

ÎMBUNĂTĂȚIREA PERFORMANȚELOR FUNCȚIONALE ALE MICRODEBITMETRELOR ELECTROTERMICE UTILIZÂND METODE DE MODELARE MATEMATICĂ ȘI SIMULARE NUMERICĂ

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE CHIMICĂ
de către

Ing. Raul – Ciprian Moldovan

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Delia Perju
prof.univ.dr.ing. Gheorghiza Jinescu
prof.univ.dr.ing. Șerban Agachi
prof.univ.dr.ing. Lucian Rusnac

Data

108

UNIV. "POLITEHNICA"	
TIMIȘOARA	

_____	_____
_____	_____

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---------------------------------------------|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

În activitatea tehnologică, datorită particularităților specifice, apar situații când nu se pot utiliza metode de determinare directă a vitezei de curgere, motiv pentru care se apelează la principii de măsurare indirectă a acesteia. Astfel, măsurarea și reglarea automată a debitelor este o problemă frecvent pusă, mai ales în ingineria chimică unde datorită mediilor vehiculate este necesară studierea și dezvoltarea unor alte principii de măsurare a debitelor, printre acestea numărându-se și metodele electrotermice.

Ținând cont de utilizarea și implicit valoarea aplicativă a debitmetrelor electrotermice, datele din literatură rezumându-se în cea mai mare parte doar la aspecte principiale, nepermițând desprinderea de concluzii pentru dimensionarea optimală și exploatarea rațională, s-a considerat oportună abordarea problemelor legate de realizarea și utilizarea debitmetrelor electrotermice pentru măsurarea debitelor mici de gaze, denumite în această lucrare microdebitmetre electrotermice.

Prezenta lucrare este rezultatul activității desfășurate în perioada stagiului de doctorat la Facultatea de Chimie Industrială și Ingineria Mediului din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara, sub coordonarea doamnei Prof. dr. ing. Delia PERJU, căreia doresc să aduc alese mulțumiri pentru îndrumarea și sprijinul acordat.

Îmi exprim întreaga considerație față de membrii comisiei de doctorat, domnul președinte al comisiei Conf. dr. ing. Petru NEGREA – Prodecanul Facultății de Chimie Industrială și Ingineria Mediului din Timișoara, doamna Prof. dr. ing. Gheorghiuța JINESCU de la Universitatea Politehnica București, domnul Prof. dr. ing. Șerban AGACHI de la Universitatea „Babeș-Bolyai” din Cluj-Napoca, domnul Prof. dr. ing. Lucian RUSNAC de la Universitatea „Politehnica” din Timișoara, care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei, pentru observațiile constructive și pentru timpul acordat examinării lucrării.

Doresc să mulțumesc cadrelor didactice și colegilor doctoranzi din cadrul colectivului de Automatizări al Facultății de Chimie Industrială și Ingineria Mediului, familiei și prietenilor, pentru ajutorul, încurajarea și sfaturile oferite pe parcursul elaborării acestei lucrări.

Timișoara,
aprilie 2008

Raul – Ciprian MOLDOVAN

Moldovan, Raul – Ciprian

Îmbunătățirea performanțelor funcționale ale microdebitmetrelor electrotermice utilizând metode de modelare matematică și simulare numerică

Teze de doctorat ale UPT, Seria 4, Nr. 13 , Editura Politehnica, 2008, 212 pagini, 117 figuri, 64 tabele.

ISSN: 1842-8223

ISBN: 978-973-625-642-4

Cuvinte cheie:

măsurarea debitelor, debitmetre electrotermice, microdebitmetre, modelare matematică, simulare numerică

Rezumat:

Subiectul lucrării se încadrează în domeniul general al ingineriei chimice, respectiv subdomeniul legat de tehnica de măsurare a principalilor parametri care influențează comportarea proceselor chimice, cum ar fi temperatura, debitul, nivelul, concentrația, etc. și care prin menținerea la valori constante, preconizate de desfășurarea fenomenelor fizico-chimice din instalații și utilaje, pot asigura o funcționare stabilă a acestora, respectiv obținerea unei calități ridicate a produsului finit.

Din acest motiv, măsurarea debitelor de fluide reprezintă un domeniu larg, acesta ocupând un loc important în controlarea proceselor industriale și în conducerea efectuării cercetărilor în instalații de laborator și pilot. În cadrul tezei se abordează cercetări referitoare la îmbunătățirea performanțelor funcționale, și implicit a celor constructive, ale microdebitmetrelor care funcționează pe baza principiului electrotermic. Studiile prezentate în cadrul lucrării aduc contribuții importante la descrierea unor fenomene și aspecte neabordate până în prezent, legate de construcția, funcționarea și performanțele aparatelor de acest tip, utilizând metode de modelare matematică și simulare numerică.

CUPRINS

INTRODUCERE	7
OBIECTIVELE GENERALE ALE LUCRĂRII	10
I. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU	11
I.1. Debitmetre termice	11
I.1.1. Introducere în debitmetrie	11
I.1.2. Debitmetre termice. Clasificarea debitmetrelor termice	17
I.1.3. Caracteristici constructive generale ale debitmetrelor termice	19
I.1.4. Ecuția de bază a debitmetrelor termice	20
I.1.5. Debitmetre cu strat limită termic	22
I.1.5.1. Variante și scheme de funcționare ale debitmetrului cu strat limită termic	25
I.1.6. Debitmetre calorimetrice	29
I.1.6.1. Debitmetrul calorimetric cu contact cu fluidul măsurat	30
I.1.6.2. Debitmetrul calorimetric fără contact cu fluidul măsurat	30
I.1.7. Formulele transferului de căldură la curgerea fluidelor în tuburi cu secțiune circulară	32
I.1.8. Transferul de căldură în debitmetrele termice	34
I.1.8.1. Distribuția temperaturii în traductorul debitmetrelor termice	35
I.1.8.2. Transferul de căldură în debitmetrele termice cu încălzitor inelar ...	39
I.1.8.3. Transferul de căldură în debitmetrele termice cu încălzitor punctiform	43
I.1.9. Comportarea dinamică a debitmetrelor termice și posibilități de compensare a erorilor dinamice ale acestora	46
I.2. Modelarea matematică și simularea, modalități moderne de realizare a cunoașterii	49
I.2.1. Introducere	49
I.2.2. Tendințe actuale în abordarea teoriei modelării	51
I.2.3. Conceptul de sistem. Experimentul ca sistem tehnic	52
I.2.4. Modelarea matematică	55
I.2.4.1. Conceptele de model, modelare. Clasificarea modelelor	55
I.2.4.2. Modelarea experimentală	58
I.2.5. Simularea	67
I.3. Măsurarea și erorile de măsurare	70
I.3.1. Importanța și scopul teoriei erorilor de măsurare	70
I.3.2. Considerații generale privind procesul de măsurare	71
I.3.3. Caracteristicile mijloacelor de măsurare	74
I.3.4. Clasificarea și definirea erorilor	76
I.3.5. Estimarea valorii adevărate a unei mărimi măsurate	78

II.	PARTEA EXPERIMENTALĂ	82
II.1.	Obiectivele studiilor experimentale	82
II.2.	Principiul de funcționare al microdebitmetrelor electrotermice	83
II.3.	Instalația experimentală. Caracteristici constructive	84
II.3.1.	Microdebitmetrul electrotermic 1	84
II.3.2.	Microdebitmetrul electrotermic 2	90
II.3.3.	Microdebitmetrul electrotermic 3	92
II.4.	Modul de lucru	99
II.5.	Studiul comportării la transfer al microdebitmetrelor electrotermice	100
II.5.1.	Studiul comportării statice	100
II.5.2.	Studiul comportării dinamice	111
II.6.	Elaborarea modelelor matematice experimentale ce caracterizează funcționarea microdebitmetrelor electrotermice	121
II.7.	Validarea modelelor matematice	127
II.8.	Determinarea performanțelor microdebitmetrului electrotermic pentru gaze și studii asupra posibilității de îmbunătățire a acestora.....	133
II.8.1.	Stabilirea ecuației particulare de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3	133
II.8.1.1.	Calculul parametrilor constructivi ce intervin în soluționarea ecuației particulare de funcționare	138
II.8.2.	Analiza de sensibilitate a microdebitmetrului electrotermic 3	145
II.8.3.	Măsurarea sumei și diferenței a două debite mici de gaze	152
II.8.4.	Extinderea domeniului de măsurare	157
II.9.	Simularea comportării microdebitmetrelor electrotermice	161
II.9.1.	Simularea comportării statice	161
II.9.2.	Simularea comportării dinamice	169
II.10.	Aplicarea metodelor matematice de calcul pentru stabilirea incertitudinii rezultatului măsurării	178
II.11.	Considerații privind utilizarea microdebitmetrelor electrotermice ca traductoare sau ca parte componentă a unor analizoare	184
II.11.1.	Utilizarea microdebitmetrelor electrotermice în sisteme de reglare automată a debitului	184
II.11.2.	Utilizarea microdebitmetrelor electrotermice ca parte componentă a analizoarelor termovâscozimetrice și termodensimetrice	185
	CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	190
	Bibliografia	200

INTRODUCERE

Măsurarea și reglarea automată a debitelor este o problemă frecvent pusă, mai ales în activitatea tehnologică. În industria chimică, caracterizată prin procese tehnologice complexe, care se disting prin rapiditatea desfășurării și printr-o înaltă sensibilitate la perturbarea regimului stabilit, prin nocivitate, pericol de incendiu sau de explozie, debitul – alături de presiune, temperatură și nivel – constituie un parametru care nu lipsește aproape din nici un sistem de automatizare a proceselor sau în instalații de cercetare din domeniu [1].

O gospodărire rațională a fluidelor de orice natură este de neconceput fără o riguroasă determinare cantitativă în diferitele faze de transfer, verificarea prin măsurare a cantităților consumate în procesele tehnologice fiind esențială pentru folosirea judicioasă a resurselor materiale și a celor energetice, pentru stabilirea gradului de eficiență în funcționarea instalațiilor din diferite industrii, precum și a instalațiilor pilot din laboratoarele de cercetare. Astfel, prin măsurarea și stabilizarea automată a debitelor se asigură instalațiilor un regim de funcționare constant și bine definit, ceea ce duce la obținerea unor avantaje tehnice și economice importante [2].

Măsurarea debitelor de fluide reprezintă un domeniu vast, aceasta ocupând un loc important în controlarea proceselor industriale, debitul caracterizând cantitativ curgerea fluidelor prin liniile lor de transport (conducte închise sau canale deschise).

Odată ce debitul este o mărime derivată, definită ca fiind cantitatea de fluid care trece în unitatea de timp prin linia de transport, măsurarea sa, presupune existența unui regim dinamic al fluidului, în condițiile unei mari varietăți de valori ale parametrilor de stare. Acest fapt impune rezolvarea unor dificultăți suplimentare atât din punct de vedere fenomenologic cât și constructiv, față de situația măsurării statice specifică de cele mai multe ori altor parametri ai fluidelor (temperatura, presiunea, concentrația, densitatea, vâscozitatea, etc.).

Ținându-se seama de amplificarea accelerată a interesului pentru măsurarea debitului, odată cu creșterea activității industriale, se explică de ce, dacă inițial s-au măsurat numai debitele lichidelor, iar mai târziu s-a continuat cu cele ale gazelor, aburului și metalelor topite, în prezent s-a ajuns la măsurarea debitului tuturor fluidelor. În consecință un rol major a revenit măsurării debitelor, atât în conducerea proceselor industriale, cât și în determinarea consumurilor și a bilanțurilor de materiale. Acest fapt a dus la creșterea importanței pe care o prezintă locul pe care îl ocupă debitmetrele în cadrul mijloacelor de măsurare a debitelor de fluide. Ponderea semnificativă a debitmetrelor s-a realizat printr-o dinamică accentuată privind atât imaginarea unor noi metode de măsurare a debitului, cât și diversificarea soluțiilor constructive funcție de parametrii fluidului măsurat și condițiile de exploatare.

Principalele tendințe manifestate în măsurarea debitelor sunt: creșterea performanțelor debitmetrelor prin extensia domeniului de măsurare, prin mărirea preciziei și a fiabilității; reducerea gabaritelor și greutateii lor; creșterea ponderii debitmetrelor ce impun funcțional un mic consum energetic preluat de la fluidul măsurat; precum și creșterea ponderii debitmetrelor digitale cu soft-uri integrate.

