea datelor experimentale. Modelul staționar al mediilor dielectrice

În primul rând, vom remarca că un caz staționar înseamnă limitarea generalizării pentru concentrația reziduală. Presupunând în formula (4.19) t $\rightarrow\infty$, și luând în considerare (4.6), (4.7), vom obține:

$$\varphi_{\infty}^{*} = \left(1 - \frac{L\nu_{E}}{H\nu_{0}}\right) - c_{0} \frac{L}{H} \operatorname{Re}_{l}^{-1/2} = \left(1 - \eta_{00}^{*}\right) - \frac{L\nu_{E}}{H\nu_{0}}, \qquad (4.37)$$

unde

$$\upsilon_E = u_E + \upsilon_j = kE_0 + c\frac{jl^2}{k\eta}$$
(4.38)

- componenta electrică a vitezei transversale, totodată se va ține cont de cazul laminar al convecției electrice, când în (4.5) indicele m=1. În continuare, vom nota

$$\eta_{00}^* \equiv c_0 \cdot \frac{L}{H} \cdot \operatorname{Re}^{-1/2} = c_0 \cdot \frac{L}{H} \sqrt{\frac{\nu B}{Q}}, \qquad (4.39)$$

unde c₀ - coeficientul gradului de curățare mecanică (în lipsa câmpului electric) din contul filtrării mecanice a lichidului. După cum arată experimentele [136], această valoare poate ajunge la $\eta_{00}^* \cong 0, 1 = 10\%$. Ținerea de cont a acestei circumstanțe, în prima aproximație necesită modificarea originii concentrației inițiale:

$$\phi_{00}^* \cong 1 - \eta_{00}^* \cong 0, 9. \tag{4.40}$$

Densitatea curentului electric poate fi considerată direct proporțională cu intensitatea câmpului $j = \sigma \cdot E_0$. În acest caz, partea electrică a vitezei poate fi prezentată în formă:

$$\upsilon_E = k_1 E_0, \tag{4.41}$$

unde e indicat

$$k_1 \equiv k + c \frac{\sigma \cdot l^2}{k\eta} \tag{4.42}$$

- coeficientul efectiv al mobilității, ce include în sine a doua componentă - convectivă.

Luând în considerare cele expuse pentru concentrația de impurități în regim staționar $(t \rightarrow \infty)$ vom obține

$$\varphi_{\infty}^* = \varphi_{00}^* - A\theta, \tag{4.43}$$

unde

$$\theta \equiv \frac{U}{Q}; \ A \equiv const \cdot \frac{BLk_1}{H}, \tag{4.44}$$

aici A – constanta adimensională, A ~ 1 urmează să fie determinată pe cale experimentală.

După cum s-a menționat, e puțin probabil să ne așteptăm la liniaritatea după U/Q în formula (4.43), de aceea vom căuta dependența de puteri, și anume:

$$\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^* = A \cdot \theta^m. \tag{4.45}$$

Logaritmând această egalitate, vom găsi:

$$m\ln\theta + \ln A = \ln(\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*). \tag{4.46}$$

Notăm:

$$\ln \theta = k; \ \ln A = n; \ \ln(\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*) = N;$$
(4.47)

și după metoda pătratelor minime căutăm minimumul

$$\overline{(mk+n-N)^2} = \min(m,n) \, .$$

Egalând derivatele după *n* și *m* zero, vom obține sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} \frac{m\overline{k}+n=\overline{N}}{m\overline{k}^{2}+n\overline{k}=\overline{Nk}} \Longrightarrow \begin{cases} m=\frac{\overline{Nk}-\overline{N}\cdot\overline{k}}{\sigma_{k}^{2}}; \sigma_{k}^{2}\equiv\overline{k}^{2}-\overline{k}^{2}\\ n=\overline{N}-m\cdot\overline{k}\end{cases}; \sigma_{k}^{2}\equiv\overline{k}^{2}-\overline{k}^{2}. \end{cases}$$
(4.48)

Calculele conduc spre următoarele formule

$$\Delta \varphi_{\infty}^* \cong 0,824 \cdot \left(\frac{U}{Q}\right)^{0,113},\tag{4.49}$$

sau

$$\varphi_{\infty}^* \cong 0, 9 - 0, 824 \cdot \left(\frac{U}{Q}\right)^{0,113}.$$
 (4.50)

Vom întocmi tabelul de calcul pentru a stabili valorile medii.

Tabelul 4.2. Calculul gradului final de curățare (după datele figurilor 4.4 – 4.10 [136])

Nr.	Figura (4.4 – 4.10)	Curba	<i>U</i> , кV	<i>Q</i> , ml/min	$arphi^*_\infty$	$\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*$	$\varphi_{00}^* - \varphi_{\infty}^*$	
1	1	1	6	7.0	0.16	0.74	0.81	
1	1	1	0	7,0	0,10	0,74	0,01	0,05
2		2	9	7,0	0,07	0,83	0,84	0,01
3		3	15	10,0	0,02	0,88	0,86	0,02
4	2	1	9	20,0	0,10	0,80	0,75	0,05
5		2	9	10,0	0,06	0,84	0,81	0,03
6		3	9	4,0	0,01	0,89	0,90	0,01
7	3	1	12	11,3	0,08	0,82	0,83	0,01
8		2	12	6,7	0,02	0,88	0,88	0,00
9	4	1	15	7,7	0,02	0,88	0,89	0,01
10		2	15	5,0	0,01	0,89	0,93	0,04
11	5	1	5	19,0	0,32	0,58	0,71	0,13
12		2	5	10,0	0,07	0,83	0,76	0,07
13		3	5	3,0	0,01	0,89	0,87	0,02
14	6	1	7	17,0	0,12	0,78	0,75	0,03
15		2	7	8,0	0,04	0,86	0,81	0,05
16		3	7	3,0	0,01	0,89	0,91	0,02
17	7	1	5	10,0	0,09	0,81	0,76	0,05
18		2	7	8,0	0,06	0,84	0,81	0,03
Σ/n medie			8,33	9,26	0,07	0,83	0,83	0,04

În tabelul construit în baza curbelor prezentate în figurile (4.4 - 4.10) [136], sunt expuse datele experimentale și de calcul, ale dependențelor corespunzătoare (4.49), precum și valoarea erorii absolute dintre experiment și calcul. În figura 4.11 este prezentat graficul dependenței (4.49), din care urmează că formulele de calcul (4.49), (4.50) satisfăcător aproximează datele experimentale.



Fig. 4.11. Dependența generalizată $\Delta \varphi_{\infty}^*$ de raportul $\theta \equiv U / Q$. Denumirea conform tabelului - alte puncte se află prin calculul direct după formula (4.49)

În încheiere vom remarca că formulele (4.49) și (4.50) poartă un caracter numeric, în sensul, că este incorect de a construi o valoare dimensională $\theta \equiv U/Q$ la o putere arbitrară, de aceea trebuie să fie adimensională. Dependența corectă trebuie să aibă forma:

$$\Delta \varphi_{\infty}^* = const \cdot \left(\frac{BLk_1}{H} \cdot \frac{U}{Q}\right)^m = const \cdot \left(\frac{BLk_1}{H}\right)^m \cdot \left(\frac{U}{Q}\right)^m$$

Pe de altă parte, din (4.49) urmează:

$$const = \frac{0,824}{\left(\frac{BLk_1}{H}\right)^{0,113}}$$

Având în vedere secțiunea pătratică a celulei experimentale [136], adică B = H, precum:

$$L = 1.2 \cdot 10^{-1} \text{ m la } k \Box q / 6\pi\eta a \Box \frac{10 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{6 \cdot 3.1 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} \text{ m}^2/\text{Vs} \sim 8.6 \ 10^{-13} \text{ m}^2/\text{Vs} \ (a \sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ M}; \ \eta = 1.2 \cdot 10^{-6} \text{ M}; \ \eta = 1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{Vs}$$

2-10⁻² kg/ms), în loc de (4.49) vom obține dependența adimensională

$$\Delta \varphi_{\infty}^* \cong 24,262 \cdot \left(\frac{BLk_1 U}{HQ}\right)^{0,113},\tag{4.51}$$

mai corectă din punct de vedere fizic.

Prezintă interes și generalizarea dependenței nestaționare $\Delta \phi^*(t)$. După cum arată formulele respective, este o problemă destul de dificilă, necesitând cunoștințe cu privire la mai mulți parametri și o asemenea generalizare constituie un obiect de cercetare în perspectivă.

4.5. Generalizarea rezultatelor experimentale în modelul nestaționar pentru dispersii semiconductoare și conductoare

4.5.1. Ecuație generalizată

Conform [154] vom reieși din ecuația (4.34):

$$\overline{\varphi}^{*}(t) = 1 - h^{*} \cdot \{ (1 - \overline{\varphi}_{\infty}^{*}) \cdot (1 - \exp[-A \cdot t / (l - \xi)]) \}.$$
(4.52)

Dacă $h^* = 1$, vom obține cazul static (4.34); $h^* = 0$ înseamnă lipsa câmpului sau un debit foarte mare. În ambele cazuri curățarea va lipsi totalmente.

Soluționăm ecuația (4.52) în raport cu exponenta. Vom obține:

$$e^{\lambda t} = \frac{\beta \cdot F}{\beta \cdot F - \psi(t)},\tag{4.53}$$

Unde s-a notat:

$$\lambda \equiv A/(l-\xi); F \equiv (1-\overline{\varphi}_{\infty}^{*}) \cdot \theta; \theta \equiv U/Q; h^{*} \equiv \beta \cdot \theta; \psi(t) \equiv 1-\overline{\varphi}^{*}(t), \qquad (4.54)$$

(4 54)

iar $h^* \equiv \beta \cdot \theta$ după supoziție, β – coeficient de proporționalitate necunoscut. Logaritmăm ecuația (4.53):

$$Y(t) \equiv \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{\beta F}{\beta F - \psi(t)} = t, \ (4.55)$$

unde expresia logaritmică împreună cu factorul $(1/\lambda)$ indică simbolul funcției Y(t), graficul căreia în raport cu timpul *t* este o simplă bisectoare în sistema coordonată (t;Y(t)) pentru toate punctele experimentale, prezentate de curbele din figurile (4.4a – 4.10a). De aceea, (4.55) și este ecuația generalizată pentru procesul de curățare electrică în cazul particulelor disperse semiconductoare și conductoare.

În formulele prezentate mai sus pentru fiecare curbă din figurile (4.4 - 4.10) toate valorile sunt constante, cu excepția $\psi(t)$ și a timpului *t*. Deși, necunoscuți sunt coeficienții λ și β , aceștia ar putea fi găsiți din egalitatea (4.53) cu ajutorul metodei pătratelor minime, dar ecuația obținută este neliniară și analitic irezolvabilă, de aceea vom utiliza soluționarea computerizată (programa «Graf»). Obținerea ecuației necunoscute se va efectua în două etape. În prima - vom găsi parametrii λ și β , în a doua – generalizarea ecuației și graficul acesteia.

4.5.2. Parametrii λ și β .

Vom construi curbe-aproximație, conform ecuației

$$\overline{\varphi}^*(t) = \overline{\varphi}^*_{\infty} + (1 - \overline{\varphi}^*_{\infty}) \cdot \exp(-\lambda t), \tag{4.57}$$

pentru fiecare curbă experimentală din figurile (4.4 – 4.10). Totodată, concentrația $\overline{\varphi}_{\infty}^{*}$ este cunoscută din datele experimentale (grafice), de exemplu, pentru curba 1, figura 4.4a $\overline{\varphi}_{\infty}^{*}=0,19$. Prin urmare, ecuația (4.57) va avea forma

$$\bar{\varphi}^*(t) = 0,19 + 0,81 \cdot \exp(-\lambda t),$$
(4.58)

cu un parametru necunoscut λ , pe care îl vom găsi cu suficientă exactitate după coordonatele a două puncte: unul inițială (0; 1) și al doilea – pe zona de tranziție (5; 0.225). Să vedem cum poate fi realizată stabilirea coordonatelor de înaltă exactitate în baza graficelor experimentale, de exemplu, pe curba 1 în figura 4.4a, cunoscând dimensiunile liniare exacte 44,5 mm (cu exactitatea riglei gradate ±0,5 mm), ce corespund concentrației $\varphi_0^* = 1,0$; putem concluziona că ordonata cu 10mm va corespunde $\varphi^*=10/44,5 \approx 0,225$, ceea ce figurează în parantezele de mai sus. Dacă e vorba despre valorile măsurate, o astfel de exactitate poate fi atinsă cu o medie a rezultatelor mai multor măsurători. Datorită faptului că după punctul de tranziție (5; 0,225) concentrația, practic, cu timpul nu variază, dispare necesitatea punctelor suplimentare. De aceea, doar două puncte - inițial și de tranziție și punctele «la infinit» (∞ ; $\bar{\varphi}_{\infty}^*$), în dependență de (4.57) sunt necesare pentru a construi curba dată , dar analog, și celelalte. În practică acest lucru se face astfel. După programa computerizată a trasatorului de curbe introducem coordonatele punctelor sus-menționate, de exemplu (0; 1) și (5; 0.225), dar și ecuația, în exemplul nostru (4.48). Vom obține graficul curbei corespunzătoare și, în afară de aceasta, va fi afișată și funcția de aproximare

$$\overline{\varphi}^*(t) = 0,19 + 0,81 \cdot \exp(-0,62832707t),$$
(4.59)

de unde, păstrând 3 semne după virgulă, vom găsi $\lambda = 0,628 \text{ min}^{-1}$.

În ceea ce privește al doilea parametru - β , acesta grupându-se cu F, ce e ușor de observat din (4.52) - (4.55), va fi determinat cu formula

$$\beta \cdot F = 1 - \overline{\varphi}_{\infty}^*. \tag{4.60}$$

În cazul exemplului numeric $\beta F = 0, 81$.

În figurile (4.4b – 4.10b) sunt prezentate curbele, construite după metodele sus-menționate, corespunzătoare curbelor experimentale din figurile (4.4a – 4.10a). Comparațiile prezentate în figurile (4.4– 4.10) a curbelor de calcul (b) și a celor experimentale (a), demonstrează o coincidență aproape totală. Aceasta, probabil, demonstrează gradul de adecvație al concepțiilor teoretice cu privire la procesele fizice, ce persistă la curățarea electrică a suspensiilor dielectrice. Din ecuațiile curbelor prezentate pe figuri, după cum s-a mai menționat, imediat pot fi găsiți parametrii generalizați λ și β *F*. Împreună cu alții, aceștia sunt plasați în tabelul 4.3.

Ν	FG	Ngr	$(\beta F)_{ex}$	λ_{ex}	U	Q	θ	$(\beta F)_{\rm p}$	$\lambda_{ m p}$	$(\beta F)_L$	λ_{L}
	1	1	0,81	0,628	6	7	0,857	0,8924	0,6221	0,89	0,6207
2		2	0,9	0,623	9	7	1,286	0,9222	0,6268	0,9139	0,6253
3		3	0,96	0,634	15	10	1,5	0,9338	0,6286	0,9258	0,6277
4	2	1	0,89	0,62	9	20	0,45	0,847	0,6148	0,8674	0,6162
5		2	0,91	0,627	9	10	0,9	0,896	0,6227	0,8924	0,6211
6		3	0,95	0,691	9	4	2,25	0,965	0,6334	0,9675	0,6358
7	3	1	0,9	0,623	12	11,3	1,06	0,9079	0,6246	0,9258	0,6229
8		2	0,97	0,595	12	6,7	1,79	0,9473	0,6307	0,9419	0,6308
9	4	1	0,98	0,595	15	7,7	1,95	0,9539	0,6317	0,9508	0,6326
10		2	0,99	0,641	15	5	3	0,9878	0,6368	1,0092	0,644
11	5	1	0,67	0,452	5	19	0,26	0,7756	0,4257	0,8568	0,4308
12		2	0,91	0,423	5	10	0,5	0,8405	0,4414	0.8701.	0,4416
13		3	0,99	0,422	5	3	1,67	0,9746	0,4719	0,9352	0,4942
14	6	1	0,82	0,277	7	17	0,88	0,9009	0,4554	0,8913	0,4587
15		2	0,93	0,585	7	8	2,33	1,0153	0,4806	0,9719	0,5238
16		3	0,98	0,559	7	3	0,7	0,8759	0,4497	0,8813	0,4506
17	7	1	0,89	0,458	5	10	0,5	0,8405	0,4414	0,8701	0,4416
18		2	0,96	0,524	7	8	0,88	0,9	0,455	0,8913	0,458

Tabelul 4.3. Calculul parametrilor βF și λ

Indicii «ex» înseamnă valori, găsite conform figurilor (4.4a – 4.10a), adică reflectă rezultatele experimentale. Se vede, că în mediu, acești parametri cresc ușor odată cu creșterea raportului θ (tensiunii la debit). Această dependență e convenabilă pentru a aproxima fie în serie de puteri, fie în interpolări liniare conform ecuației experimentale $\lambda(\theta)$, $\beta F(\theta)$ din tabela 4.3, în care indicii «p» și «L» indică tipul corespunzător al interpolării. Graficele funcțiilor aproximate și ecuațiile respective ale acestora sunt prezentate pe figurile 4.12 și 4.13. În urma mai multor experimente numerice s-a ajuns la o interpolare liniară mai rațională, conform ecuațiilor:

$$\beta \cdot F = 0,056 \cdot \theta + 0,842 \quad ; (SC); \quad \beta \cdot F = 0,106 \cdot \theta + 0,788 ; (C); \tag{4.61}$$

$$\lambda = 0,011 \cdot \theta + 0,611; (SC); \ \lambda = 0.045 \cdot \theta + 0,419; (C), \tag{4.62}$$

în paranteze este indicat tipul materialelor: semiconductoare(SC) sau conductoare (C).


Fig. 4.12 Dependența sub formă de putere a parametrilor $\beta F(\theta)$ (curbele superioare) și $\lambda(\theta)$ (curbele inferioare) de raportul $\theta = U/Q$ pentru modelul semiconductoare și conductoare



Fig. 4.13. Dependența lineară a parametrilor $\beta F(\theta)$ (curbele superioare) și $\lambda(\theta)$ (curbele inferioare) de raportul $\theta = U/Q$ pentru modelul semiconductoarelor și conductoarelor

4.5.3. Generalizarea rezultatelor experimentale

Aceasta înseamnă revenirea la formula (4.55) și construirea, în baza datelor experimentale prin intermediul graficelor din figurile (4.4a - 4.10a), graficului universal, adică pentru toate punctele experimentale. Pentru durate mari de timp, concentrația remanentă tinde către cea asimptotică $\varphi^* \rightarrow \overline{\varphi}^*_{\infty}$, prin urmare, numitorul fracției de sub logaritm în formula (4.55) va tinde către zero, iar expresia de sub logaritm – către infinit. În acest caz pentru duratele timpului, ce depășesc 10 – 15 minute, apare necesitatea unui grad de exactitate mai avansat, ceea ce și este reflectat în tabelele de calcul. Valorile experimentale ale concentrației pot fi măsurate cu o exactitate relativ mică, iar pentru a majora exactitatea este necesar un număr mare de măsurări pentru fiecare punct experimental, cu rezultatele de medie ulterioare pentru obținerea celui final.

Prin aceste mențiuni, precum și conform celor expuse anterior, se explică neuniformitatea cifrelor din tabelele de calcul. În al treilea rând, s-a constatat că, practic toate punctele se grupează în apropierea nemijlocită a bisectoarei Y(t) = t, de aceea nu toate curbele au fost supuse prelucrării statistice, printre care cele mai tipice.

Metodica prelucrării datelor experimentale este următoarea. Pentru curba selectată, de exemplu, 4.4.2, ceea ce înseamnă figura 4.4, curba 2, etc., se fixează câteva valori ale argumentului, adică ale timpului, de regulă, t_i =0; 5; 10;15; în unele cazuri și 20 minute (vezi tabelul 4.4). Pentru valorile fixe, fie nemijlocit din graficele experimentale, fie prin calcul în baza ecuațiilor prezente în graficele teoretice (diferența nu e semnificativă) se determină valorile respective ale concentrației φ_i . Aceste din urmă sunt substituite în raportul (4.45), calculându-se Y_i(φ_i).

Astfel, pentru fiecare curbă cu valorile fixate ale parametrilor βF și λ se obține șirul de coordinate (t_i ; Y_i), care și se prezintă grafic. Valorile parametrilor menționați se obțin prin calculare în prealabil (aproximația liniară). Rezultatele respective sunt introduse în tabelul 4.4 pentru modelul particulelor semiconductoare și conductoare în tabelul 4.5. Vom prezenta separat rezultatele obținute pentru modelele dispersiilor semiconductoare și conductoare.

Ne limităm cu exemplul numeric din prima poziție din tabelul 4.4. Formula de sus este (4.45), care se introduce în programul de calcul "GRAF". La început, se completează linia de sus cu valorile timpului selectat (0; 5; 10, etc.). Apoi prin formulele din graficele prezentate în figura (4.4a – 4.10 a) se calculează valorile concentrației $\varphi_i^*(t_i)$:1; 0.225; 0.1915; 0.18999 – linia a doua. Liniile a treia și a patra - s-a menționat deja cum trebuie să fie completate. Urmează etapa finală – calculul și completarea liniei a cincea ($Y_i(\varphi_i)$). Calculul se efectuează prin intermediul formulei (4.55), care ia forma exemplului numeric (în linia de titlu). Acordând valorile liniei $\varphi_i^*(t_i)$:1; 0.225; 0.1915; 0.18999 vom obține valorile liniei a cincea, care împreună cu linia întâia (t) formează un șir de coordinate (t; Y), cifrele se prezintă sub formă de mai multe puncte, grupate în apropierea bisectoarei Y(t) = t. În formulă, concomitent și în tabel (vezi liniile 3,4), pentru fiecare curbă se introduc valorile fixe $B = \beta F$ și λ (0.89 și 0.6221, respectiv).