Acestea din urmă prezintă avantajul stocării datelor și posibilitatea prelucrării rapide a acestora în funcție de interesele utilizatorului, prin conectarea la calculatoarele de proces.

Un aspect deosebit de important pentru utilizatori, dar și pentru producătorii de echipamente de măsurare a debitului, este stabilirea tipului de debitmetru care, pentru condițiile specifice de exploatare, rezolvă optim din punct de vedere tehnico-economic cerințele ce se impun.

În aplicațiile industriale, datorită particularităților specifice, apar situații când nu se pot utiliza metodele de determinare directă a vitezei de curgere (turbine, ștrangulări, etc.), motiv pentru care se apelează la principii de măsurare indirectă a acesteia sau alte metode de determinare a debitului [1]. Ingineria chimică este un domeniu aparte din acest punct de vedere datorită mediilor acide sau bazice care sunt vehiculate, motiv pentru care este necesară studierea și dezvoltarea unor alte principii de măsurare a debitelor. Printre acestea se numără și măsurarea debitelor prin metode electrotermice [3].

În majoritatea cazurilor, metodele clasice pentru măsurarea debitelor fluidelor bazate pe legea lui Bernoulli sunt insuficient de precise în cazul debitelor mici și foarte mici sau chiar inaplicabile la măsurarea acestor debite. În schimb, metodele termice se pretează la măsurarea și înregistrarea electrică a debitelor mici în condiții aparative relativ simple și cu precizia cerută în activitatea de cercetare.

Totodată, debitmetrele electrotermice pot fi utilizate și ca traductoare de măsurare în cadrul unor sisteme de reglare pentru stabilizarea debitelor mici și foarte mici.

Un alt avantaj pe care îl oferă debitmetrele electrotermice constă în faptul că aceste aparate măsoară debitul de masă, ceea ce în cazul gazelor înseamnă o indicație practic independentă de presiune și presupune simplificarea calculului de bilanț de materiale pe baza măsurărilor efectuate.

Domeniile de utilizare ale debitmetrelor electrotermice sunt variate, cu ele putându-se măsura debite de lichid și gaz cu proprietăți speciale (toxicitate, radioactivitate, agresivitate) în condițiile în care este necesară o izolare completă a traductorului debitmetric față de personalul operator, debitul unor lichide și metale lichide la temperaturi ridicate, debitul unor amestecuri de soluții și substanțe solide, soluții și gaze, gaze și particule, precum și debitul unor soluții la temperaturi scăzute sau debitul mediu al curenților pulsatori de fluid.

Ținând seama de utilizarea și implicit valoarea aplicativă a debitmetrelor electrotermice, datele din literatură rezumându-se în cea mai mare parte doar la aspecte principiale, în special la mecanismul transferului de căldură în aceste aparate, și nepermițând desprinderea de concluzii pentru dimensionarea optimală și exploatarea rațională, s-a considerat oportună abordarea problemelor legate de utilizarea debitmetrelor electrotermice pentru măsurarea debitelor mici de gaze, denumite în această lucrare microdebitmetre electrotermice.

În proiectarea sistemelor, o problemă importantă o constituie obținerea unor informații despre sistem, înainte ca el să fie realizat în mod concret. În sprijinul eforturilor de a-i cunoaște complexitatea, componentele și diferitele legi ce o guvernează, cercetătorii au creat noțiunea de sistem. De aici pornind au apărut modelele matematice, iar necesitatea obținerii de informații despre sistem înainte ca el să fie realizat a condus la simulare. Astfel, modelarea și simularea numerică constituie un complex de activități asociate în construirea sistemelor reale și simularea cu ajutorul calculatorului electronic a comportării acestora [4].

Acestea sunt concepte intrate de foarte mult timp în cotidianul comunicațional datorită unei mase mari de informații cu foarte multe referințe implicite asupra acestora, informații provenite din cele mai variate domenii [5].

Datorită faptului că modelarea și simularea sunt bazate pe modele, este evident că tocmai conceptul de model este cel care determină, în ultimă instanță, toate activitățile ce țin de modelare, simulare și de procesele și conceptele conexe.

Realizarea de experimente pe sistemele reale nu este de multe ori posibilă atât datorită performanțelor constructiv – funcționale, cât și din punct de vedere economic, costul și durata determinărilor experimentale putând avea valori mari, iar un experiment pe un sistem real conduce la perturbații în activitatea care se desfășoară. Avantajul simulării constă tocmai în faptul că se pot face experiențe pe un model ce este o reprezentare simbolică a sistemului.

Ținând cont de aspectele teoretice și practice prezentate în literatura de specialitate privind măsurarea debitelor cu ajutorul debitmetrelor termice, realizarea acestora, modelarea matematică și simularea numerică, prezenta lucrare încearcă să îmbine toate aceste aspecte cu scopul îmbunătățirii performanțelor funcționale ale microdebitmetrelor electrotermice, utilizând metode de modelare matematică și simulare numerică.

OBIECTIVELE GENERALE ALE LUCRĂRII

Principalele obiective ale lucrării sunt următoarele:

1. Realizarea unei documentări bibliografice cu privire la conceptul de debitmetrie, identificarea locului ocupat de către debitmetrele termice în tehnica măsurării și clasificarea acestora. Prezentarea caracteristicilor constructive, a variantelor și schemelor de funcționare a unor debitmetre termice, precum și identificarea ecuațiilor ce caracterizează funcționarea acestora.
2. Documentare privind modelarea matematică și simularea numerică, ca modalități moderne de realizare a cunoașterii.
3. Considerații asupra conceptului de măsurare și erorilor de măsurare.
4. Realizarea instalației experimentale și elaborarea modului de lucru pentru efectuarea determinărilor experimentale.
5. Obținerea, interpretarea, compararea rezultatelor experimentale și caracterizarea comportării la transfer a trei microdebitmetre electrotermice pentru gaze, diferite din punct de vedere constructiv.
6. Prelucrarea matematică a rezultatelor experimentale în vederea elaborării modelelor matematice pentru aprecierea și predicția comportării celor trei microdebitmetre electrotermice în diferite condiții specifice. Validarea modelelor matematice prin calculul indicatorilor de adecvanță.
7. Determinarea performanțelor de funcționare și studiul posibilității de îmbunătățire al acestora, prin identificarea influenței parametrilor constructivi și funcționali. Analiza de sensibilitate.
8. Simularea comportării la transfer a celor trei microdebitmetre electrotermice. Validarea simulărilor.
9. Stabilirea incertitudinii rezultatului măsurării al celor trei microdebitmetre electrotermice, prin aplicarea metodelor matematice de calcul al erorilor de măsurare.
10. Identificarea posibilităților de utilizare a microdebitmetrelor electrotermice în ingineria chimică.
11. Prezentarea concluziilor generale și a contribuțiilor personale.

I. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIU

I.1. Debitmetre termice

I.1.1. Introducere în debitmetrie

Importanța debitmetriei

Măsurarea debitului ocupă un loc important în controlarea proceselor industriale. Funcționarea și exploatarea corespunzătoare a instalațiilor de transport, distribuire și utilizare a fluidelor din industria chimică nu se poate face fără o riguroasă determinare a cantităților trecute prin diversele stadii intermediare între locul de producere și cel de utilizare. Între parametrii care condiționează transformările fizico-chimice din cadrul proceselor tehnologice specifice industriei chimice, debitul ocupă un loc aparte, astfel măsurarea și reglarea lui se impune ca o necesitate pregnantă.

Determinarea cantitativă cât mai exactă permite, pe de o parte, stabilirea randamentelor de funcționare a instalațiilor, iar pe de altă parte, cunoașterea producției sau a consumului. Nu există instalație chimică fără aparate pentru măsurarea debitelor de fluide, datele obținute la măsurarea acestora în cadrul unităților industriale sau în instalațiile pilot din laboratoarele de cercetare putând constitui elemente de plecare pentru întocmirea bilanțurilor de materiale și energie. Acestea sunt menite să dea indicații în timp real despre randamente, consumuri specifice de materiale, consumuri specifice de energie, etc.. Acești factori, la rândul lor, stau la baza calculului prețului de cost și constituie premisele esențiale ale optimizării proceselor industriale.

Utilizând corect tehnica măsurării cantităților de materiale și de energie, se poate realiza un control eficace al modului de funcționare, de exploatare a instalațiilor.

Debitmetria este ramura tehnicii măsurării care are ca obiect măsurarea cantității de fluid ce trece în unitatea de timp de la o sursă spre consumator, cu ajutorul unor mijloace de măsurare adecvate, denumite debitmetre, precum și cu studiul principiilor constructive și de funcționare ale acestora.

În măsurarea debitelor intervin două situații fundamentale [6]:

- măsurarea în conducte închise, care este specifică mai ales industriei chimice, dar poate interveni și în cea metalurgică, alimentară, etc..
- măsurarea în conducte deschise (canale) intervine în cazul rezervoarelor și a sistemelor mari de canalizare specifice uzinelor de apă.

Debitul de fluid

Debitul poate fi definit ca fiind cantitatea de fluid care trece în unitatea de timp printr-o secțiune transversală a tubului de curent determinat de linia sa de transport.

Fluidul este un mediu continuu deformabil la care forțele de coeziune dintre moleculele constituente sunt foarte mici, fluidul neavând formă proprie, luând forma

conturului rigid care îl mărginește. Studiul fluidelor pornește de la ipoteza că, la scară macroscopică, sunt medii continue. Fluidele, funcție de mărimea forțelor de coeziune dintre moleculele constituente, se subîmpart în lichide și gaze, fiecare dintre cele două tipuri de fluide având plaje specifice de valori pentru densitate și vâscozitate și implicit proprietăți definitorii, caracteristice [7]. De asemenea, comportament de fluid în condiții obișnuite au și sistemele eterogene disperse lichid-gaz (ceață, spumă, strat de bule), lichid-lichid (emulsie), lichid-solid (suspensie, strat fluidizat cu lichide), gaz-solid (fum, strat fluidizat cu gaze) și corpurile reologice cu proprietăți intermediare între solide și fluide (topiturile de materiale plastice, smoala, suspensii foarte concentrate în fază solidă) [8].

Fluidele incompresibile, lichidele, se măsoară fie în m^3 (volumul), fie în kg (masa), în relația dintre masă și volum intervenind densitatea care, pentru cazurile practice, se poate considera că este influențată numai de temperatură [9]. În cazul fluidelor compresibile se măsoară, de regulă, volumul, în m^3 . Simpla indicare a numărului de metri cubi ocupați de o cantitate de gaz nu este edificatoare atâta timp cât nu se ține cont de condițiile de presiune și temperatură la care se găsește această cantitate.

Unitățile de măsură ale debitului de fluid conform Sistemului Internațional de unități (SI) sunt: kg/s – pentru debitul masic și m^3/s – pentru debitul volumic.

Tubul de curent T al unui fluid (figura I.1) este definit de suprafața formată de totalitatea liniilor de curent care trec prin toate punctele curbei închise de contur C , curbă care nu este linie de curent, linia de curent fiind curba tangentă, în fiecare punct al său, la vectorul viteză al respectivului punct [10].

Debitul, conform definiției date mai sus, este o mărime derivată, determinată prin raportarea a două mărimi fundamentale: masa și timpul. Acesta este modul de definire directă a debitului.

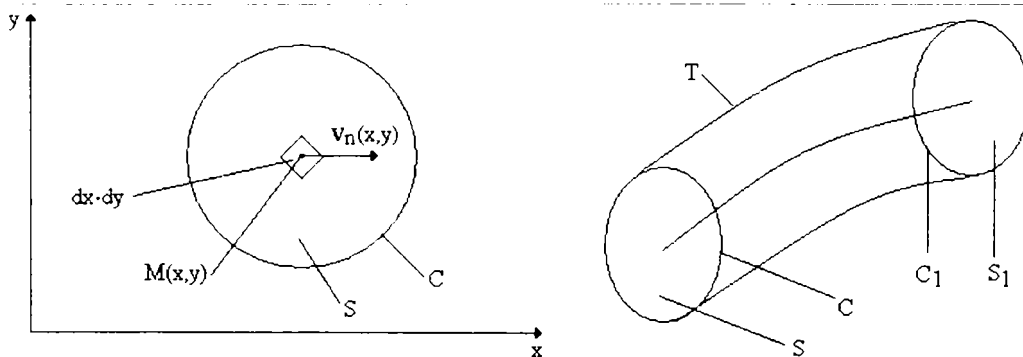


Figura I.1. Tubul de curent aferent curgerii unui fluid

Expresia primară a debitului este cea de definire directă a debitului masic, care, cu referire la secțiunea S determinată în planul x - y (figura I.1), are forma:

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \quad (I.1)$$

unde:

Δm – masa de fluid trecută în intervalul $\Delta \tau$ prin secțiunea S delimitată în planul x - y de tubul de curent T , [kg];

$\Delta \tau$ – intervalul de timp în care se determină debitul, [s].

Cu alte cuvinte, debitul masic poate fi definit ca fiind cantitatea masică de fluid care curge printr-o secțiune transversală cu aria cunoscută, într-o secundă [11].

Ca o consecință a legii conservării masei, de-a lungul unei linii de transport (conductă închisă sau canal deschis fără derivații, surse sau puncte de acumulare) dintre o sursă și un consumator, oriunde am amplasa debitmetrul, debitul masic măsurat este același [10].

Cu toate că de-a lungul liniei de transport au loc o serie de variații atât ale parametrilor de stare ai fluidului, care determină modificarea densității locale $\rho(x,y)$, cât și ale regimului de curgere, care determină modificarea vitezei elementare $v_n(x,y)$ debitul masic rămâne însă constant. Ca o consecință rezultă modificarea, de la o secțiune S la alta S_1 , a debitului volumic q_v .

Definirea directă a debitului volumic se realizează cu expresia (I.2):

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta \tau} \quad (I.2)$$

unde:

ΔV – volumul de fluid trecut în intervalul $\Delta \tau$ prin secțiunea S a tubului de curent T , [m^3].

Analizând relațiile (I.1) și (I.2), se remarcă că atât debitul masic, cât și cel volumic sunt fie debite medii (notate q_{mmed} , q_{vmed}) când intervalul de timp $\Delta \tau > 0$, fie debite instantanee (notate q_m , q_v) când $\Delta \tau \rightarrow 0$.

Definirea debitului se poate realiza și indirect prin prelucrarea relațiilor (I.1) și (I.2). Debitul masic definit indirect are expresia [10]:

$$q_m = \iint_S \rho(x,y) \cdot v_n(x,y) dx dy = S \cdot v_s \cdot \rho_s \quad (I.3)$$

unde:

S – aria secțiunii de măsurare, [m^2];
 $v_n(x,y)$ – viteza fluidului, normală elementului de suprafață $dx dy$, [m/s];
 v_s – viteza instantanee a fluidului, mediată pe ansamblul secțiunii de măsurare S , [m/s];
 $\rho(x,y)$ – densitatea fluidului, corespunzătoare suprafeței elementare $dx dy$, [kg/m^3];
 ρ – densitatea fluidului, mediată pe ansamblul secțiunii de măsurare S , [kg/m^3].

Debitul volumic definit indirect are expresia [10]:

$$q_v = \iint_S v_n(x,y) dx dy = S \cdot v_s \quad (I.4)$$

Definirea indirectă a debitului făcându-se funcție de viteza instantanee v_s a fluidului în secțiunea de măsurare, poate fi utilizată numai pentru determinarea debitului instantaneu q_m sau q_v .

Numai când viteza instantanee $v_n = v_n(\tau)$ este constantă pe întregul interval de timp $\Delta \tau$ pentru care se determină debitul mediu, rezultă egalitatea [10]:

$$q(\tau) = q_{med}(\Delta \tau) \quad (I.5)$$

Factorii de influență

Fluidul, caracterizat de parametrii săi de stare, parcurge întregul traseu sursă-consumator de-a lungul liniei de transport și trece prin debitmetru. Parametrii de stare ai fluidului precum și regimul de curgere condiționează valoarea debitului. La rândul său, regimul de curgere este determinat pentru fluidul dat de configurația liniei de transport sursă-consumator și de configurația profilului de trecere a fluidului prin debitmetru.

Debitmetrele se etalonează pentru anumite condiții de exploatare, caracterizate prin indicarea fluidului de măsurat, a densității și vâscozității acestuia, precum și a condițiilor de lucru, temperatură și presiune. Din aceste motive este foarte important pentru constructorii și utilizatorii de debitmetre să cunoască variația scării de debit cu variația uneia sau a mai multora dintre condițiile în care s-a efectuat etalonarea (de exemplu, cu variația temperaturii sau a presiunii fluidului).

Fluidul, trecând prin debitmetru, parcurge drumul între sursă și consumator în interiorul tubului său de curent, în cadrul liniei de transport existente.

Secțiunea tubului de curent al fluidului se identifică cu cea asigurată, constructiv, de linia de transport numai în cazul gazelor și aburului, caz în care curgerea are loc sub presiune.

Pentru lichide, identitatea între secțiunea S a tubului de curent al fluidului și cea a liniei de transport are loc numai pentru curgerea sub presiune, caracterizată prin neexistența pentru nici o curbă C, de contur a tubului, a unor puncte de contact lichid-gaz. Atunci când tubul de curent al lichidului are pentru o curbă C de contur puncte de contact lichid-gaz, uzual cu atmosfera, curgerea sa este definită ca având loc cu suprafață liberă [10].

Funcție de raportul dintre lungimea perimetrului ud și lungimea integrală a perimetrului C al secțiunii a tubului de curent, curgerile cu suprafață liberă se împart în:

- curgeri în canale, când raportul este subunitar;
- curgeri sub formă de jeturi, când raportul este egal cu 1.

Un alt mod de caracterizare a tubului de curent este raza hidraulică definită ca raportul dintre secțiunea tubului de curent și lungimea perimetrului ud.

Curgerea unui fluid este esențial să fie caracterizată din punct de vedere dinamic analizându-se atât câmpul presiunilor, care sunt câmpuri scalare, cât și câmpul vitezelor, care sunt câmpuri vectoriale.

În acest sens, din punctul de vedere al variației în timp a mărimilor care o caracterizează, curgerea fluidului se clasifică astfel [10]:

- curgere permanentă (staționară), caracterizată prin constanta în timp, în raport cu un sistem fix de referință, a tuturor mărimilor care descriu curgerea;
- curgerea semipermanentă, caracterizată prin variația vectorului viteză al unui anumit punct ca intensitate și constanța sa ca sens;
- curgere nepermanentă (nestaționară), caracterizată prin variația în timp într-un anumit punct din spațiu, a mărimilor care descriu curgerea.

Din punct de vedere al variației în spațiu al mărimilor ce o caracterizează, curgerile se clasifică în [10]:

- curgeri uniforme, în cadrul cărora toate liniile de curent sunt paralele între ele, vitezele fiind constante în lungul aceleiași linii;
- curgeri neuniforme, în cadrul cărora liniile de curent nu sunt toate drepte paralele între ele, vitezele variind în lungul lor ca mărime sau direcție.

Din punctul de vedere al mecanismului mișcării, curgerea fluidelor poate fi laminară sau turbulentă.

Curgerea în regim laminar se caracterizează prin deplasarea fluidului astfel ca toți vectorii viteză ai tubului de curent să aibă aceeași direcție și sens. Fluidele tind spre o mișcare fără amestecare laterală, deci straturile adiacente ale acestora alunecă unul de-a lungul celuilalt [12]. Curgerea laminară are loc în general la debite (viteze de curgere) mici ale fluidelor. Asupra particulelor de fluid acționează forțe de inerție și de vâscozitate, în regim laminar ponderea mare având-o forța de vâscozitate [13, 14].

Regimul de curgere turbulent se caracterizează prin faptul că apare, ca urmare a existenței unor vectori de viteză cu direcții și sensuri diferite față de direcția și sensul de deplasare a fluidului, o puternică amestecare laterală a fluidului. Curgerea turbulentă apare la debite (viteze de curgere) mari ale fluidului. În regim turbulent forțele de vâscozitate au o pondere mai redusă [13, 14].

Trecerea de la regimul de curgere laminar la cel turbulent nu se face direct, există un domeniu de viteză, respectiv de debit, pentru care curgerea este fie aparent laminară, fie de o turbulență slab dezvoltată, domeniu denumit curgere intermediară [15, 16].

Pentru stabilirea regimului de curgere, Reynolds a efectuat experiențe cu diferite lichide în conducte cu diametre diferite. Din experiențe a rezultat că regimul de curgere este influențat de viteza de deplasare a fluidului, de vâscozitatea cinematică și de diametrul interior al conductei. Cu aceste mărimi s-a exprimat un raport nedimensional al regimului de curgere, astfel valorile cifrei Re (Reynolds) mai mici sau egale cu 2300 corespund regimului laminar, iar valorile cifrei Re mai mari sau egale cu 10000 corespund regimului turbulent. La valori ale cifrei Re cuprinse între 2300 și 10000 se situează regimul intermediar reprezentând faza de trecere de la regimul de curgere laminar la cel turbulent. În fond, în regimul intermediar curgerea este deja slab turbulentă, aceasta constituindu-se pe măsură ce debitul fluidului crește și valoarea cifrei Re se apropie de 10000 [13].

Aprecierea cantitativă a regimului de curgere se poate face prin grupul adimensional, de mărimi fizice și geometrice numit criteriul lui Reynolds [15]:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (I.6)$$

în care:

- w – viteza fluidului, [m/s];
- d – diametrul conductei, [m];
- ρ – densitatea fluidului, [kg/m³];
- η – vâscozitatea dinamică a fluidului, [kg/(m·s)];
- ν – vâscozitatea cinematică a fluidului, [m²/s].

Clasificarea debitmetrelor

Pentru clasificarea unitară a debitmetrelor trebuie avute în vedere mai multe criterii.

După natura mijloacelor folosite în procesul de măsurare există măsurări directe și măsurări indirecte. Dacă mărimea fizică considerată se compară cu unitatea de măsură atunci aceste măsurări se numesc directe, iar dacă valoarea mărimii fizice se obține prin intermediul unei alte mărimi, funcțional dependente de prima, măsurările sunt indirecte [17].

Consecința logică a modului de definire directă sau indirectă a debitului, care a dus la imaginarea metodelor de măsurare directe, respectiv indirecte a debitului, este unul dintre aceste criterii. Determinarea vitezei de curgere a fluidului se poate face, de exemplu, cu ajutorul presiunii diferențiale, presiunii dinamice, inducției

electromagnetice, proceselor de transfer de căldură, propagării oscilațiilor sonore în mediu fluid, etc. [18, 19]. Funcție de acestea și debitmetrelor li s-a atribuit denumirea de debitmetre directe, respectiv debitmetre indirecte. Debitmetrele directe pot asigura măsurarea debitului mediu (cele cu cameră de măsurare cu evacuare discontinuă) sau instantaneu (cele cu cameră de măsurare cu evacuare continuă), iar cele indirecte numai debitul instantaneu. Astfel, mărimea măsurată de debitmetru poate fi debitul mediu sau cel instantaneu.

Debitmetrele în marea lor majoritate au structura clasică cu un singur traductor primar. În afara de acestea sunt și debitmetre care au în componență mai multe traductoare primare, care pot fi denumite debitmetre complexe. Din acest motiv, un alt criteriu discerne cu referire la traductorul primar, între debitmetrele cu un singur traductor primar și cele complexe, multitractor. Totodată, conversia debitului în cadrul traductorului primar poate fi realizată constructiv-funcțional în două moduri: cu piese în mișcare sau fără piese în mișcare.

Structura constructivă a elementului de referință face obiectul unui alt criteriu privind grupa debitmetrelor având elementul de referință cu piese în mișcare, unde se disociază de exemplu faptul că elementul de referință poate fi funcțional mobil sau imobil față de traductorul primar.

Soluția constructivă concretă a traductorului primar, adică a elementului de referință și a elementului sensibil, diferențiază fiecare tip de debitmetru în parte, de multe ori funcție de aceasta atribuindu-i-se numele debitmetrului.