În figurile 4.14 și 4.15 sunt prezentate graficele generalizărilor, ecuațiile cărora sunt oferite prin expresiile care urmează:

$$Y(t) = \frac{1}{0,011 \cdot \theta + 0,611} \cdot \ln \frac{0,056 \cdot \theta + 0,842}{\overline{\varphi}^*(t) + 0,056 \cdot \theta - 0,158} = t$$

$$Y(t) = \frac{1}{0,045 \cdot \theta + 0,419} \cdot \ln \frac{0,106 \cdot \theta + 0,788}{\overline{\varphi}^*(t) + 106 \cdot \theta - 0,212} = t$$
(4.63)

Tabelul 4.4. Calculul Y(t)=(Ln(B/(φ^* +B-1)))/ λ . Semiconductoare Y(t)= (LN(0.89/(x-0.19)))/0.6221 (exemplu numeric, curba 1.1 din figura 4.4, etc.)

	///	\ I	,	0 , ,	
<i>4.4.1</i> t	0	5	10	15	20
$arphi^{*}$	1	0.225	0.1915	0.1901	0.18999
$B = \beta F$	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
λ	0.6221	0.6221	0.6221	0.6221	0.6221
Y(t)	0.1514	5.2015	10.2648	14.6179	20.1
4.4.2					
Т	2.5	7.5	12.5	15.5	
φ^*	0.2897	0.1084	0.1004	0.1001	
$B = \beta F$	0.9139	0.9139	0.9139	0.9139	0.9139
λ	0.6253	0.6253	0.6253	0.6253	0.6253
Y(t)	2.5144	7.4996	12.3685	14.5855	
4.4.3					
Т	0	5	10	15	
$arphi^{*}$	1	0.08	0.0417	0.0401	
$B = \beta F$	0.9258	0.9258	0.9258	0.9258	
λ	0.6277	0.6277	0.6277	0.6277	
Y(t)	-0.05	5.01	10.05	14.57	
4.5.2					
Т	2.5	7.5	12.5	17.5	
φ^*	0.2718	0.0883	0.0804	0.080017	
$B = \beta F$	0.8924	0.8924	0.8924	0.8924	
λ	0.6211	0.6211	0.6211	0.6211	
Y(t)	3.08	7.5312	12.41	17.49	
4.6.1					
Т	0	5	10	15	
φ^*	1	0.14	0.1018	0.1001	
$B = \beta F$	0.9258	0.9258	0.9258	0.9258	
λ	0.6229	0.6229	0.6229	0.6229	
Y(t)	0.0454	5.0438	10.0223	14.6625	
4.7.2					
Т	0	5	10	15	
φ^*	1	0.05	0.0116	0.0101	
$B = \beta F$	1.0092	1.0092	1.0092	1.0092	
λ	0.644	0.644	0.644	0.644	
Y(t)	0.0298	5.0125	10.0107	14.316	

t 4.8.1	0	5	10	15	20
$arphi^{*}$	1	0.4	0.3373	0.3308	0.3301
$B = \beta F$	0.8568	0.8568	0.8568	0.8568	0.8568
λ	0.4308	0.4308	0.4308	0.4308	0.4308
Y(t)	0.5709	5.8141	11.0616	16.1939	21.0209
4.8.2					
Т	2.5	7.5	12.5	17.5	
$arphi^{*}$	0.4064	0.1282	0.0946	0.0906	
$B = \beta F$	0.8701	0.8701	0.8701	0.8701	
λ	0.4416	0.4416	0.4416	0.4416	
Y(t)	2.2908	7.0783	11.8717	16.4842	
4.9.2					
Т	0	5	10	15	
$arphi^{*}$	1	0.12	0.0727	0.0701	
$B = \beta F$	0.9719	0.9719	0.9719	0.9719	
λ	0.5238	0.5238	0.5238	0.5238	
Y(t)	0.0841	5.6648	11.2371	17.5293	
4.9.3					
Т	2.5	7.5	12.5	17.5	
φ^*	0.2625	0.0398	0.0229	0.0204	
$B = \beta F$	0.8813	0.8813	0.8813	0.8813	
λ	0.4506	0.4506	0.4506	0.4506	
Y(t)	2.8637	8.4237	12.6868	17.0832	
4.10.1					
Т	0	5	10	15	
φ^*	1	0.2	0.1191	0.111	
$B = \beta F$	0.8701	0.8701	0.8701	0.8701	
λ	0.4416	0.4416	0.4416	0.4416	
Y(t)	-0.0512	5.1377	10.3268	15.3275	
4.10.2					
Т	0	5	10	15	20
φ^*	1	0.128	0.046	0.0409	0.0401
$B = \beta F$	0.8913	0.8913	0.8913	0.8913	0.8913
λ	0.4587	0.4587	0.4587	0.4587	0.4587
Y(t)	-0.1619	5.0476	10.9024	15.0382	19.8284

Tabelul 4.5. Calculul Y(t)= $(LN(B/(\phi^*+B-1)))/\lambda$ Conductoare Y(t)=(LN(0.8568/(x-0.1432)))/0.4308 (pozitia 4.8.1)



Fig. 4.14. Generalizarea datelor experimentale, dispersii semiconductoare



Fig. 4.15 . Generalizarea datelor experimentale, dispersii conductoare

4.6. Concluzii

- 1. Au fost evidențiate premisele fizice și formulate obiectivele principale ale cercetărilor pentru mediile eterogene cu particule semiconductoare și conductoare.
- 2. Au fost deduse formulele de bază pentru concentrația remanentă în procesul de epurare electrică a uleiurilor tehnice (ulei de transformator) de impurități dispersate, ce constituie particule din material semiconductor (Cr₂O₃) și material conductor de electricitate (C, cărbune activat), ceea ce permite efectuarea calculelor inginerești.
- 3. S-au efectuat cercetări experimentale în regim hidrostatic nestaționar și de flux- staționar al procesului de epurare, și s-a constatat: pe parcursul primelor 5-10 minute, se petrece epurarea la nivel de aproximativ 70 80 %; celelalte 20-30 % se elimină din celula de filtrare pe parcursul următoarelor 10-20 minute. După această perioadă de timp (~30 minute) epurarea ideală de 100 % este imposibilă, fiind prezentat explicația fizică a fenomenului. În cazul particulelor conductoare (cărbunele) rezultatul constituie ~98 %.
- 4. Au fost generalizate datele experimentale: la concentrația finală staționară φ_{∞}^* în baza conceptului fizic: impuritățile, fiind și dielectrice, se încarcă electric.
- 5. În baza aspectelor teoretice cu privire la epurarea electrică în modelul nestaționar al particulelor semiconductoare sau conductoare (cap.3) s-au obținut graficele și expresiile ecuațiilor respective ale curbelor teoretice $\varphi^*(t)$.
- 6. Reieșind din ultimele rezultate, au fost generalizate sub formă grafică și analitică datele experimentale referitor la particulele disperse semiconductoare și conductoare.

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

- A fost examinată influența tensiunii electrice asupra procesului de filtrare prin aplicarea efectului "coronă", ce formează un nou mecanism fizic, pur coulombian şi s-a constatat cu creşterea tensiunii sporeşte eficiența procesului, există o valoare optimă a tensiunii, cu efect maxim de epurare; pentru mediile eterogene cercetate sunt prestabiliți parametrii tehnologici a separării impurităților mecanice în câmp electric.
- 2. În baza rezultatelor obținute a fost propusă metoda de epurare în trepte, care permite curățarea mediului prelucrat cu exactitatea solicitată la ieșirea din filtrul electric.
- 3. A fost efectuată generalizarea adimensională a datelor experimentale în baza modelului cu un singur parametru, și precizată prin modelul cu doi parametri.
- 4. A fost elaborat modelul teoretic al procesului de epurare a suspensiilor dielectrice de impurități sub formă de particule dielectrice în baza ipotezei depunerii lor pe suprafețele "capcanelor" electrice sub formă de strat încărcat eterogen. Rezultatele sunt confirmate de cele experimentale.
- 5. Prin metode statistice au fost: determinați parametrii (λ și μ) ai procesului de epurare electrică a dependenței concentrației impurităților ca funcție de timp; generalizate datele experimentale sub forma unei ecuației adimensionale, ceea ce permite efectuarea calculelor inginerești; prezentată interpretarea fizico-teoretică a rezultatelor, rezultatele experimentale fiind în concordanță cu cele teoretice.
- S-a demonstrat că fenomenul ecranării câmpului electric de către stratul eterogen de impurități şi (sau) rezistența electrică a stratului pot duce la dispariția totală a efectului de epurare.
- Au fost obținute formulele de bază pentru concentrația remanentă în procesul de epurare electrică a uleiurilor tehnice de impurități disperse semiconductoare (Cr₂O₃) și conductoare de electricitate (cărbune activat).
- 8. Au fost generalizate datele experimentale referitor la concentrația finală staționară φ_{∞}^* în baza conceptului, conform căruia impuritățile dielectrice se încarcă electric.
- În baza teoriei elaborate cu privire la epurarea electrică în modelul nestaționar al particulelor semiconductoare sau conductoare s-au obținut graficele și ecuațiile respective ale curbelor teoretice.
- 10. Au fost generalizate sub formă grafică și analitică datele experimentale referitor la particulele disperse semiconductoare și conductoare, elaborat modelul matematic de calcul al separatoarelor electrice de tipul "coronă", ce permite aplicativitatea în plan ingineresc.

Recomandări privind cercetările de perspectivă:

- 1. Stabilirea dependenței curentului electric de concentrația remanentă în procesul de separare a uleiurilor tehnice și vegetale de impurități mecanice în câmp electric.
- 2. Generalizarea dependenței nestaționare $\Delta \varphi^*(t)$.
- 3. Implementarea soluțiilor obținute în proiectarea filtrelor electrice.

BIBLIOGRAFIE

1. Кочанов Э.С., Кочанов Ю.С., Скачков А.Е. Электрические методы очистки и контроля судовых топлив. Л., Судостроение, 1990, 216 с.

2. Шмидт А.А. Теоретические основы рафинации растительных масел. М, 1960, 339 с.

3.Стабников В.К, Лысянский В.М., Попов В.Д. Процессы и аппараты пищевых производств. М., 1985.510с.

4. Балыгин И.Е. Электрическая прочность жидких диэлектриков. М.-Л, 1964.-228с.

5.Максимук Е.П., Болога М.К. Регенерация органических растворителей при ректификации в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 1995. № 1. С. 56-59.

6. Цобек Л.К, Панченко Г.М., Панков В.В. Теоретические основы работы для электрообезвоживания и электрообессоливания нефтяных эмульсий. М., 1970.

7. Берил И.И. Исследование и разработка способа разрушения эмульсий с использованием перфорированных диэлектрических диафрагм: Автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1982.

8. Коваленко В.П., Ильинский А.А. Основы техники очистки жидкостей от механических загрязнений. М., 1982.-272с.

9. Мартыненко А.Г., Коноплев В.П., Ширяева Г.П. Очистка нефтепродуктов в электрическом поле постоянного тока. М., 1974.-87с.

10. Попко В.В. Изучение вопроса разрушения эмульсии "вода в масле" в электрических полях и выработка рекомендаций по рациональному использованию электрических полей при электродеэмульсации: Автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1970.

 Коноплев В.П. и др. О применении электрического поля при рафинации подсолнечного масла в мицелле // Масло-жировая промышленность. 1975. № 10. С. 17-18.

12. Коваленко Е.С. Исследование воздействия электрического поля на бензиновую мицеллу подсолнечного масла в процессе электроочисток: Автореф. дис... канд. техн. наук. Краснодар, 1976.

13. Мартовщук Е.В. и др. Извлечение восков в электростатическом поле// Масложировая промышленность. 1980. № 9. С. 13-16.

14.М.Эфендиев О. Ф. Очистка бензиновой мицеллы подсолнечного масла в электрическом поле: Авто-реф. дис... канд. техн. наук. Краснодар, 1973.

15. Болога М.К., Поликарпов А.А., Берил И.И. Электродегидратация эмульсий водаподсолнечное масло // Электронная обработка материалов, 1989. № 6. С. 30-33.

16.Сканави Г.И. Физика диэлектриков: область сильных полей. М. Физматгиз. 1958.90с.

17.Сканави Г. И. Физика диэлектриков: область слабых полей. М. Физматгиз. 1949. 500с.18 Адамчевский И. Электрическая проводимость жидких диэлектриков. Л. Энергия.1972. 296 с.

19. Калверт С., Защита атмосферы от промышленных загрязнений.: Справочное издание.: В 2-х частях. 4.1. М. : Металлургия, 1988. 760 с.

20 Белянин П.Н. Центробежная очистка рабочих жидкостей авиационных гидросистем.

М. Машиностроение, 1976. 328 с.

21 Леб Л. Статическая электризация. М.-Л., 1963.-468с.

22 Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев, 1977.

23.Болога М.К., Кожухарь И.А., Кожевников И.В., Сажин Ф.М. Электрогидродинамические процессы и устройства // Доклады V Международной научной конференции "Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей". Санкт-Петербург, 1998. С. 147-151.

24 Бабский В.Г., Жуков М.Ю., Юдович В.И. Математическая теория электрофореза. Киев, 1983.

25 Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М., 1952.

26 Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М., 1979.-319с.

27 Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М., 1971.-165с.

28 Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З. и др.Основы электрогазодинамики дисперсных систем // М., 1974.-480с.

29 Левитов В.И., Решидов И.К., Ткаченко В.М. и др. Дымовые электрофильтры / Под общей ред. В.И. Левитова. М., 1980.-448с.

30. Болога М.К., Потемкина Т.А., Берил И.И. Электродегидратация эмульсии водаподсолнечное масло // Электронная обработка материалов. 1986. № 2. С. 63-66.

31. Журавлёв В.А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензии. 4-е изд., переработанное и дополненное. М.: Химия, 1988.

32. Рыбаков И.Р., Коваленко В.П., Турганинов В.Е. Очистка нефтепродуктов от механических примесей и воды. М.: ЦНИИТ, Энефтехим., 1974. 80 с.

33. Рыбаков К.В., Коваленко В.П. Фильтрация авиационных масел и специальных жидкостей. М. : Транспорт, 1977.

34. Санаев Ю.И. Методы повышения эффективности работы электрофильтров. М.: ЦИНТИ, Химнефтемаш, 1986. 202 с.

35. Мозговой В.И., Чижов И.А. Очистка диэлектрических жидкостей. // «Техника и вооружения». №1. 1989.

36. Задорожный В.Н., Копнин Ю.Н., Лосев Е.Г. Установка для тонкой электроочистки жидкостей. - НИТИ, вып. 2 (9), 1970. - 85 с.

37 Задорожный В.П., Конина И.Н., Лосев Е.Г. Диэлектрические жидкости в сильных электрических полях - НИТИ, Вып. 2 (9), 1970. -71с.

38 Мартынов А.Г. Очистка нефтепродуктов в электрическом поле постоянного тока. -М.: Химия, 1974. - 89 с.

39. Новикова Г.В., Потапов Н.А. Электросепарация фосфорсодержащих веществ из растительных масел // Труды ЧГСХА, Том XVII, 2002, 231...233с.

40. Басов А.М., Быков В.Г., Лаптев А.В., Файн В.Б. Электротехнология. — М.: Агропромиздат, 1985. - 256 с.

41. Кавецкий Г.Д., Васильев Б.В. Процессы и аппараты пищевой технологии.-М.: Колос, 2000. -551 с.

42.Эфендиев О.О., Чижиков Б.П..Электроочистка жидкостей в пищевой промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1977. - 76 с.

43. Мозговой В.И., Ковалев В.Д., Сафин А.М. Электрический очиститель диэлектрических жидкостей и газов / Патент РФ №2108869 от 20.04.1998г.

44. A.c. №679245 CCCP.

45. Никитин Г. А., Никитин А.Г., Никонов К.В., Корабцов Г.П. Устройство очистки диэлектрических сред./ Патент РФ №2112600 от 10. 06. 1998г.

46. Мозговой В.И., Ковалев В.Д. Способ очистки диэлектрических сред./ Патент РФ
 №2121882 от 20.11.1998г.

47. А.с. 841688 (СССР). Очиститель жидкости / Воложский СВ. и др. - Публ., БИ №7,1978

48. А.с. 47610 (СССР). Способ очистки неполярных диэлектрических жидкостей от взвешенных частиц / Мгебришвили Т.В. и др. - Публ. БИ № 28, 1975

49. А.с. 3803S3 (СССР). Устройство для отделения частиц дисперсной фазы от дисперсионной среды / М.Т. Грановский и др. - БИ №21, 1973.

50. А.с. 413994 (СССР). Электростатический фильтр / Новосад А.Г. и др. -1 Публ. БИ №5, 1974.

51. А.с. 454054 (СССР). Электростатический фильтр / Бильданов М.М. и др. -Публ. БИ №48, 1974.

52. А.с. 469491 (СССР). Непрерывно действующий аппарат для осаждения в электрическом поле взвешенных в жидкости твердых частиц / Богуславский В.Н. и др. - Публ. БИ №17, 1975.

53. А.с. 529205 (СССР). Способ очистки растительных масел от восков, фосфатидов и других высокоплавких компонентов/ Швецов В.Н. и др. - Публ. БИ №35, 1976

54. А.с. 637128 (СССР). Устройство для электроочистки жидкостей / Поздняков Д.Н. и др. Публ. БИ № 46,1978.

55. А.с. 598641 (СССР). Электроочиститель потока диэлектрической жидкости / Чирков СВ. и др.- Публ. БИ № 11, 1978.

56. А.с.557817 (СССР). Устройство для непрерывной очистки жидкостей / В.Н. Шилов и др. - Публ. БИ№ 18,1977.

57. А.с. 844064 (СССР). Устройство для электроочистки жидкостей / Адейнер Ю.Н. и др.
- Публ. БИ, № 25, 1981.

58. А.с. 904785 (СССР). Электроочиститель / Василевский В.П. - Публ. БИ № 6, 1982.

59. А.с. 1088802 (СССР). Электрический очиститель реактивных топлив / Куприянов Ю.И. - БИ № 16, 1984.

60 А.с. 144823 (СССР). Аппарат для фильтрования твердых осадков / Чернов М.К. -Публ. БИ, № 4, 1967.

 61. А.с. 691199 (СССР). Электрический очиститель / Задорожный В.Н. -Публ. БИ №38, 1979.

62.А.с. 728881 (СССР). Электроразделитель / Пинковский Я.П., Грибанов А.В.-Публ. БИ№ 15, 1980.

63. А.с. 745923 (СССР). Электроочиститель / Надиров Н.К. и др.- Публ. БИ №21, 1980.

64. А.с. 971478 (СССР). Электроочиститель. / Гаркович Н.Г., Седлуха Г.А. и др.-Публ. БИ, №41, 1982.

65. А.с. 510266 (СССР). Аппарат для очистки жидкостей от взвешенных частиц / Алейнер Ю.Н. - Публ. БИ № 4, 1976.

66. А.с. 526390 (СССР). Устройство для непрерывной очистки жидкостей / Духин С.С. и др. - Публ. БИ № 32,1976.

67. А.с. 10020.12 (СССР). Электроочиститель / Козачков В.А. - Публ. БИ № 7, 1983.

68. А.с. 1068170 (СССР). Способ электростатической очистки слабопроводящих жидкостей от мелкодисперсных примесей / Василевский В.Н. и др.

69. Патент Р.Ф. №2121883. Способ электроочистки жидких диэлектрических сред. /Кочанов Э.С.; Кочанов Ю.С.. Публ.20.11.1998.

70.Патент Р.Ф. №2151009. Электрофильтр./Моикин А.А.; Васьков С.А; Пятигорский А.Н Публ.20.06.2000.

71. А.с. (Пат.) 919642 СССР МКИ Н431 15/00 Способ выполнения фильтропакета электроочистителя гидравлических жидкостей/Данилов В.М., Сорогин Е.А., Боков К.Д.//Открытия. Изобретения. – 1994. – № 11.

72. Патент № 2429916 Российская Федерация, МПК 9 В03С5/00. Электрический очиститель диэлектрических жидкостей с электрической регенерацией электродов. Г.А Копылов, В. Д. Ковалёв. Опубл.27.09.2011.

73. Патент № 2417125 Российская Федерация, МПК 9 В03С5/00. Электрический очиститель диэлектрических жидкостей и газов с изоляцией отверстий в электродах. Г.А Копылов, В. Д. Ковалёв, В.М. Чуванов. Опубл.27.04.2011.

74. Патент № 2322305 Российская Федерация, МПК 9 В03С5/00. Устройство для очистки диэлектрических жидкостей и газов. Г. М. Михеев, В.А. Тарасов, Т.Г. Михеева. Опубл.20.04.2008.

75. Патент № 2293871 Российская Федерация, МПК 9 F02M27/04, B01D35/06, B03C5/00. Устройство для электростатической обработки жидкого топлива. В. В. Татарнов, Н.Л. Егин, В.П. Татарнов, А.Г. Долгиер. Опубл.20.02.2007.

76. Патент № 2377072 Российская Федерация, МПК 9 В03С5/00. Электрический очиститель диэлектрических жидкостей (и газов) с закругленными отверстиями в электродах. В. Д. Ковалёв, Г.А.Гусев, А.М.Бекметов, В.Н.Соколенко. Опубл.27.12.2009.

77. Патент № 2363541 Российская Федерация, МПК 9 В03С5/00. Электроочиститель диэлектрических жидкостей и газов с непараллельными электродами. В. Д. Ковалёв, Г.А.Копылов, Е.А.Долгих, Н.В.Баладина. Опубл.10.08.2009.

78. Пат. 2366675 (США). Электростатический фильтр и способ отделения. -Публ. ИЗР№39, 1960

79. Пат. 3129157 (США). Электрогидродинамический осадитель. - Публ. ИЗР №6, 1964.

80. Пат. 3247091 (США). Электродинамический осадитель. - Публ. ИЗР №39, 1966.

81.Пат. 3799857 (США). Электрофильтровальная установка. - Публ. ИЗР № 6, 1974.

82. Пат. 3252885 (США). Electrostatic filter for cleaning dielectric fluids. I Ed-word A. Griswold. - Публ. ИЗР №39,1966.