Traductoarele termice se caracterizează prin simplitatea elementului sensibil, precum și prin disponibilitate și fiabilitate ridicate pe întreaga durată de serviciu. Traductorul primar poate fi confecționat din conducte de diferite diametre și grosimi ale pereților, aceste mijloace de măsurare putând asigura măsurarea debitelor la orice presiune. Lipsa din interiorul traductorului primar al debitmetrului termic (fără contact) nu numai a elementului sensibil de măsurare ci și a oricărei izolații permite măsurarea debitelor la temperaturi mai ridicate decât în cazul măsurării cu debitmetre electromagnetice sau ultrasonice.

Pe baza criteriilor de sinteză și a soluțiilor de răspuns sintetizabile, ale căror combinații determină configurațiile constructive ale debitmetrelor, se pot diferenția următoarele clase de debitmetre [10]:

- Debitmetre directe:
 - debitmetre cu evacuare discontinuă;
 - debitmetre cu evacuare continuă.
- Debitmetre indirecte, cu secțiunea de măsurare constantă și piese în mișcare:
 - debitmetre cu morișcă(turbină);
 - debitmetre cu bilă rotitoare;
 - debitmetre cu imersor oscilant;
 - debitmetre cu imersor liber în tub curbiliniu;
 - debitmetre masice.
- Debitmetre indirecte, cu secțiunea de măsurare constantă și fără piese în mișcare:
 - debitmetre cu rezistență hidraulică;
 - debitmetre cu tub de presiune dinamică;
 - debitmetre "target";
 - debitmetre cu jet turbionat;
 - debitmetre electromagnetice;
 - debitmetre cu ionizare;
 - debitmetre termice;

- debitmetre ultrasonice;
 - debitmetre coriolis;
 - debitmetre optice;
 - debitmetre cu rezonanță magnetică nucleară;
 - debitmetre cu trasori.
- Debitmetre indirecte, cu secțiuni de măsurare variabilă:
- rotametre;
 - debitmetre cu clapă;
 - debitmetre pentru canale deschise.
- Debitmetre complexe:
- debitmetre cu traductoarele primare în ramificație;
 - debitmetre cu traductoare primare în by-pass.

Deoarece natura fluidelor, precum și condițiile de lucru sunt variate, mai des în industria chimică se utilizează aparate bazate pe principiul reducerii secțiunii de curgere, rotametrele, debitmetrele volumetrice, debitmetrele sonice, debitmetrele cu ionizare, debitmetrele termice [20].

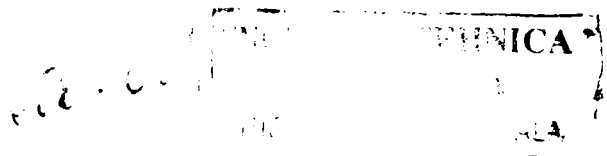
I.1.2. Debitmetre termice. Clasificarea debitmetrelor termice

Debitmetrele termice sunt specifice clasei de debitmetre care au ca obiect măsurarea debitului în conducte închise, și fac parte din grupa debitmetrelor indirecte, cu secțiunea de măsurare constantă și fără piese în mișcare.

Debitmetrele termice sunt mijloace de măsurare a debitului bazate pe capacitatea de transport a căldurii de către fluidul aflat în curgere. Principiul care stă la baza funcționării debitmetrelor termice este următorul: fluidul al cărui debit se măsoară este încălzit cu o sursă exterioară sau interioară de căldură, încălzirea determinând apariția unei diferențe de temperatură sesizată la cele două extremități ale tubului debitmetric (intrare și ieșire), diferență ce depinde de viteza de curgere a fluidului (debit) și de consumul de energie de la încălzitor [21 – 24]. Această diferență dintre temperatura fluidului la ieșirea din tubul debitmetric și temperatura de la intrare permite deducerea în mod direct a debitului masic [21]. Aceasta este una dintre particularitățile debitmetrelor termice [22]. Măsurarea debitului masic este esențială în multe procese industriale, la calculul bilanțurilor de materiale, la determinare cantitativă în diferitele operații de transfer, etc. [25]. Este de preferat în locul debitului volumic deoarece volumele de fluide depind de temperatura mediului și presiune, în timp ce masa nu este afectată de schimbările acestor parametrii [11].

Acest tip de debitmetre au caracteristica „debit – mărime tehnică”, astfel funcție de metoda de măsurare se utilizează debitmetrele termice cu caracteristica „debit – diferență de temperatură”, care asigură un aport constant de energie calorică și debitmetrele termice cu caracteristica „debit – putere de încălzire”, care asigură menținerea automată constantă a diferenței de temperatură.

În foarte multe cazuri, debitmetrele termice sunt singurele mijloace care pot fi utilizate la măsurarea debitelor foarte mici fluide, la măsurări în medii toxice, radioactive, în condiții extreme de temperatură și presiune [26]. Din acest motiv este utilă îmbunătățirea performanțelor tehnice, metrologice, economice și de siguranță ale acestui tip de debitmetre, prin optimizarea configurației celor existente sau prin proiectarea a noi debitmetre astfel încât să răspundă cerințelor actuale [27].



Debitmetrele termice se pot clasifica după următoarele criterii [10]:

1. Metoda de măsurare;
2. Caracterul transferului de căldură;
3. Modul de realizare al încălzirii;
4. Construcția traductorului;
5. Schema de culegere a semnalului și compensarea erorilor de mediu.

În ceea ce privește sistemul de măsurare, la debitmetrele termice există două posibilități de funcționare:

- în sistem deschis;
- în sistem închis.

În primul caz, bazat pe așa numita metodă a puterii de încălzire constante, semnalul de la elementul sensibil al traductorului trece direct la aparatul de măsură, iar în cel de al doilea caz (aceste aparate conțin sisteme auxiliare de urmărire) semnalul de la elementul sensibil ajunge prin intermediul unui circuit închis la încălzitor. Sistemul de urmărire menține un parametru, de obicei o diferență de temperatură, la o valoare constantă prin modificarea corespunzătoare a puterii de încălzire, valoarea acesteia fiind o măsură a debitului. Sistemele închise, cu compensare, se bazează pe metoda puterii variabile.

După caracterul transferului de căldură, debitmetrele termice se împart în trei grupe mari [10, 28, 29]:

- debitmetre cu strat limită termic;
- debitmetre calorimetrice;
- debitmetre termoanemometrice.

În cazul debitmetrelor cu strat limită termic, căldura de la încălzitor nu se transmite întregii mase de fluid ci numai unui strat pelicular, care ia naștere pe suprafața interioară a tubului traductorului [24, 30, 31].

Spre deosebire de debitmetrele cu strat limită termic, în cazul debitmetrelor calorimetrice căldura se transmite întregii mase de fluid a cărui debit se măsoară [10]. Ținând cont de acest aspect, debitmetrele calorimetrice se împart în [10, 28]:

- debitmetre calorimetrice cu contact, caz în care încălzitorul și elementul sensibil se află în mediul a cărui debit se măsoară (la conducte cu diametru mare);
- debitmetre calorimetrice fără contact, caz în care încălzitorul și elementul sensibil se află în exteriorul mediului a cărui debit se măsoară (la conducte cu diametru mic).

Specificul celei de a treia grupe, a debitmetrelor termoanemometrice, constă în faptul că în funcție de debit se modifică conținutul termic al unui corp (sudură bimetalică sau semiconductor) așezat direct în curentul a cărui debit se măsoară [32].

În funcție de modul în care se realizează încălzirea aparatului există:

- debitmetre cu încălzire electrică (debitmetre electrotermice);
- debitmetre cu încălzire neelectrică.

După construcția traductorului se întâlnesc [10]:

- debitmetre cu traductor rectiliniu;
- debitmetre cu traductor tip buclă;
- debitmetre cu traductor tip raster.

I.1.3. Caracteristici constructive generale ale debitmetrelor termice

Din punct de vedere constructiv debitmetrele termice se caracterizează prin simplitatea elementului sensibil, precum și prin siguranță de exploatare. Acestea prezintă disponibilitate și fiabilitate bune pe întreaga durată de funcționare [33].

Elementul receptor al debitmetrelor termice poate fi confecționat din tuburi de diferite diametre și diferite grosimi ale pereților, fără nici un fel de delimitări în această direcție, ceea ce înseamnă că aceste debitmetre pot asigura măsurarea debitelor în practică în orice condiții de presiune [22, 34].

În ceea ce privește domeniul de temperaturi, lipsa din interiorul debitmetrului termic fără contact nu numai a elementului sensibil ci și a oricărei izolații, permite măsurarea debitelor la temperaturi mai ridicate decât debitmetrele electromagnetice și cele ultrasonice [35, 36].

Debitmetrele termice prezintă și avantajul unor gabarite reduse în comparație cu alte aparate de măsurare a debitului.

Debitmetrele termice cu contact și în special cele termoanemometrice prezintă o rezistență mică la funcționare și din acest motiv acestea nu se utilizează la măsurarea debitelor în industrie. Avantajul principal al acestora este comportarea dinamică foarte bună, motiv pentru care se pot utiliza în cercetarea științifică din diferite domenii speciale și eventual la etalonarea altor debitmetre.

Dezavantajul debitmetrelor termice fără contact îl constituie inerția de măsurare ridicată. Una dintre posibilitățile reducerii constantei de timp este introducerea energiei în curentul de fluid prin sisteme fără inerție și înregistrarea modificărilor de temperatură în funcție de debit. Cercetarea machetelor debitmetrelor cu încălzire cu radiații infraroșii sau microunde arată îmbunătățirea vitezei de răspuns a debitmetrelor de tip calorimetric [10].

Eroarea statică a debitmetrelor termice este comparabilă cu a altor tipuri de debitmetre, dar în ceea ce privește comportarea dinamică, caracterizată prin constante de timp destul de mari, nu se poate afirma același lucru. Cu toate acestea, constantele lor de timp sunt comparabile cu constantele de timp ale altor traductoare folosite în laboratoarele de cercetare și industrie, cum ar fi termocuplele, termorezistențele, gaz-analizele, etc.. Mai mult decât atât, în unele cazuri cum ar fi măsurarea valorii medii a debitului unui curent pulsator, inerția lor ridicată este o proprietate pozitivă.

Domeniile de utilizare ale debitmetrelor termice sunt variate, ele putând fi utilizate și la măsurarea debitelor în condiții specifice care intervin în laboratoarele de cercetare, precum și în industria chimică. Astfel, ținând cont de caracteristicile constructive, debitmetrele termice pot măsura [10, 26, 31, 37]:

- debite mici și medii de lichid și gaz la diferite temperaturi și presiuni;
- debite obișnuite de lichid și gaz în conducte din instalațiile tehnologice;
- debite de lichide și gaze cu proprietăți speciale, cum ar fi cele care prezintă radioactivitate, toxicitate, agresivitate, în condițiile în care este necesară o izolație ridicată și completă a debitmetrului față de utilizator;
- debitul metalelor lichide (Hg, Bi, Na, etc.) la temperaturi până la 800 °C;
- debitul unor soluții la temperaturi ridicate (unt, smoală, fosfor, etc.);
- debitul unor soluții la temperaturi scăzute;
- debitul unor amestecuri de soluții și substanțe solide (pulpe, slamuri), soluții și gaze, gaze și particole, etc.;
- debitul mediu al curenților pulsatori.

Având în vedere domeniile largi de utilizare ale debitmetrelor termice, precum și performanțele impuse măsurării, soluțiile constructive trebuie să urmărească optimizarea parametrilor constructivi și funcționali ai acestui tip de debitmetre funcție de precizia și condițiile de exploatare. Totodată, materialul din care este confecționat tubul debitmetric trebuie să fie rezistent la acțiunea mediului supus măsurării și să asigure rezistență mecanică la temperatura și presiunea fluidului măsurat.

Alegerea tipului de debitmetru termic necesită rezolvarea următoarelor cerințe [10]:

- cunoașterea parametrilor inițiali: interval de măsurare, interval de temperaturi ale mediului măsurat, parametrii termofizici, proprietăți chimice ale fluidului;
- stabilirea parametrilor constructivi ai traductorului: materialul conductelor, diametrele interior și exterior, lungimea încălzitorului, tipul recipientilor termici, caracteristicile izolației termice, etc.;
- alegerea funcțiunilor debitmetrului.