83. Пат. 4040926 (США). Способ электрофильтрования для очистки органических жидких веществ. - Публ. ИЗР № 4, 1978.

84. Заяв. 41-70464 (Япония). Устройство для удаления твердых частиц из жидкости. - Публ. ИЗР № 1,1973.

121

85. Заяв. 57-46698 (Япония). Способ и устройство для электростатической обработки жидкости. - Публ. ИЗР № 5, 1963.

 Заяв. 55-21961 (Япония). Устройство для очистки с использованием электростатического эффекта. - Публ. ИЗР, № 9, 1963.

87. Заяв. 1976 55-12303 (Япония). Способ очистки отработанных масел - Публ. ИЗР, №9, 1980.

 88. Заяв. 1558385 (Великобритания). Электрофильтр для органических жидкостей. -Публ. ИЗР № 7,

89. Пат. 1561696 (Великобритания). Электрофильтр. Публ. ИЗР №11, 1980.

90. Заяв. 1591464 (Великобритания). Электрофильтр с радиальным потоком среды. Публ. ИЗР № 2, 1982.

91. Пат. 1408040 (Великобритания). Способ удаления электропроводящей примеси из масел с большим удельным сопротивлением и с малым содержанием воды и применяемое устройство. - Публ. ИЗР № 18,1975..

92. Заяв. 3123462 (ФРГ). Устройство для электростатической очистки диэлектрических жидкостей - Публ. ИЗР, вып. 18, № 6, 1983.

93.Заяв. 2742625 (ФРГ). Электростатический фильтр. - Публ. ИЗР, вып. 18, №3, 1978.

94. Заяв. 2355569 (Франция). Устройство для электростатической очистки непроводящей жидкости. - Публ. ИЗР № 6, 1978

95. Bologa Mircea, MD; Cojuhari Ivan, MD; Leu Vasile, MD;Grosu Tudor, MD; Policarpov Albert, MD//Brevet de invenție – 2071 (13).C2. BOPI. 2003.

96. Bologa Mircea, MD; Leu Vasile, MD//Brevet de invenție – 2139. C2. 2003.

97.Bologa Mircea, MD; Cojuhari Ivan, MD; Grosu Tudor, MD; Leu Vasile, MD; Policarpov Alibert, MD// Brevet de invenție – 3189. C2. 2006.

98. А 1 1755934 SU 4 B 03 C 5/00. Устройство для очистки диэлектрических жидкостей / М.К. Болога, К.И. Цуляну, И.И. Берил, И.И. Цуляну (Ин-т прикладной физики АН МССР). -№4815761; Заявл. 06.03.90 // Изобретения. 1992. -№31.

99. Остроумов Г.А. Электрическая конвекция. Обзор.// Инженерно-физический журналю.1966. 10. № 5. с. 683 – 695.

100. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Экспериментальное исследование процесса очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в электрическом поле // Электронная обработка материалов. 2001, № 5. С. 34-39.

101. Болога М. К, Берил И. И., Циулану К.И. Электросепарация восков из подсолнечного масла. Электронная обработка материалов. 1995, 2, с. 59-63

102. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Релаксационные процессы в электрофильтрах. Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей // Сборник докладов VI Международной научной конференции, 26 июня - 30 июня 2000 года, Санкт-Петербург, 2000. С.210-213.

103. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. К теории очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2001 №6 с. 35-40.

104. Стишков Ю. К., Остапенко А. А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: Изд-во ЛГУ. 1989. 172 с.

105. Панкратьева И. Л., Полянский В. А. Моделирование электрогидродинамических течений в слабопроводящих жидкостях// ПМТФ. 1995. Т. 36. С. 36-44

106. Стишков Ю. К., Остапенко А. А. Электрогидродинамические течения в переменном электрическом поле// Магнитная гидродинамика. 1980. N 3. C. 139-142.

107. Жакин А. И. Развитие электроконвекции в жидких диэлектриках// Изв. АН СССР. МЖГ. 1989. N 1. C. 34-42.

108. Электроповерхностные явления и электрофильтрование / С.С. Духин, В.Р. Эстрела-Льопис, Э.К. Жолковский. — Киев.: Наук, думка, 1985 288 с.

109. С.С. Духин, Н.М. Семенихин, О.В. Смирнов. Электрофоретический транспорт дисперсных частиц в неоднородном электрическом поле при электрофильтровании // Электронная обработка материалов. —1973. — №4. -С.71-73.

110. Берил И.И., Болога М.К., Потапов Н.А. Структурообразование в гидратированном подсолнечном масле в электрическом поле // Электронная обработка материалов, № 3, 1988. -С. 58-61.

111. Боковикова Т.Н., Бутина Е.А., Капутянская Ж.В. и др. Фосфолипиды подсолнечного масла и способы их удаления // Международная научная конференция «Прогрессивная пищевая технология - третьему тысячелетию». Тезисы докладов. - Краснодар, 2000. - С. .286-287.

112. Калминская И.А. Исследование влияния неоднородности электрического поля на закономерности электрофоретического осаждения гетеросуспензий: Дис. канд. хим. наук. JL, 1980. - 150 с.

113. Ostahie C.N., Sajin T., (2011). Particle concentration in electrostatic oil cleaner process for power generation equipments, Digest Journal Of Nanomaterials And Biostructures Vol. 6, No 2, April - June 2011, p. 837 – 848.

114. Ostahie C.N, Sajin T, Nedelcu D.I, (2011). Charged particle trajectory in an external electric field, Proceedings of The 8th International Conference on Industrial Power

Engineering, 14-15 April 2011, "Vasile Alecsandri" University of Bacau, Romania, Printed by: "ALMA MATER" Publishing House, ISSN 2069-9905.

115. Ostahie C.-N. Sajin T., Bîrsan C. (2010). Electric Field Repartition in Dielectric Liquid-Particle Disperse System, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Printed by Editura POLITEHNIUM, ISSN 1011–2855, pag.249-256.

116. Ostahie C.-N., Sajin T., Aniţei F., Mărian M., Nedelcu I., Vernica S., Bîrsan C., (2009) Electrofiltru pentru lichide dielectrice, Cerere de brevet de invenţie nr.A/00106, depozit 02.02.2009.

117. Ostahie C., Sajin T. Electromechanics separation of the impurities and water droplets from oils for engines and transformers, Bulletin of the Transilvania University of Brasov, 2009, Series I, Vol. 2(51), ISSN 2065-2119, p. 367-372.

118. Neamțu V. Cercetări privind influența parametrilor electrici asupra eficienței tehnicilor de electroseparare în câmp electric intens, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2000, 160 pagini.

119. Электрическое фракционирование. <u>http://www.xumuk.ru/biologim/007.html</u>

120.Никитин Г. А., Никитин А. Г., Данилов В. М. Экономия нефтепродуктов, используемых в технологических целях. Киев, Техника, 1984, 128

121. БабкоА.К., Пилипенко А.Т. Фотометрический анализ. М., 1968.

122. Потапов Н. А. Разработка технических средств для очистки растительных масел : Дис. канд. техн. наук: 05.20.01: Чебоксары, 2003 148 с.

123.Коноплев В.П. и др. О применении электрического поля при рафинации подсолнечного масла в мицелле. Масложировая промышленность, № 10, 1975.-С. 17-18.

124. Бутов Н.П. и др. Основы технологии переработки (доочистки) подсолнечного масла физическими методами на стационарном модуле СМППМ-1В // Масложировая промышленность, № 2, 2001. - С. 28...29.

125. Украинцев М.М. Электростатический фильтр для очистки подсолнечного масла: Дис. канд. тех. наук. Зеленоград, 2005. - 160 с.

126. Мозговой В.И., Ковалёв В.Д., Никитин А.Г. Восстановление авиационной техники. Электронно-ионные технологии ремонта авиационной техники : учеб. пособие. М-во обороны Рос. Федерации. Ставрополь : СВВАИУ им. маршала авиации В.А. Судца. 1994.

127. Даниев Г.Г. Некоторые вопросы рафинации жиров // Обзор. - М., 1992

128. Есипов В.Ф. Исследование условий очистки гидратированных жиров от катализатора в ЭП с целью разработки конструкции непрерывно действующих аппаратов. Автореф. дис. канд. тех. наук - Краснодар, 1975.

129. А.К. Фют, Н.С. Арутюнян Н.С. О совершенствовании технологии первичной очистки растительных масел//Масложировая промышленность. 1985. № 1 С.29-31

130. Рафальсон А.Б. Разработка усовершенствованной технологии рафинации рапсового масла. - Автореф. дисс... - Ленинград, - 1987. - с. 28.

131. Ковалев В. Д., Копылов Г. А., Соколенка В. Н., Долгих Е. А., Баландина Н. В. Электроочистка диэлектрических жидкостей. Журнал: Ремонт, восстановление, модернизация, №7,2010, Изд-во Наука и Технологии.

132. В.Б. Фурсов, В.А. Сергеев, Ю.В. Писаревский. Повышение эффективности очистки нефтепродуктов от механических примесей. Электротехнические комплексы и системы управления №3/2008, с65-68.

133. Mămăligă Ioan - Tehnici moderne de separare a sistemelor omogene - http://www.tuiasi.ro/users/110/Curs_Tehnici%20moderne%20de%20separare.pdf, 120 pagini.

134. Bologa M. Tehnologii electrofizice. Realizări și perspective, Programul WE6: Protectia Mediului Workshop "Mediul, energia si tehnologiile curate in obtinerea materialelor si produselor electrice avansate" 17 – 18 septembrie 2008, Bucuresti, Romania. p.5.

135. Bologa M., Leu V., Cojuhari I., Grosu T., Policarpov A. Procedeu și dispozitive de epurare a lichidelor dielectrice de impurități mecanice în câmp electric. Catalog oficial. Expoziția Internațională Specializată Infoinvent – 2001, 3-7 octombrie Chișinău, 2001, p.36.

136. Леу В.И. Электроочистка трансформаторного масла от механической примеси в постоянном электрическом поле//Электронная обработка материалов.2002. № 5.С.55 –58 137. Пасынский А.Г. Коллоидная химия. М., 1968.

138. Тамм И. Е. Основы теории электричества // М., «Наука», 1966, 620 с.

139. Ландау Л. Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред // М., Физматгиз, 1959, 532 с.

140. Губкин А. Н. Физика диэлектриков // М., «Высшая школа», 1971, 270 с.

141.Constantin-Narcis Ostahie. Contribuții la studiul proceselor de separare electromecanică a impurităților combustibililor lichizi și ale uleiurilor pentru motoare și transformatoare. Rezumatul tezei de doctorat. Universitatea V. Alecsandri , Bacău, 2011

142. Тихонов Л.И., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М., 1972

143. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Теоретические аспекты процесса нестационарной электроочистки диэлектрических жидкостей во внешнем постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2003 №3 с. 37-42.

144. Гросу Ф.П., Блога М.К., Леу В.И., Болога Ал.М.. Некоторые особенности электрической сепарации. //Электронная обработка материалов 2012, №1, с. 50-57.