I.1.4. Ecuația de bază a debitmetrelor termice

În elementele receptoare ale debitmetrelor termice de orice tip au loc procese complexe de transfer termic între încălzitor și curentul de fluid al cărui debit se măsoară.

Neținând cont de principiile de funcționare diferite a debitmetrelor cu strat limită termic, calorimetrice și termoanemometrice, se pot scrie pentru acestea, formulele de dependență între parametrii de bază.

Fluxul termic care trece de la peretele tubului la fluidul din tub este descris de ecuația Newton-Riehmann, relația (I.7) [30, 31].

$$N = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \quad (I.7)$$

unde:

N – fluxul termic, [W];

α – coeficient parțial de transfer de căldură de la perete la lichid, [W/(m²·grd)];

S – suprafața de transfer de căldură, [m²];

Δt – diferența dintre temperatura peretelui interior al tubului și temperatura lichidului, [°C].

De obicei nu se măsoară diferența de temperatură dintre suprafața de transfer și fluid, ci o altă mărime $\Delta t'$, proporțională cu aceasta [1]. În cazul debitmetrelor termice, $\Delta t'$ reprezintă diferența de temperatură înainte și după elementul de încălzire. Din acest motiv, în ecuația Newton-Riehmann se introduce un coeficient k_1 , iar relația (I.7) devine relația (I.8) [31].

$$N = k_1 \cdot \alpha \cdot S \cdot \Delta t' \quad (I.8)$$

La aparatele la care încălzirea se realizează pe cale electrică, fluxul termic este proporțional cu puterea electrică disipată în bobina de încălzire.

În relația (I.8), doar α este dependent de regimul de curgere, deci de debit. Această dependență este cuprinsă în relația criterială sub forma ei generalizată [31, 38].

$$\text{Nu} = S \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^b \cdot \text{Gr}^c \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_p} \right)^d \quad (\text{I.9})$$

Relația (I.9) conține criteriul de similitudine Prandtl (Pr), atât la temperatura medie a fluidului cât și la temperatura peretelui în contact cu lichidul. Acest criteriu este un raport adimensional ce conține numai parametri fizici ce caracterizează proprietățile fluidului, după cum reiese din expresia lui [39]:

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \eta}{\lambda} \quad (\text{I.10})$$

unde:

C_p – căldura specifică a fluidului, [J/(kg·grd)];
 η – vâscozitatea dinamică a fluidului, [kg/(m·s)];
 λ – coeficientul de conductibilitate termică a fluidului, [W/(m·grd)].

Criteriul Grashof (Gr) caracterizează raportul dintre forțele datorate frecării moleculare și forțele ascensionale care rezultă din densitatea diferită în diversele zone ale fluidului, datorită neizotermicității lui [39].

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot d^3 \cdot \rho^2}{\eta^2} \cdot \beta \cdot \Delta t \quad (\text{I.11})$$

unde:

g – accelerația gravitațională, [m/s²];
 d – diametrul tubului, [m];
 ρ – densitatea fluidului, [kg/m³];
 β – coeficient de dilatare volumetrică a fluidului.

După cum se vede, dependența căutată se găsește doar în cele două criterii care au mai rămas. Criteriul Reynolds este dat de relația:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (\text{I.12})$$

unde: w – viteza de curgere a fluidului, [m/s].

Intensitatea schimbului de căldură între fluid și perete este caracterizată de criteriul Nusselt, în cazul convecției [39]:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (\text{I.13})$$

Ca urmare a faptului că numai în criteriul Reynolds intervine w , relația (I.9) se poate scrie și sub forma:

$$\text{Nu} = C_1 \cdot \text{Re}^n \quad (\text{I.14})$$

sau:

$$\frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = C_1 \cdot \left(\frac{w \cdot d \cdot \rho}{\eta} \right)^n \quad (\text{I.15})$$

Relația (I.15) stabilește dependența lui α de viteză și implicit de debitul fluidului, adică de regimul de curgere al fluidului. Coeficientul C_1 conține toate mărimile care aparțin criteriilor Pr și Gr , și care în condițiile date sunt constante.

Prelucrând expresia (I.15) se obține:

$$\alpha = C_1 \cdot \frac{\lambda \cdot d^{n-1}}{\eta^n} \cdot \rho^n \cdot w^n = C_1 \cdot \lambda \cdot d^{-(n+1)} \cdot \left(\frac{4}{\pi \cdot \eta}\right)^n \cdot q_m^n \quad (I.16)$$

unde: q_m – debitul masic de fluid, [kg/s].

Introducând relația (I.16) în expresia (I.8) și reunind toate mărimile constante într-un singur coeficient C_2 , se obține ecuația generală de funcționare a debitmetrelor termice [30, 31]:

$$N = C_2 \cdot \Delta t' \cdot q_m^n \quad (I.17)$$

Ecuația generală poate fi particularizată în raport cu fiecare tip de debitmetru termic. Astfel, pentru debitmetrele termice calorimetrice, cu încălzirea întregii mase de fluid, în lipsa unor pierderi de căldură și în condițiile unor parametrii termici constanți, ecuația de funcționare se obține din bilanțul termic [21, 40]:

$$N = C_p \cdot \Delta t' \cdot q_m \quad (I.18)$$

În care $\Delta t'$ este diferența de temperatură înainte și după elementul de încălzire, iar C_p reprezintă căldura specifică a fluidului.

Comparând relația (I.18) cu ecuația (I.17) se constată că în cea din urmă, exponentul n a primit valoarea 1, iar constanta C_2 a primit un sens fizic precis. Faptul că n are valoarea 1 indică lipsa dependenței de caracterul curgerii a funcționării acestor debitmetre.

În schimb, pentru debitmetrele termice cu strat limită termic, valoarea lui n va fi diferită de 1 în funcție de caracterul curgerii [30, 41, 42]: pentru curgere turbulentă ($Re > 10000$) $n=0,8$, iar pentru curgere laminară ($Re < 2300$) $n=1/3$.

I.1.5. Debitmetrul cu strat limită termic

Principiul de funcționare al debitmetrelor cu strat limită termic se bazează pe existența unei dependențe directe între fluxul termic care trece prin peretele tubului pentru o anumită diferență de temperatură și viteza curentului de fluid ce trece prin tub [24, 31, 43].

În cazul acestor debitmetre încălzirea fluidului din tub se limitează numai la o peliculă de fluid de o anumită grosime din imediata vecinătate a peretelui tubului, peliculă considerată strat limită termic [10, 13, 31]. Temperatura acestuia poate fi considerată egală cu cea a peretelui interior al tubului debitmetric [44].

Stratul limită prezintă o importanță deosebită în procesele de transfer de căldură și de masă, grosimea lui reprezentând o rezistență la trecerea căldurii și a masei. Stratul limită, respectiv grosimea lui este influențată de regimul hidrodinamic al fluidului. Aici viteza de curgere a fluidului are o valoare mai mică cu 99% față de valoarea vitezei medii [13, 15, 45].

În figura I.2 este redată schema de principiu a unui debitmetru cu strat limită termic. Aparatul este format dintr-un tub metalic prin care circulă lichidul al cărui debit se măsoară. În partea superioară a tubului debitmetric, peste termorezistența R_2 , este bobinată rezistența de încălzire R_1 alimentată de la o sursă stabilizată U_i . În regim staționar, puntea Wheatstone, alcătuită din termorezistențele

R_1 și R_2 și rezistențele R_3 și R_4 se află la echilibru. La trecerea unui debit de fluid q_m care a preluat fluxul termic N dispersat de rezistența de încălzire R_i , puntea se dezechilibrează. Gradul de deformare al câmpului de temperatură se detectează cu ajutorul celor două termorezistențe bobinate pe tubul debitmetric (R_1 și R_2). Întrucât încălzirea se face pe cale electrică, fluxul termic N este proporțional cu puterea electrică P_i , disipată de rezistența de încălzire R_i [3, 31].

Debitmetrul cu strat limită termic, redat în figura I.2 funcționează după relația (I.17) în care valoarea lui n diferă funcție de caracterul curgerii fluidului.

Debitmetrul prezentat are rezistențele de măsurare așezate nesimetric în raport cu încălzitorul.

Câmpul de temperatură al suprafeței exterioare a elementului receptor depinde atât de intensitatea transferului de căldură, cât și de puterea de încălzire. După gradul de deformare al acestui câmp se poate aprecia mărimea debitului.

Din cauza deplasării fluidului dincolo de centrul încălzitorului temperatura scade mai lent, păstrându-se însă tot timpul mai mare decât temperatura fluidului la intrare. Diferența de temperatură maximă dintre temperatura peretelui și cea a fluidului la intrare se observă în dreptul încălzitorului și în imediata lui vecinătate [43].

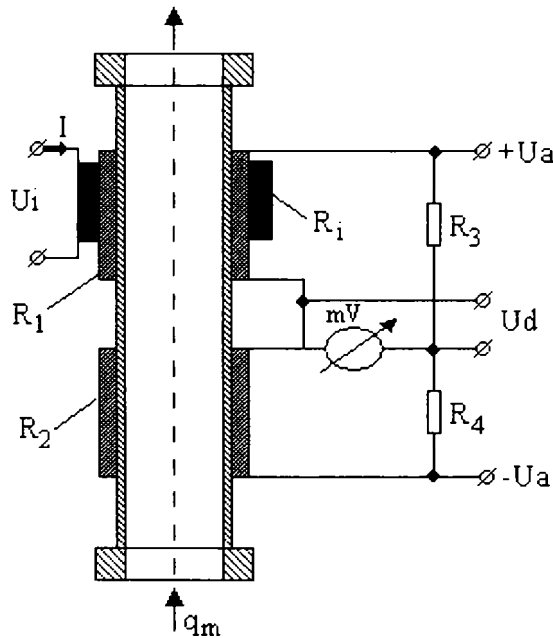


Figura I.2. Schema de principiu a debitmetrului cu strat limită termic

S-a constatat că micșorarea zonei de încălzire provoacă o concentrare a fluxului termic în perete și de aceea temperatura acestuia crește mult. Analiza rezultatelor teoretice și experimentale referitoare la particularitățile câmpului de temperatură au arătat că temperatura peretelui depinde de parametrii curentului de fluid. Aceasta crește cu creșterea puterii încălzitorului și se micșorează cu creșterea coeficientului de transfer de căldură, coeficientului de conductivitate termică a peretelui, diametru tubului, debitul masic [43].

Legătura funcțională și cantitativă între temperatura peretelui și ceilalți parametri nu poate fi riguros determinată. În mod obișnuit această legătură se determină aproximativ cu ecuațiile criteriale ale transferului de căldură.

În studiul analitic al influenței diverșilor parametri asupra temperaturii stratului limită este necesară cunoașterea criteriilor de similitudine ce caracterizează transferul termic și regimul curgerii.

Dacă valorile Re și Pr se pot afla ușor din condițiile inițiale pentru o anumită temperatură, în schimb determinarea criteriului Nu prin metoda generală este practic imposibilă deoarece zonele termice create de încălzitor sunt foarte mici și greu de studiat.

Pentru transferul termic pe distanțe foarte mici, deci pentru diferențe de temperaturi mici, se poate calcula un criteriu Nu convențional cu relația (I.19) pentru regimul de curgere laminar și cu ajutorul relației (I.20) pentru regimul turbulent.

$$Nu \cdot m = C_1' \cdot Pe^{1/3} \quad (I.19)$$

$$Nu \cdot m = C_2' \cdot (Re^{2/3} + m) \cdot Pr^{1/3} \quad (I.20)$$

în care:

m, C_1, C_2 - constante;
 Pe - criteriul Peclet.

Constantele m, C_1', C_2' se extrag din nomogramele date în figurile I.3 și I.4, obținute experimental [28].

La proiectarea debitmetrelor cu strat limită termic ca material de bază se folosește graficul câmpului de temperatură pentru diferite debite și diferite puteri de încălzire.