145. Гросу Ф.П., Болога М.К., Леу В.И, Болога Ал. М. К вопросу электрической очистки жидких диэлектриков от примесных частиц диэлектрической жидкости. //Электронная обработка материалов 2012, №2, с.72-78.

146. Ландау Л.Д.и Лифшиц Е. М. Гидродинамика // М., Физматгиз, 1988, 733 с.

147. Гросу Ф. П. Термоэлектроконвективные явления и их прикладные аспекты. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора хабилитат технических наук. Кишинев, 2009.

148. Гросу Ф. П., Болога М. К., Леу В. И., Болога Ал. М. Временная зависимость массопереноса при электросепарации // Электронная обработка материалов, № 3, 2012. Стр.73-82

149. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Электроосождение механической примеси из диэлектрической жидкости при вынужденном движении в постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2002 №6 с. 33-38.

150. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Обобщение экспериментальных данных по очистке диэлектрических жидкостей в постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2003 №2 с. 53-58.

151. Миролюбов Н.Н.. Костенко М.В. и др. Методы расчета электростатических полей. М., 1963.

152. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Из-во «Высшая школа», Москва, 1967. С.600

153. Петриченко Н. А. Электрический ветер в изолирующих жидкостях.// автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. ЛГУ, Ленинград 1973.

154. Гросу Ф. П., Болога М. К., Леу В. И., Болога Ал. М. Электрическая фильтрация диэлектрических жидкостей от полупроводящих и проводящих частиц // Электронная обработка материалов, № 4, 2012. Стр.33-43.

126

ANEXE

Declarația privind asumarea răspunderii

Subsemnatul, declar pe răspundere personală că materialele prezentate în teza de doctorat sunt rezultatul propriilor cercetări și realizări științifice. Conștientizez că, în caz contrar, urmează să suport consecințele în conformitate cu legislația în vigoare.

Vasile Leu Semnătura Data:

CURRICULUM VITAE

Numele, prenumele: LEU Vasile

Data și locul nașterii 26.09.1974, satul Horești, raionul Ialoveni, Republica Moldova

Starea familiară: Căsătorit, doi copii

Luna, anul	Luna, anul,	Unitatea,	Funcția	Sediul unității,
încadrării	concedierii	instituția		instituției
(înmatriculării)	(absolvirii),			
	transferului			
01.09.14	până în	Agenția Națională	șef secție energie	mun. Chişinău,
	prezent	pentru	termică și cogenerare,	Republica
		Reglementare în	Departamentul	Moldova
		Energetică	investiții și calitate	
		(ANRE)		
07.07.14	01.09.14	ANRE	specialist principal,	mun. Chișinău,
			Departamentul	Republica
			investiții și calitate	Moldova
01.10.10	21.05.14	Societatea pe	S. A. "Termocom" în	mun. Chișinău,
		Acțiuni	funcție director tehnic.	Republica
		"Termocom"		Moldova
09.07.09	01.10.10	SA "Termocom"	director producere –	mun. Chișinău,
			şef Departament	Republica
			Operare, Generare,	Moldova
			Distribuție.	
02.10.06	09.07.09	SA "Termocom	director tehnic adjunct	mun. Chişinău,
			producție și reparații.	Republica
				Moldova
24.11.03	02.10.06	SA "Termocom	director tehnic adjunct	mun. Chişinău,
			reparații	Republica
				Moldova
01.03.03	24.11.03	Ministerul	șef adjunct Direcția	mun. Chişinău,
		Energeticii	principală	Republica
			Termoenergetică,	Moldova
01.10.02	01.03.03	Ministerul	consultant Direcția	mun. Chişinău,
		Energeticii	principală gazificare si	Republica
			resurse energetice	Moldova
29.04.02	01.10.02	Ministerul	specialist principal in	mun. Chişinău,
		Energeticii	Direcția principală	Republica
			gazificare si resurse	Moldova
01.05.01	20.04.02	T	energetice	C1 · · · ×
01.07.01	20.04.02	Institutul de	inginer coordonator,	mun. Chişinău,
		Fizică Aplicată a	Laboratorul Dirijarea	Republica
		AŞM	Proceselor Termice	Moldova
			prin metode electrice	

EXPERIENȚĂ PROFESIONALĂ

01.11.00	01.07.01	Institutul de Fizică Aplicată a AŞM	Inginer categoria I-a al Laboratorului Dirijarea Proceselor Termice prin metode electrice	mun. Chișinău, Republica Moldova
30.09.2000	01.07.2002	Universitatea Agrară de Stat	Lector universitar la catedra de fizică a (prin cumul)	mun. Chișinău, Republica Moldova
15.09.97	31.07.00	Direcția Interraională de Producere Rețele și Centrale Termice (DIP RT și C) Ialoveni	Inginer, I-a categorie, secția tehnico- producere	mun. Chișinău, Republica Moldova
13.01.97	15.09.97	DIP RT și C Ialoveni	Şef inginer-dispecer	mun. Chișinău, Republica Moldova
05.11.96	13.01.97	DIP RT și C Ialoveni	Inginer, secția termotehnică	mun. Chișinău, Republica Moldova
21.11.1995	01.09.1996	Școala medie nr.17 din mun. Chișinău, actualmente gimnaziul Galata	Profesor de matematică	mun. Chișinău, Republica Moldova
26.07.91	16.08.91	Gospodăria agricolă din Horești, raionul Ialoveni	Muncitor in brigada nr. 5	mun. Chișinău, Republica Moldova

EDUCAȚIE ȘI FORMARE

		7 7		
Denumirea	Facultatea, secția	Anul	Anul	Specialitatea, diploma
instituției de		înmatriculării	absolvirii	(seria, numărul)
învățământ				
Academia de	Administrare	2003	2006	Magistru în
Administrare	Publică			Administrare Publică,
Publică de pe				diplomă seria AM
lângă				Nr.012494
Președintele				
Republicii				
Moldova				
Universitatea	Urbanism și	1991	1996	Alimentări cu căldură și
Tehnică a	Arhitectură			gaze, ventilare, diploma
Moldovei				de licență seria AL
				Nr.003090
Școala medie	Generală	1981	1991	Atestat de absolvire a
din satul				școlii medii
Horești,				
raionul				
Ialoveni				

COMPETENȚE PERSONALE

- 1. Predarea disciplinelor. Matematica, fizica generală.
- 2. **Competențe științifice**: domeniul de bază termotehnică; interese științifice: termoenergetica, sisteme de alimentare centralizată cu energie termică.
- 3. Limba maternă: română.
- Limbi străine cunoscute: rusă (abilitatea de înțelegere –utilizator experimentat, abilitatea de vorbire-utilizator experimentat, abilitatea de scriere utilizator experimentat); franceză (abilitatea de înțelegere B1/2, abilitatea de vorbire-B1/2, abilitatea de scriere A1/2); engleză A1/2.
- 5. Aptitudini și competențe sociale: activând în calitate de executant sau diverse funcții de conducere, comunicarea și spiritul de echipă sunt importante.
- 6. Aptitudini și competențe organizatorice: Președintele Comitetului Tehnic "Instalații termice, de ventilare și condiționare a aerului" de pe lângă Ministerul Dezvoltării Regionale și Construcțiilor (din anul 2010 prezent); anii universitari 2010-2012, președinte al Comisiei pentru susținerea examenelor de licență și tezelor de licență, specialitatea termoenergetică, facultatea energetică, Universitatea Tehnică a Moldovei; anii universitari 2012-2014, președinte al Comisiei pentru susținerea examenelor de licență și tezelor de licență, specialitatea inginerie și management în energetică, facultatea energetică, facultatea energetică, facultatea energetică, facultatea energetică, facultatea Tehnică a Moldovei; membru al Consiliului de Conducere al Asociației Inginerilor Instalatori din Republica Moldova (din 2014, www.aiirm.md); membru al Comitetului Tehnic privind atestarea tehnico-profesională a specialiștilor cu activități în construcții, instalații aferente (din anul 2009 prezent). Ocupând diverse funcții de conducere am perfectat abilitățile organizatorice.
- 7. Competențe informatice: o bună cunoaștere a instrumentelor Microsoft Office, Excel.
- 8. **Permis de conducere**: categoria B.

INFORMAȚII SUPLIMENTARE

- 1. Apartenența la societăți științifice, la activitatea științifică, organizatorică și editorială a diferitor consilii, întruniri profesionale:
- Președintele Comitetului Tehnic "Instalații termice, de ventilare și condiționare a aerului" de pe lângă Ministerul Dezvoltării Regionale și Construcțiilor (din anul 2010 - prezent);
- președinte al Comisiei pentru susținerea examenelor de licență și tezelor de licență, specialitatea termoenergetică, facultatea energetică, Universitatea Tehnică a Moldovei (anii universitari 2010-2012);
- președinte al Comisiei pentru susținerea examenelor de licență și tezelor de licență, specialitatea inginerie și management în energetică, facultatea energetică, Universitatea Tehnică a Moldovei (anii universitari 2012-2014);
- membru al Consiliului de Conducere al Asociației Inginerilor Instalatori din Republica Moldova (din 2014 prezent);
- președintele Comisiei de evaluare a tezelor de master pentru absolvirea studiilor superioare de master, Ciclul II ale Universității Tehnice a Moldovei, programul de master "Energie și Mediu", anul de studii 2016/2017

c) Realizări specifice:

- Brevete de invenții;
- Diriginte cu executarea lucrărilor specializate și instalațiilor aferente construcțiilor. Legitimație seria 2011-DLS NR.0333. Domeniile: Instalații și rețele de alimentare cu apă și canalizare. Instalații și rețele de încălzire;
- recenzent: Alimentarea centralizată cu căldură: Manualul universitar/P. Vârlan.-Ch.:,,Tehnica-Info"SRL, 2010.-380 p.

d) Publicați:

1. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Релаксационные процессы в электрофильтрах. В книге: Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей, Доклады Международной научной конференции, 26 июня - 30 июня 2000, Санкт-Петербург. 2000. с. 210-213.

2. Болога М.К., Кожухарь И.А., Гросу Ф.П., Леу В.И. Исследование процесса очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в электрическом поле //Электронная обработка материалов 2001 №5 с. 34-39.

3. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. К теории очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2001 №6 с. 35-40.

4. Vasile Leu. Epurarea lichidului de floarea soarelui în câmp electric. În cartea: Probleme actuale în domeniul îmbunătățirilor funciare, cadastrului și organizării teritoriului, 27 octombrie 2001, Chișinău, UASM. 2001 p.107-111.

5. Bologa M., Leu V., Cojuhari I., Grosu T., Policarpov A. Procedeu și dispozitive de epurare a lichidelor dielectrice de impurități mecanice în câmp electric. Catalog oficial. Expoziția Internațională Specializată Infoinvent – 2001, 3-7 octombrie Chișinău, 2001, p.36.

6. Леу В.И. Электроочистка трансформаторного масла от механической примеси в постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2002 №5 с. 55-59.

7. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Электроосождение механической примеси из диэлектрической жидкости при вынужденном движении в постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2002 №6 с. 33-38.

8. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Обобщение экспериментальных данных по очистке диэлектрических жидкостей в постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2003 №2 с. 53-58.

9. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Теоретические аспекты процесса нестационарной электроочистки диэлектрических жидкостей во внешнем постоянном электрическом поле //Электронная обработка материалов 2003 №3 с. 37-42.

Bologa M., Cojuhari I., Leu V. Electrofiltre pentru fluide dielectrice. Catalog oficial.
 Expoziția Internațională Specializată Infoinvent – 2003, 5-8 noiembrie Chișinău, 2003, p.34-35.

Bologa M., Cojuhari I., Leu V. Instalație electrohidrodinamică solară eoliană energetică.
 Catalog oficial. Expoziția Internațională Specializată Infoinvent – 2002, 9-12 octombrie
 Chișinău, p.63.

 Bologa M., Cojuhari I., Leu V. Instalații eoliano-solare energetice. Catalog oficial. Expoziția Internațională Specializată Infoinvent – 2003, 5-8 noiembrie Chişinău, p.59.

Bologa Mircea, Cojuhari Ivan, Leu Vasile. Brevet de invenţie nr.2728 (13) B2.
 Helioinstalaţie aerodinamică. BOPI nr.3/2005, p.33.

14. Bologa Mircea, Cojuhari Ivan, Leu Vasile. Brevet de invenție nr.2712 (13) B2. Helioinstalație aerodinamică. BOPI nr. 2/2005, p.41.

15. Bologa Mircea, Leu Vasile. Brevet de invenție nr.2139 (13) B1. Electrofiltru pentru lichide. BOPI nr.4/2003, p.20-21.

16. Bologa Mircea, Leu Vasile, Cojuhari Ivan, Grosu Tudor, Policarpov Albert. Brevet de invenție nr.2071 (13) C2. Electrofiltru pentru lichide. BOPI nr.1/2003.

17. Bologa Mircea, Cojuhari Ivan, Grosu Tudor, Leu Vasile, Policarpov Albert. Brevet de invenție nr.3189 (13) C2. Electrofiltru pentru lichide. BOPI 11/2006.

18. Bologa M. K., Grosu F. P., Leu V. I. Separation of dielectric Liquids from mechanical impurities in a direct Field//Proceedings of the 2nd European Conference on Filtration and Separation, Compiegne, France, October, 2006.

19. Bologa M., Grosu T., Kozhukhar I., Leu V. Dielectric liquids Purification from Mechanical Impurity in an Electric Field. The 30th Internationally Attended scientific Conference of the military technical Academy. Modern Technologies in the 21st centari. Section 15, P.187-190, Bucharest, 6-7 november 2003.

20. Гросу Ф.П., Болога М.К., Кожухарь И.А., Леу В.И. Физические особенности очистки диэлектрических жидкостей в электрическом поле. В книге: Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей, Сб. докладов, VI Международной научной конференции, 25-29 июня 2003, Санкт-Петербург, с.82-86.

21. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А., Леу В.И. Процессы очистки диэлектрических жидкостей от механической примеси в электрическом поле. В книге: Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей, Сб. докладов, VI Международной научной конференции, 25-29 июня 2003, Санкт-Петербург, с.25-28.

22. Гросу Ф.П., Болога М.К., Леу В.И., Ал.М. Болога. Некоторые особенности электрической сепарации. //Электронная обработка материалов 2012 №1 с. 50-57.

23. Гросу Ф.П., Болога М.К., Леу В.И, Ал.М. Болога. К вопросу электрической очистки жидких диэлектриков от примесных частиц диэлектрической жидкости. //Электронная обработка материалов 2012 №2 с.72-78.

24. Гросу Ф.П., Болога М.К., Леу В.И., Болога Ал. М. Нестационарный массоперенос при электросепарации. //Электронная обработка материалов 2012 №3 с.73-82.

25. Гросу Ф. П., Болога М. К., Леу В. И., Болога Ал. М. Электрическая фильтрация диэлектрических жидкостей от полупроводящих и проводящих частиц. //Электронная обработка материалов 2012 №4 с.33-43.

26. Гросу Ф.П., Болога М.К., Леу В.И., Болога Ал. М. Сепарация диэлектрических сред в электрических сред. В книге: Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей, Сб. докладов, Международной научной конференции, 25-28 июня 2012, Санкт-Петербург, с.50-52.

27. Mihail Cernei, Vasile Leu, Mihai Arusoi. Experiența municipiului Chișinău privind termoizolarea blocurilor de locuințe conectate la Sistemul Centralizat de Alimentare cu Energie Termică. pag.9-11. Mesagerul Energetic, anul XII, nr.131, septembrie 2012.

28. Mihail Cernei, Vasile Leu, Andrei Vîrlan. Sisteme automatizate aplicate în cadrul sistemului de alimentare centralizată cu energie termică a municipiului Chişinău. pag.10-12. Mesagerul Energetic, anul XII, nr.132, octombrie 2012.

29. Mihail Cernei, Vasile Leu. Măsuri privind eficiența energetică în cadrul sistemului de alimentare centralizată cu energie termică din mun. Chișinău. Conferința internațională Energetica Moldovei-2012. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a II, 4-6 octombrie 2012, Chișinău, pag. 20-26.

30. Черней М., Леу В. Опыт применения труб с полиуретановой теплоизоляцией в централизованной системе теплоснабжения мун. Кишинев. Conferința internațională Energetica Moldovei-2012. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a II, 4-6 octombrie 2012, Chişinău, p.107-111.

31. Mihail Cernei, Vasile Leu, Andrei Vîrlan. Despre regimul de funcționare a sistemului de alimentare centralizată cu energie termică a mun. Chișinău. Conferința internațională Energetica Moldovei-2012. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a II, 4-6 octombrie 2012, Chișinău, p.112-118.

32. Mihail Cernei, Vasile Leu. Sistemul de alimentare centralizată cu energie termică a municipiului Chișinău. VI conferința tehnico-științifică internațională 15-16 noiembrie 2012. Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului. Culegere de articole, volumul IV, pag.83-88.

33. Mihail Cernei, Vasile Leu, Mihai Arusoi. Termoizolarea blocurilor de locuințe conectate la sistemul de alimentare centralizată cu energie termică. VI conferința tehnico-științifică internațională 15-16 noiembrie 2012. Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului. Culegere de articole, volumul IV, pag.89-92.

34. Mihail Cernei, Vasile Leu. Infrastructura surselor ale sistemului de alimentare centralizată cu energie termică din municipiul Chișinău. Pag. 4-6. Mesagerul Energetic, anul XII, nr.133, noiembrie 2012.

35. Mihail Cernei, Ion Lupaşcu, Vasile Leu. Sistem informatic integrat de management. Pag. 7-9. Mesagerul Energetic, anul XII, nr.133, noiembrie 2012.

36. Mihail Cernei, Vasile Leu. Termografia – un instrument eficient aplicat în depistarea deficienților în sistemul de alimentare centralizată cu energie termică a municipiului Chișinău. P.5-6. Mesagerul Energetic, anul XII, nr.134, decembrie 2012.

37. Mihail Cernei, Vasile Leu. Soluții de modernizare a sistemului de alimentare centralizată cu energie termică a municipiului Chișinău. P.7-12. Mesagerul Energetic, anul XII, nr.134, decembrie 2012.

38. V.Leu. The dependence of the efficiency of electrical purification on the voltage at the electrofilter. Abstracts. 6th International Conference Materials Science and Condensed Matter Physics, Institute of Applied Physics, academy of Sciences of Moldova, Chisinau, september 11-14, 2012, p.303.

39. М. Черней, Леу В. Об использовании предизолированных трубопроводов в ППУ изоляции в системе теплоснабжения мун. Кишинев. // «Новости теплоснабжения» №3 (151), 2013г., с. 46-49.

40. Черней М., Ярмолич А., Леу В. Опыт применения конденсаторных установок и схем частотного регулирования в централизованной системе теплоснабжения мун. Кишинев. Problemele energeticii regionale 1(21) 2013, с.48-56. <u>www.ie.asm.md</u>

41. Черней М., Леу В. Опыт применения схем частотного регулирования в централизованной системе теплоснабжения г. Кишинев. // «Новости теплоснабжения» №4 (152), 2013г, с. 35-38.

42. Mihail Cernei, Vasile Leu. Măsuri de eficiență la stațiile de pompare. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnico-științifică cu participare internațională, ediția 1, 23-24 mai, 2013 Chișinău, Culegere de articole, pag. 86-89.

43. Mihail Cernei, Vasile Leu. SACET - Un sistem modern de termoficare a orașului Chișinău.p.18-19. Mesagerul Energetic, anul XIII, nr.146, decembrie 2013.

44. Andrei Vîrlan, Mihail Cernei, Vasile Leu. Modelarea regimurilor hidraulice în SACET Chişinău. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnico-științifică cu participare internațională, ediția 2-a, 10-11 aprilie, 2014 Chişinău, Culegere de articole, pag. 200 - 206.

45. Mihail Cernei, Vasile Leu, Artur Popa. SACET Chişinău. Aspecte ale regimului de funcționare. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnico-științifică cu participare internațională, ediția 2-a, 10-11 aprilie, 2014 Chişinău, Culegere de articole, pag. 81-91.

46. Vasile Leu, Viorica Barbos, Mihail Cernei. SACET Chişinău. Aspecte tehnice și economice de aplicare a compensatoarelor silfonice în SACET. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnico-științifică cu participare internațională, ediția 2-a, 10-11 aprilie, 2014 Chişinău, Culegere de articole, pag. 219 -225.

47. Marcel Grișca, Mihail Cernei, Vasile Leu. SACET – consumator dependent esențial de condițiile meteorologice. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnico-științifică cu participare internațională, ediția 2-a, 10-11 aprilie, 2014 Chișinău, Culegere de articole, pag.168-174.

48. Anna Ababii, Mihail Cernei, Vasile Leu. Aspecte de eficiență energetică la consumatorii din cadrul SACET. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnico-științifică cu participare internațională, ediția 2-a, 10-11 aprilie, 2014 Chișinău, Culegere de articole, pag.175 -181.

49. Cernei Mihail, Leu Vasile, Popa Artur. SACET Chişinău. Sistemul Geo-informațional - o componentă vitală a procesului tehnologic de producere. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnico-științifică cu participare internațională, ediția 2-a, 10-11 aprilie, 2014 Chişinău, Culegere de articole, pag.153 -161.

50. Черней М., Леу В. Мониторинг централизованной системы теплоснабжения мун. Кишинев. Problemele energeticii regionale 1(24) 2014, с.87-92. <u>www.ie.asm.md</u>

51. Vasile Leu Mihail Cernei, Artur Popa. Reflecții SACET vizavi sistem autonom. VII-a conferință tehnico-științifică internațională 13-15 noiembrie 2014. Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului. Secția energie, eficiență, ecologie și educație. Culegere de articole, volumul II, pag.123-126.

52. Vasile Leu, Artur Popa, Mihail Cernei. Oportunități de utilizare a compensatoarelor lenticulare în SACET. VII-a conferință tehnico-științifică internațională 13-15 noiembrie 2014. Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului. Secția energie, eficiență, ecologie și educație. Culegere de articole, volumul II, pag.127-132.