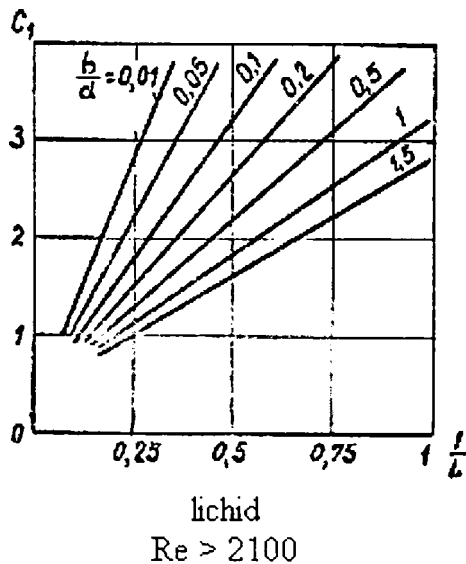


Figura I.3. Nomogramă pentru determinarea constantei C_1'

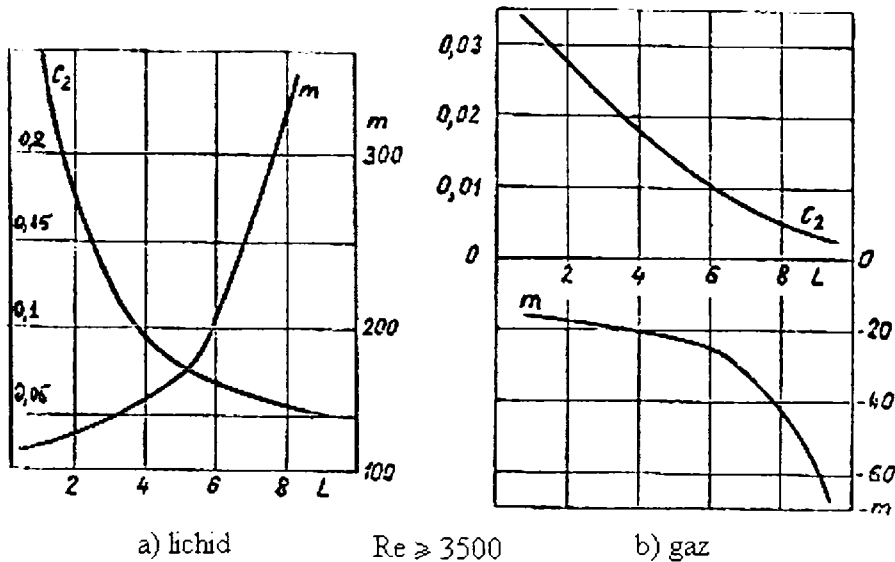


Figura I.4. Nomogramă pentru determinarea constantelor m și C_2'

I.1.5.1. Variante și scheme de funcționare ale debitmetrului cu strat limită termic

Debitmetrele cu strat limită termic pot fi realizate principial în două variante de funcționare [1, 24, 46]:

- cu menținerea constantă a diferenței de temperatură;
- cu menținerea constantă a puterii de încălzire.

În cazul debitmetrelor cu strat limită termic în varianta de funcționare cu menținerea constantă a diferenței de temperatură, puterea de încălzire este variabilă. Ecuația (I.17) devine [31, 47]:

$$N = C_2 \cdot q_m^n \quad (I.21)$$

În acest caz se poate afirma că fluxul termic N și implicit puterea de încălzire P_i este proporțională cu debitul masic q_m la o putere dependentă de regimul de curgere.

Practic, după această variantă de funcționare lucrează debitmetrul cu strat limită termic prezentat în figura I.5 [10].

Termorezistențele R_1 și R_2 sunt montate în punte cu alte două rezistențe, R_3 și R_4 . Pentru a fixa și a menține o diferență de temperatură constantă pe parcursul măsurătorilor se ajustează puntea la o anumită tensiune de dezechilibru U_d cu ajutorul rezistenței variabile R_v . Această ajustare se face cu rezistența de încălzire R_i deconectată. Montajul este alimentat în curent continuu.

La debitmetrul cu strat limită termic prezentat în figura I.5, în timpul funcționării se modifică manual puterea de încălzire până când $U_d = 0$.

În figura I.6 este redat un debitmetru la care diferența de temperatură se menține constantă prin modificarea puterii de încălzire cu ajutorul unui sistem închis [10].

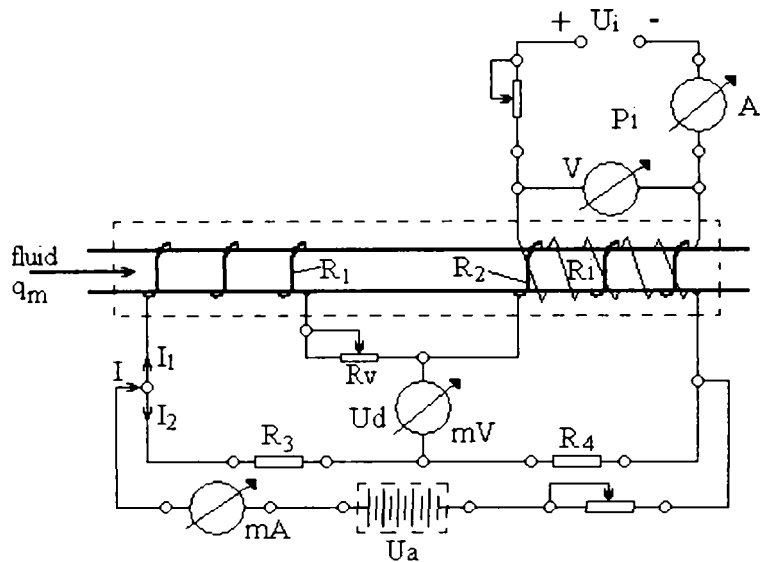


Figura I.5. Variantă constructivă a debitmetrului cu strat limită termic cu funcționare cu putere de încălzire variabilă

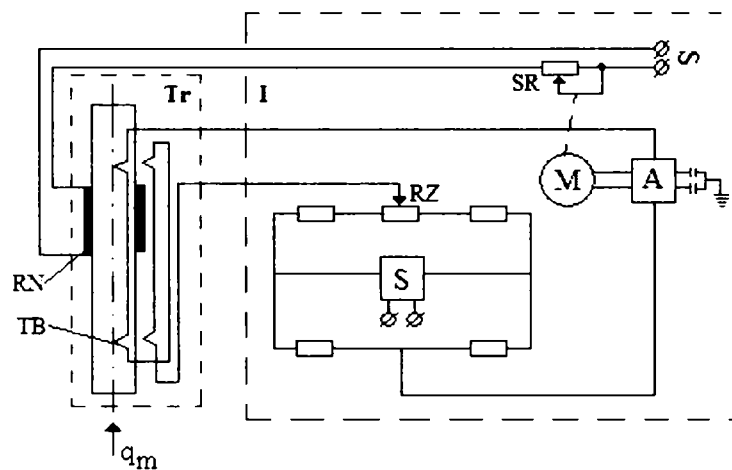


Figura I.6. Variantă constructivă a debitmetrului cu strat limită termic cu funcționare cu putere de încălzire variabilă (modificarea puterii de încălzire cu ajutorul unui sistem închis)

Tensiunea termoelectromotoare a termobateriei TB se compară cu o tensiune corespunzătoare unei anumite diferențe de temperatură cu ajutorul reostatului RZ. La modificarea diferenței de temperatură apare o tensiune de dezechilibru în punte care va pune în mișcare potențiometrul SR din circuitul încălzitorului RN până la readucerea diferenței de temperatură la valoarea dorită.

Eroarea suplimentară a aparatului apărută datorită modificării temperaturii curentului de fluid poate fi compensată cu ajutorul unui termometru cu rezistență de compensare montat în unul din brațele punții.

Încălzitorul de obicei este confecționat dintr-un aliaj Cr-Ni cu lungimi ce variază între 40 – 50 mm, iar tubul debitmetrului are diametrul de 30 – 40 mm.

În calitate de elemente receptoare se pot folosi termometre cu rezistență obișnuită cu lungimea înfășurării de 25 mm. La o diferență de temperatură de 2°C puterea de încălzire în general nu depășește 45 W.

Sistemul de urmărire modifică puterea de încălzire, care este o măsură a debitului, puterea de încălzire putându-se măsura la un wattmetru care poate fi etalonat direct în unități de debit.

Există o serie de debitmetre la care în locul încălzirii electrice se folosește încălzire inductivă prin curenți de înaltă frecvență, dar acestea sunt foarte rar utilizate.

În cazul debitmetrelor cu strat limită termic în varianta de funcționare cu menținerea constantă a puterii de încălzire, tensiunea de dezechilibru U_d , respectiv diferența de temperatură $\Delta t'$, devine o măsură a debitului masic q_m . În acest caz relația (I.17) devine relația (I.22) [1, 3].

$$\Delta t' = \frac{C_2}{q_m^n} \quad (\text{I.22})$$

Această variantă de funcționare se aplică la utilizarea debitmetrelor cu strat limită termic în calitate de traductoare de măsură la reglarea automată a debitului, caz în care aparatul cumulează și funcția unui element de comparație.

În acest scop, în principiu se procedează astfel: cu încălzirea deconectată se fixează o anumită tensiune de dezechilibru în punte, iar apoi având la dispoziție curbe de etalonare $N = f(q_m)$ se fixează o anumită putere de încălzire corespunzătoare debitului dorit (valoarea prescrisă). La trecerea fluidului tensiunea de dezechilibru se anulează când debitul coincide cu valoarea lui prescrisă. Dacă debitul nu coincide cu valoarea prescrisă va apărea o tensiune de dezechilibru care prin polaritatea ei indică în ce direcție a deviat debitul de la valoarea prescrisă (sau prin faza ei dacă puntea este alimentată în curent alternativ).

Tensiunea de dezechilibru, prelucrată în cadrul unui amplificator operațional adecvat, poate comanda un element de execuție care readuce debitul la valoarea prescrisă.

În figura I.7 [10] este redat un montaj cu sistem de măsurare deschis pentru varianta de funcționare a debitmetrului cu strat limită termic cu puterea de încălzire menținută constantă.

Alimentarea încălzitorului RN și a traductorului Tr se realizează cu o sursă de alimentare stabilizată S. Pentru a evita supraîncălzirile se prevede contactul KB comandat cu ajutorul aparatului de măsurare I. Pentru amplificarea semnalului proporțional cu diferența de temperatură se folosește bateria termică diferențială BT cu 30 de cuple. Rezistența R_f și capacitățile C_{f1} și C_{f2} constituie filtre electrice. Amplificatorul electronic A comandă motorul reversibil Mr care pune în mișcare atât cursorul CR cât și contactul KB și sistemul de indicare. Cadranul aparatului de măsurare poate fi etalonat direct în unități de debit.

S-a constatat că în regim tranzitoriu ($Re = 2000 - 4000$) utilizarea debitmetrelor în această variantă constructivă este redusă din cauza instabilității caracterului curgerii fluidului care duce la apariția unor zone de histeresis la curbele hiperbolice ce reprezintă dependența diferenței de temperatură față de debitul de fluid.

În figura I.8 este reprezentat un montaj cu ajutorul căruia se pot realiza ambele variante de funcționare ale debitmetrului cu strat limită termic [10].