53. Mihail Cernei, Vasile Leu. Sistemul de alimentare centralizată cu energie termică din mun. Chișinău, prezent și tendințe. Asociația Inginerilor Instalatori din Republica Moldova. Revistă tehnică de specialitate. Tehnologiile mileniului trei, nr.1, 2014, pag. 35-39. 54. Vasile Leu, Mihail Cernei. Considerații privind zonele de protecție a rețelelor termice. VIII-a conferință tehnico-științifică internațională 12-13 noiembrie 2015. Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului. Secția energie, eficiență, ecologie și educație. Culegere de articole, volumul II, pag. 33-36.

55. Vasile Leu, Mihail Cernei. Considerații privind necesitatea stabilirii zonelor unitare de încălzire în cadrul SACET. VIII-a conferință tehnico-științifică internațională 12-13 noiembrie 2015. Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului. Secția energie, eficiență, ecologie și educație. Culegere de articole, volumul II, pag. 27-32.

56. Vasile Leu. Aspecte de aplicare a tehnologiilor cu termoviziune. Asociația Inginerilor Instalatori din Republica Moldova. Revista tehnică de specialitate Tehnologiile mileniului trei, anul II, nr.1, 2015, pag. 27-28.

57. Vasile Leu. Aspecte ale epurării electrice a dispersiilor semiconductoare și conductoare. Simpozion științifico-practic internațional. Universitatea Agrară de Stat din Moldova, 12-13 noiembrie 2015, lucrări științifice volumul 45, pag. 367-372.

58. Cernei Mihail, Vasile Leu. Problemele generale ale sistemelor centralizate de încălzire în Republica Moldova. Problemele energeticii regionale 1(30) 2016, p.84-88. <u>www.ie.asm.md</u>

59. Cernei Mihail, Vasile Leu. Actualitatea zonelor unitare de încălzire. Conferința internațională Energetica Moldovei-2016. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a III, 29 septembrie - 1 octombrie 2016, Chișinău, pag. 222-225.

60. Cernei Mihail, Vasile Leu. Considerații privind valorificarea energiei deșeurilor în cadrul sistemelor de alimentare centralizată cu energie termică. EMERG-4, anul II/2016, publicație semestrială editată de AGIR și CNR-CME, pag.195-200.

61. Sergiu Ciobanu, Vasile Leu. Situația serviciului de alimentare cu energie termică în sistem centralizat în Republica Moldova. Conferința internațională Energetica Moldovei-2016. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a III, 29 septembrie - 1 octombrie 2016, Chișinău, pag. 240-244.

62. Ceaki O., Leu V. Propagarea perturbațiilor armonice în rețeaua electrică. Conferința internațională Energetica Moldovei-2016. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a III, 29 septembrie - 1 octombrie 2016, Chișinău, pag. 324-328.

63. Vasile Leu. SA "CET-Nord" file de istorie și perspective investiționale. Asociația Inginerilor Instalatori din Republica Moldova. Revistă tehnică de specialitate. Tehnologiile mileniului trei, anul III, nr.1-2, 2016, pag. 2-4.

64. Mihail Cernei, Inessa Brumă, Vasile Leu. Oportunități privind utilizarea energiei deșeurilor. Conferința tehnico-științifică cu participare internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Ediția a IV-a, 27-29 aprilie, 2017. Universitatea Tehnică a Moldovei, culegere de articole, pag. 50-56.

65. Leu Vasile, Mihail Cernei, Ludmila Vîrlan. Aspecte investiționale în cadrul sistemelor de alimentare centralizată cu energie termică. Conferința tehnico-științifică cu participare internațională "Instalații pentru construcții și economia de energie", ediția XXVII-a, 6-7 iulie 2017, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Romania, pag. 47-53.

66. Leu Vasile, Ludmila Vîrlan, Harea Natalia. Beneficiile producerii pure pentru mediul înconjurător. Conferința tehnico-științifică cu participare internațională "Instalații pentru construcții și economia de energie", ediția XXVII-a, 6-7 iulie 2017, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, Romania, pag. 54-60.

67. В.Й. Леу. О сущности электрогидродинамической очистки жидкости. The 9th International Conference "Microelectronic and Computer Science" & the 6th Conference of Physicists of Moldova, October 19-21, 2017, p.499.

68. Leu Vasile, Cernei Mihail. Centralised district heating systems: Reality and perspectives. 11th International conference on electromechanical and power systems (SIELMEN). 11 october, Iasi, Romania/12-13 october, Chisinau, Republica Moldova, 2017, pag. 571-574.

69. Mihail Cernei, Vasile Leu. Sisteme de încălzire centralizată. Conferința tehnico-științifică inginerie civilă și educație, ediția I-a, 21 decembrie 2017, IP Centrul de Excelență în Construcții, Chișinău, pag.100-105.

70. Vasile Leu, Mihail Cernei. Sistemele de alimentare centralizată cu energie termică, bune practici în țările baltice. Conferința tehnico-științifică cu participare internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Ediția a V-a, 19-20 aprilie, 2018. Universitatea Tehnică a Moldovei, culegere de articole, pag. 31-36.

71. Vasile Leu, Mihail Cernei. Starea sistemelor centralizate de alimentare centralizată cu energie termică. Conferința tehnico-științifică cu participare internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Ediția a V-a, 19-20 aprilie, 2018. Universitatea Tehnică a Moldovei, culegere de articole, pag. 97-103.

e) Participarea la conferințe, forum, expoziții:

- 1. Conferința tehnico-științifică. Probleme actuale în domeniul îmbunătățirilor funciare, cadastrului și organizării teritoriului, 27 octombrie 2001, Chișinău, UASM. 2001
- 2. Expoziția Internațională Specializată Infoinvent 2002, 9-12 octombrie Chișinău, 2002.
- 3. Expoziția Internațională Specializată Infoinvent 2003, 5-8 noiembrie Chișinău, 2003.
- Forumul Regional al Energiei din Europa Centrală şi de Est FOREN 2012, cu tema "Politici si Strategii Energetice Naționale si Regionale. Securitatea Alimentarii", Comitetului Național Român al Consiliului Mondial al Energiei, 17 – 21 iunie 2012, Neptun-Olimp, România.
- Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie şi Educație". Conferință tehnicoștiințifică cu participare internațională, ediția 2-a, 10-11 aprilie, Universitatea Tehnică a Moldovei, 2014, Chişinău.
- Conferința internațională Energetica Moldovei 2012. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a II, 4-6 octombrie 2012, Chişinău, Academia de Științe al Republicii Moldova.
- Conferința tehnico-ştiințifică internațională. Probleme actuale ale urbanismului şi amenajării teritoriului. 15-16 noiembrie 2012 Chişinău, ediția VI-a. Universitatea Tehnică a Moldovei.
- 8. Conferința "Alimentarea cu energie a marilor aglomerări urbane-economie, mediu curate, energie electrică, gaze, căldură, etc". 3 octombrie 2013, București, România.
- 9. Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie și Educație". Conferință tehnicoștiințifică cu participare internațională, ediția I-a, 23-24 mai, 2013, Chișinău.
- Conferința tehnico-științifică internațională, ediția VII-a. Probleme actuale ale urbanismului și amenajării teritoriului. Universitatea Tehnică a Moldovei, 13-15 noiembrie 2014, Chișinău.
- Forumul Regional al Energiei din Europa Centrală și de Est FOREN 2014, cu tema "Energia de mâine – de la viziune la realitate", Comitetului Național Român al Consiliului Mondial al Energiei, 22 – 26 iunie 2014, București.
- Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie şi Educație". Conferință tehnicoștiințifică cu participare internațională, ediția 3-a, 12-13 noiembrie, Universitatea Tehnică a Moldovei, 2015, Chişinău.
- 13. Aspecte privind dezvoltarea cooperării în domeniul energiei între Romania şi Republica Moldova. Masă rotundă organizată de către Consiliul Național Român al Consiliului Mondial al Energiei şi Universitatea Tehnică a Moldovei. Chişinău, 18 februarie 2016.

- 14. Forumul Regional al Energiei din Europa Centrală şi de Est FOREN 2016, cu tema "Energia sigură şi durabilă pentru regiune", Comitetului Național Român al Consiliului Mondial al Energiei, 12 – 16 iunie 2016, Costinești, România.
- Conferința internațională Energetica Moldovei 2016. Aspecte regionale de dezvoltare. Ediția a III, 29 septembrie - 1 octombrie 2016, Chişinău, Academia de Științe al Republicii Moldova.
- 16. Conferința tehnico-ştiințifică internațională, ediția VIII-a. Probleme actuale ale urbanismului şi amenajării teritoriului. Universitatea Tehnică a Moldovei, 17-19 noiembrie 2016, Chişinău.
- Întâlnirea de lucru anuală cu tema: "Punerea în practică a Protocoalelor de colaborare încheiate". Comitetul Național Român al Consiliului Mondial al Energiei, 30 martie 2017, București, FORMENERG.
- Conferința internațională "Energie, Eficiență, Ecologie şi Educație". Conferință tehnicoștiințifică cu participare internațională, ediția a IV-a, 27-29 aprilie 2017, Universitatea Tehnică a Moldovei, Chişinău.
- 19. Conferința tehnico-științifică cu participare internațională "Instalații pentru construcții și economia de energie", ediția XXVII-a, 6-7 iulie 2017, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din Iași, România.
- EU4Energy Kiev Forum: Renewable Heat Issues&Energy Policy Best Practices, 25-26 September 2017, Kiev, Ukraine. International Energy Agency.
- 21. 11th International conference on electromechanical and power systems. 1 october, Iasi, România, 12-13 october, Chisinau, Republica Moldova.
- 22. Forumul Regional al Energiei din Europa Centrală și de Est FOREN 2018, cu tema "Central And Eastern Europe in The New Era of Energy Transition: Challenges, Investment Opportunity and Technological Innovations", 10 – 14 iunie 2018, Costinești, România.

f) Distincții, premii:

 Diploma de gradul III şi medalia de bronz pentru invenţii "Electrofiltre pentru fluide dielectrice". Bologa M., Cojuhari I., Leu V., Grosu T., Policarpov A. Expoziţia Internaţională Specializată Infoinvent – 2003. Chişinău.

 Diploma de gradul III și medalia de bronz pentru invenții "Instalații electrosolare energetice". Bologa M., Cojuhari I., Leu V. Expoziția Internațională Specializată Infoinvent – 2003. Chişinău.

3. Brevet nr.05288. Decretul Președintelui Republicii Moldova nr.46-VII din 27 aprilie 2012. Medalia Meritul Civic, însemnul 3205.

4. Energetician emerit al Comunității Statelor Independente. Decizia Consiliului Electroenergetic al Comunității Statelor Independente din 1 noiembrie 2013.

5. Medalia jubiliară "90 de ani de brand energetic românesc", acordată prin Hotărârea Consiliului Național Român al Consiliului Mondial al Energiei nr.145 din 20.04.2014.

5. Energetician emerit al Comunității Statelor Independente. Decizia Consiliului Electroenergetic al Comunității Statelor Independente din 4 noiembrie 2017.

6. Medalia Comitetului Național Român al Consiliului Mondial al Energiei. Brevet prin Hotărârea Consiliului Director al CNR-CME nr.205 din 25.01.2018.