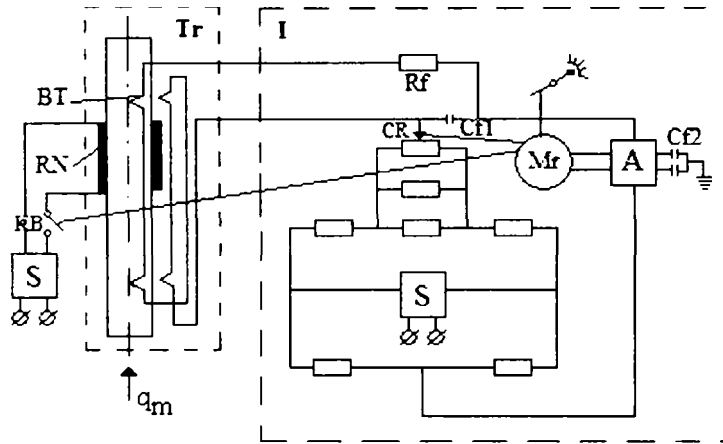


Figura I.7. Variantă constructivă a debitmetrului cu strat limită termic cu funcționare cu puterea de încălzire constantă

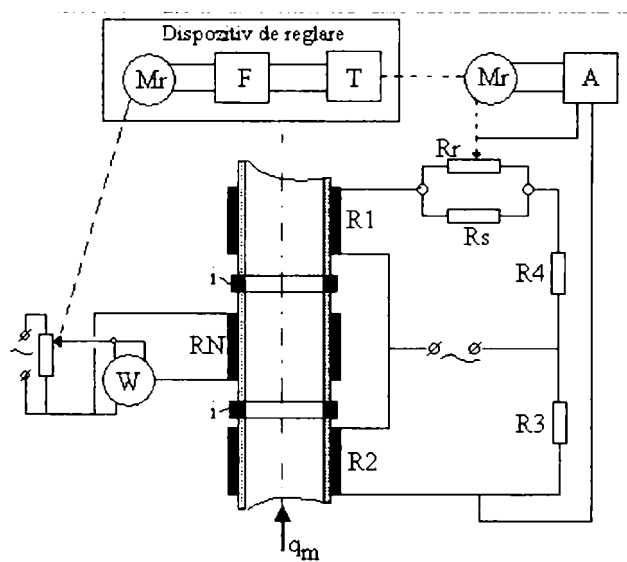


Figura I.8. Variantă constructivă a debitmetrului cu strat limită termic cu posibilitatea de funcționare în ambele variante funcționale

În cadrul montajului prezentat (figura I.8), temperatura fluidului ce traversează tubul debitmetrului se măsoară cu ajutorul termorezistențelor R_1 și R_2 , termorezistențe așezate simetric de o parte și de alta a încălzitorului și montate într-o punte. Puntea este alcătuită din termorezistențele R_1 și R_2 , din rezistențele R_3 și R_4 , șuntul R_S , reostatul R_r , amplificatorul A și motorul reversibil Mr. Între termorezistențe și încălzitor se află inelele termoizolante i . Termorezistența R_1 așezată înaintea încălzitorului măsoară temperatura peretelui (stratului limită), iar termorezistența R_2 așezată după RN măsoară temperatura în zona încălzită.

În cazul funcționării cu putere de încălzire constantă, odată cu variația diferenței de temperatură, puntea se va echilibra în mod continuu. Motorul Mr este

cel care are rolul de a echilibra continuu puntea. În cazul în care se alege varianta de funcționare a debitmetrului cu strat limită termic cu putere de încălzire variabilă, motorul acționează asupra traductorului T din cadrul dispozitivului de reglare electrică tot în vederea echilibrării punții, dar prin modificarea produsului dintre tensiune și curent.

Varianta de funcționare cu putere de încălzire variabilă, adică cu menținerea constantă a tensiunii de dezechilibru, este mai avantajoasă. În cazul variantei cu putere de încălzire constantă intervine gradul de complexitate al dependenței debitului de diferența de temperatură și faptul că la debite mici de fluid, acesta se încălzește în mod vizibil, lucru ce duce la rezultate eronate. În schimb varianta de funcționare cu putere variabilă prezintă avantajul că asigură un interval mai mare de măsură, iar aparatele au o inerție mică.

Funcționarea montajului prezentat în figura I.8 după varianta cu putere de încălzire variabilă se deduce ușor. Astfel, cu încălzirea deconectată se echilibrează puntea, iar traductorul T al regulatorului se fixează pentru o anumită diferență de temperatură. După pornirea încălzirii puntea se va menține în echilibru atâta timp cât viteza de curgere a fluidului rămâne constantă. Dacă aceasta se modifică apare o perturbație al carei semn corespunde măririi sau micșorării debitului. Traductorul va declanșa acțiunea dispozitivului de defazare F și a motorului Mr, care vor modifica puterea de încălzire. Watmetrul W este gradat direct în unități de debit.

I.1.6. Debitmetre calorimetrice

Funcționarea debitmetrelor calorimetrice se bazează pe dependența univocă stabilită între fluxul termic necesar încălzirii fluidului din tubul traductorului la o anumită diferență de temperatură și debitul masic de fluid [10, 48, 49, 50]. Aceste debitmetre măsoară aportul de energie termică necesară încălzirii întregii mase de fluid din tubul debitmetric și ca atare ecuația ce caracterizează funcționarea lor este de tipul relației (I.7) [10, 51, 52].

În cazul debitmetrelor calorimetrice, la fel ca și la debitmetrele cu strat limită termic, se întâlnesc două scheme principiale de măsurare. Astfel, debitul se poate determina prin măsurarea puterii de încălzire necesare pentru menținerea unei diferențe de temperatură constantă, caz în care caracteristica de funcționare este liniară, iar cea de a doua variantă de funcționare presupune determinarea debitului prin măsurarea diferenței de temperatură pentru o putere de încălzire constantă, caz în care caracteristicile de funcționare sunt neliniare [10]. Din punct de vedere practic a doua variantă de funcționare nu ridică probleme deosebite, în schimb pentru primul caz este necesară intervenția operatorului uman în scopul menținerii constante a diferenței de temperatură sau utilizarea unor dispozitive de automatizare suplimentare.

Constructiv debitmetrele calorimetrice se aseamănă cu debitmetrele cu strat limită termic, debitmetrul calorimetric fiind alcătuit dintr-un traductor, acesta de obicei fiind un tub prin care circulă fluidul al cărui debit se măsoară, pe care sau în care se află încălzitorul și elementul sensibil.

După locul în care este montat încălzitorul există:

- debitmetre calorimetrice cu contact, caz în care încălzitorul vine în contact direct cu fluidul al cărui debit se măsoară;
- debitmetre calorimetrice fără contact, caz în care încălzitorul se află pe suprafața exterioară a traductorului.

I.1.6.1. Debitmetrul calorimetric cu contact cu fluidul măsurat

Debitmetrele calorimetrice cu contact se caracterizează prin inerție mică, eroare mică, dar și prin rezistență mecanică scăzută. De obicei acest tip de debitmetre se utilizează în cadrul instalațiilor de cercetare, de laborator sau pilot la măsurarea debitelor de gaze [53, 54].

Unul dintre primele debitmetre cu contact este aparatul Thomas. Elementul de încălzire 2 (figura I.9-a) este alcătuit sub forma a două conuri unite la bază. La intrare și ieșire se află termometrele cu rezistență 1 și 3 sub forma unor site de sârmă care acoperă întreaga secțiune interioară a tubului, motiv pentru care ele măsoară practic temperatura medie în secțiune. Termorezistențele 1 și 3 sunt incluse în brațele vecine ale unei punți echilibrate, echilibrare care se realizează prin modificarea puterii de încălzire. Mărima puterii de încălzire este o măsură a debitului.

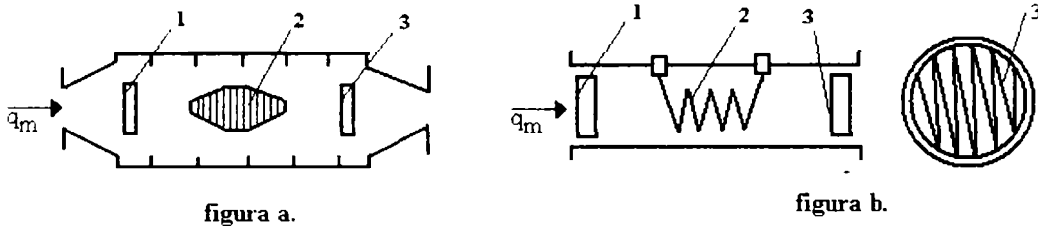


Figura I.9. Scheme constructive a debitmetrelor calorimetrice cu contact

Un alt tip de debitmetru cu contact este redat în figura I.9-b. Acest debitmetru are diametrul de 300 mm și măsoară debite de aer până la 6500 m³/h. Încălzitorul 2 este confecționat din sârmă de Cr-Ni cu diametrul de 4 mm, în formă de spirală. Pentru această variantă constructivă mărimea diferenței de temperatură este o măsură debitului. S-au realizat de asemenea și microdebitmetre calorimetrice la care în calitate de încălzitor se folosesc fire metalice subțiri, iar la măsurarea temperaturii, termocupluri miniaturale.

I.1.6.2. Debitmetrul calorimetric fără contact cu fluidul măsurat

Principiul de funcționare al debitmetrelor calorimetrice fără contact cu încălzitor separat de elementul sensibil este identic cu cel al debitmetrelor cu strat limită termic de același tip, cu deosebirea că în cazul primelor are loc încălzirea întregii mase de lichid care trece prin aparat.

În figura I.10 este prezentată schema unui debitmetru utilizat la măsurarea debitelor foarte mici de gaze și lichide (mm³/h) în regimul de funcționare cu putere de încălzire menținută constantă [10].

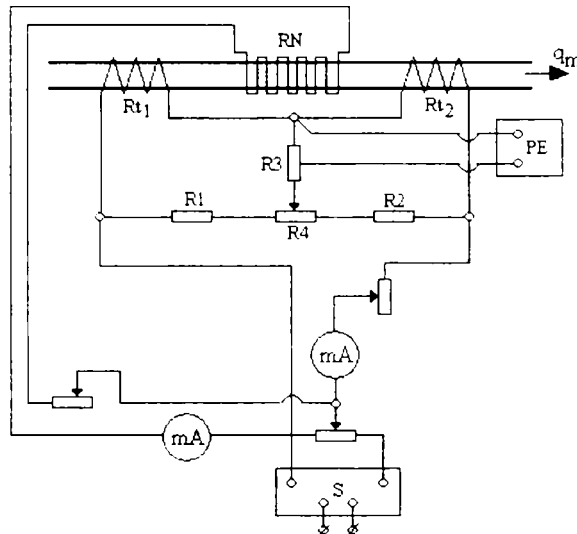


Figura I.10. Schemă constructivă a debitmetrului calorimetric fără contact

La mijlocul tubului traductorului pe suprafața exterioară este înfășurat încălzitorul RN confecționat din sârmă de manganină având diametrul de 0,2 mm. Rezistența încălzitorului este de 10 ohmi, iar tensiunea de alimentare este de 24 V. Temperatura înainte și după încălzitor se măsoară cu rezistențele R_{t1} și R_{t2} , confecționate din sârmă de cupru cu diametrul de 0,06 mm. Aceste termorezistențe sunt montate în două brațe a unei scheme în punte, iar în celelalte două brațe ale punții se găsesc rezistențele R1 și R2 confecționate din sârmă de manganină. În absența curentului de fluid din tub puntea se dezechilibrează. Pentru reechilibrarea punții se folosește reostatul R4. Dacă prin tub trece curentul de fluid, puntea se dezechilibrează, iar curentul de dezechilibru va produce pe rezistența R3 o cădere de tensiune parte din care se va aplica la intrarea potențiometrului electronic PE. Această tensiune va fi o măsură a debitului.

Creșterea curentului încălzitorului duce la lărgirea limitelor de măsurare și la creșterea sensibilității aparatului. Numărul straturilor de înfășurare a încălzitorului mărește constanta de timp a debitmetrului (1 strat – 16 secunde, 3 straturi – 20 secunde).

La stabilirea domeniului de măsurare trebuie avut în vedere dependența univocă dintre debit și căderea de temperatură [55]. Maximele curbelor de etalonare sunt condiționate de influența termoconductivității mediului, de propagarea căldurii prin pereții tubului și de viteza curentului de fluid, compoziția lui, materialul tubului și de parametrii constructivi ai acestuia.

Debitmetrele calorimetrice fără contact se pot folosi și la măsurarea debitelor unor metale lichide [10, 56].

În figura I.11 este redat schematic un asemenea debitmetru calorimetric [10].

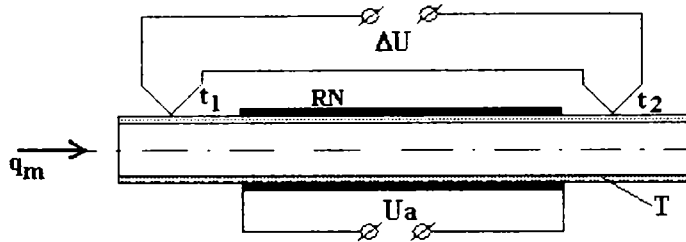


Figura I.11. Schema debitmetrului calorimetric fără contact utilizat la măsurarea debitelor unor metale lichide

Elementul receptor este alcătuit din tubul T pe care este montat încălzitorul RN și în calitate de element sensibil pentru diferența de temperatură se utilizează termocuplurile t_1 și t_2 . În calitate de izolator electric între tub, încălzitor și termocupluri se folosește email de titan, iar ca izolator termic al întregului traductor față de mediul ambiant se pot utiliza și ecrane reflectante de aluminiu.

Acest debitmetru poate funcționa în una din cele două variante: cu menținerea constantă a puterii de încălzire sau cu menținerea constantă a diferenței de temperatură.

În general, pentru determinarea caracteristicilor constructive și funcționale ale debitmetrelor calorimetrice se apelează la determinarea câmpului de temperatură, respectiv la rezolvarea unor ecuații ce descriu fenomenele termice din aparat. Gabaritele elementelor receptoare sunt limitate foarte adesea de condițiile tehnologice concrete. De obicei, din această cauză, principalul parametru care se calculează la aceste debitmetre termice este lungimea minimă a încălzitorului, pentru care se mai pot utiliza formulele de calcul considerate și totodată aparatul își păstrează o sensibilitate acceptabilă.

I.1.7. Formulele transferului de căldură la curgerea fluidelor în tuburi cu secțiune circulară

Formulele de bază ce caracterizează transferul de căldură la curgerea soluțiilor, gazelor și a metalelor lichide în tuburi cu secțiune circulară dau posibilitatea determinării ordinului de mărime al parametrilor constructivi ai debitmetrelor termice, precum și influența diferiților factori exteriori asupra comportării dinamice și statice a acestor aparate.

Astfel, la curgere laminară, când lipsește influența convecției naturale se recomandă relația (I.23) [39, 44].

$$Nu = 0,15 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_1 \quad (I.24)$$

unde:

Gr – criteriul Grashof;

ε_1 – coeficient de corecție care se alege din tabele funcție de raportul x/l (l – lungimea conductei).

În cadrul relației (I.24) drept mărimi definite se consideră diametrul interior al tubului și temperatura medie a lichidului [39].

Tabel I.1. Valorile coeficientului de corecție ε_1 pentru regim laminar în funcție de raportul x/l [39].

x/l	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_1	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

În cazul curgerii turbulente, pentru calculul coeficientului mediu de transfer de căldură se recomandă relația (I.25) [39, 58].

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_p} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_1 \quad (I.25)$$

În relația (I.25) mărimile definite sunt temperatura medie a fluidului, diametrul interior al tubului și criteriul Pr_p corespunzător temperaturii medii a suprafeței peretelui și coeficientul de corecție ε_1 care se alege din tabele.

În tabelul I.2 sunt prezentate valorile coeficientului de corecție ε_1 care arată influența raportului dintre lungimea conductei l și diametrul acesteia d asupra coeficientului parțial de transmitere a căldurii.

Tabel I.2. Valorile coeficientului de corecție ε_1 pentru regim turbulent în funcție de raportul l/d [39]

Re	Raportul l/d								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,5	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1

Pentru calculul coeficienților locali de transfer de căldură, în cazul curgerii turbulente la gaze se folosește de obicei relația (I.26) [39, 41].

$$Nu = 0,029 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_1 \quad (I.26)$$

Pentru soluționarea ecuației (I.26) trebuie să se cunoască temperatura medie în secțiune și diametrul interior al tubului. Coeficientul de corecție ε_1 se calculează în acest caz cu relația (I.27).

$$\varepsilon_1 = \frac{1,38}{\left(\frac{x}{d} \right)^{0,12}} \quad (I.27)$$

Toate relațiile prezentate arată că la creșterea vitezei curentului de fluid se intensifică procesul de transfer de căldură și că această intensificare este mai pronunțată în cazul curgerii turbulente decât în cazul celei laminare.

Diametrul tubului debitmetric (traductorului) influențează hotărâtor procesul de transfer de căldură, și anume, cu cât acest diametru este mai mic cu atât este mai mare coeficientul de transfer de căldură.

I.1.8. Transferul de căldură în debitmetrele termice

Pentru a măsura debitul este necesar a se măsura o mărime ce caracterizează câmpul de temperatură de pe suprafața tubului traductorului, câmp care prin forma sa definește procesul de transfer de căldură la curgerea fluidului.

În general, distribuția temperaturii de-a lungul tubului traductorului debitmetrului poate fi descrisă de patru ecuații diferențiale, relațiile (I.28), (I.29), (I.30) și (I.31) [47].

$$-\frac{dp}{dx} + \eta \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right) = 0 \quad (\text{I.28})$$

$$\frac{dw}{dx} = 0 \quad (\text{I.29})$$

$$\rho \cdot C_p \left(w_r \frac{d\theta}{dr} + w_x \frac{d\theta}{dx} \right) = \left(\frac{d^2 \theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\theta}{dr} + \frac{d^2 \theta}{dx^2} \right) \quad (\text{I.30})$$

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_p = -\frac{\alpha}{\lambda} (\theta_p - \theta_f) \quad (\text{I.31})$$

Semnificația notațiilor din ecuațiile prezentate mai sus este următoarea:

p – presiunea curentului de fluid ce traversează tubul debitmetrului, [N/m²];

r – raza conductei prin care circulă fluidul al cărui debit se măsoară, [m];

w_x – viteza fluidului în direcția axei de curgere, [m/s];

w_r – viteza fluidului în direcția radială, [m/s];

$d\theta/dn$ – gradientul de temperatură într-o direcție oarecare;

θ_p – temperatura peretelui, [°C];

θ_f – temperatura fluidului, [°C].

Ecuațiile (I.28), (I.29), (I.30) și (I.31) reprezintă ecuația de mișcare a fluidului (Navier - Stokes), ecuația de continuitate, ecuația transferului de căldură prin conductibilitate, respectiv ecuația transferului de căldură (legea lui Newton) [47, 57].

Ultima ecuație leagă transferul de căldură prin conductibilitate în perete de transferul de căldură prin convecție, de la perete la fluid, ecuația fiind în esență o exprimare particulară a legii conservării energiei pe suprafața unui corp.

Rezolvarea sistemului format din ecuațiile (I.28) – (I.31) pe cale analitică este complicată. Din acest motiv pentru rezolvarea problemelor de transfer de căldură se pot folosi metode experimentale, apelându-se la teoria similitudinii. În acest caz ecuațiile se scriu în formă adimensională, conținând de obicei rapoarte de mărimi de aceeași natură. Astfel în locul vitezei w_x într-un anumit punct considerat în fluid, cu raza de curgere r și temperatura θ_f , la o distanță x pe axa tubului traversat de fluid (în direcția mișcării fluidului), în ecuații poate figura mărimea

$$\text{adimensională } W = \frac{w}{\bar{w}}, \text{ precum și } R = \frac{r}{r_0}, \Theta = \frac{\theta_f}{\theta_p}, X = \frac{x}{l_0}.$$

În rapoartele menționate intervin următoarele noi notații:

\bar{w} – viteza medie a curentului de fluid, [m/s];

r_0 – raza tubului parcurs de curentul de fluid, [m];

l_0 – lungimea tubului, [m].

Ecuția transferului de căldură în tubul traductorului debitmetrelor termice, în formă adimensională va fi de forma:

$$\text{Nu} = -\left(\frac{\partial\Theta}{\partial R}\right)_{r=0} \quad (\text{I.32})$$

sau

$$\text{Pe}' \left(w_x \frac{\partial\Theta}{\partial X} + w_r \frac{\partial\Theta}{\partial R} \right) = \frac{\partial\Theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial\Theta}{\partial R} + \frac{\partial\Theta}{\partial X^2} \quad (\text{I.33})$$

La forme asemănătoare pot să ajungă și ecuațiile de mișcare a fluidului și de continuitate.

Sistemul ecuațiilor diferențiale adimensionale obținut în acest fel, precum și condițiile limită adimensionale reprezintă formularea matematică a problemei distribuției temperaturii în traductorul debitmetrului termic.

La determinări concrete se pot folosi ecuații criteriale obținute ca rezultat al unui număr foarte mare de încercări experimentale.

Mărimile adimensionale care apar pot fi considerate ca noi variabile care se pot împărți în trei grupe:

- variabile independente (coordonatele adimensionale X și R);
- variabile dependente (Nu , Θ , W_x , Eu);
- mărimi constante (Re , Pe , Gr , Pr).

Folosind aceste noi variabile, ecuațiile criteriale pentru mișcarea fluidului și transferul de căldură în tuburi circulare pot fi scrise astfel:

$$\text{Nu} = f_1(X, R, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}) \quad (\text{I.34})$$

$$\Theta = f_2(X, R, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}) \quad (\text{I.35})$$

$$\text{Eu} = f_3(X, R, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}) \quad (\text{I.36})$$

$$W = f_4(X, R, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}) \quad (\text{I.37})$$

Considerând că $\text{Pe} = \text{Re} \cdot \text{Pr}$, în locul criteriului Prandtl se folosește criteriul Peclet (mai ales la metale lichide).

I.1.8.1. Distribuția temperaturii în traductorul debitmetrelor termice

Distribuția temperaturii pe suprafața tubului traductorului debitmetrelor termice este un proces complex, putându-se identifica două tipuri de distribuții:

- distribuție simetrică a temperaturii provocată de transferul de căldură de la încălzitor la fluid;
- distribuție aproximativ liniară datorată unui transfer de căldură auxiliar din fluid în perete la apariția curentului de fluid.

Coroborarea celor două tipuri menționate de distribuții ale temperaturii redă distribuția reală de temperatură în traductorul debitmetrului.

În vederea executării calculului de proiectare, caracterul modificării distribuției temperaturii în tubul traductorului este deosebit de important, motiv pentru care este necesară stabilirea analitică a ecuațiilor ce stau la baza acestui proces.

Pentru elaborarea ecuațiilor ce descriu evoluția fenomenelor de transfer termic se consideră o secțiune prin traductorul unui debitmetru termic (figura I.12-a) și se fac o serie de ipoteze simplificatoare.

Astfel, se presupune că:

- temperatura θ_i este constantă pe toată lungimea încălzitorului;
- în dreptul încălzitorului, peretele tubului debitmetric are aceeași temperatură θ_i [40, 58];
- se iau în considerare relațiile (I.38) și (I.39) ce descriu următoarele diferențe de temperatură:

$$\theta_i = \theta_{ip} - \theta_f \quad (\text{I.38})$$

$$\theta = \theta_p - \theta_f \quad (\text{I.39})$$

în care:

- θ_i – temperatura elementului încălzitor, [°C];
- θ_{ip} – temperatura peretelui în dreptul încălzitorului, [°C];
- θ_p – temperatura peretelui, [°C];
- θ_f – temperatura fluidului, [°C].

La distanța x de încălzitorul inelar se consideră un element de tub, de formă inelară, cu lungimea dx și suprafața transversală S . Pentru elementul considerat, ecuația bilanțului termic se definește cunoscând cantitatea de căldură Q_1 ce intră în unitatea de timp, precum și cantitatea de căldură evacuată Q_e .

$$Q_1 = Q_e \quad (\text{I.40})$$

Din cantitatea de căldură Q_e , o parte Q_2 se transmite prin peretelui tubului, iar o cantitate dQ se transmite curentului de fluid, astfel se poate scrie:

$$Q_1 = Q_2 + dQ \quad (\text{I.41})$$

$$dQ = Q_1 - Q_2 \quad (\text{I.41}')$$

În concordanță cu legea transmiterii căldurii prin conducție a lui Fourier, căldurile Q_1 și Q_2 sunt date de relațiile (I.42) [58].

$$Q_1 = -\lambda \frac{d\theta}{dx} \cdot S \quad (\text{I.42})$$

$$Q_2 = -\lambda \frac{d}{dx} \left(\theta + \frac{d\theta}{dx} \cdot dx \right) \cdot S \quad (\text{I.43})$$

Ținând cont de relația (I.41') putem scrie:

$$dQ = \lambda \cdot S \cdot \frac{d^2\theta}{dx^2} \cdot dx \quad (\text{I.44})$$

Conform legii lui Newton, cantitatea de căldură dQ se poate defini și prin relația (I.45) [58, 59].

$$dQ = \alpha \cdot \theta \cdot P \cdot dx \quad (\text{I.45})$$

în care:

- P – perimetrul interior al tubului, [m];
- $P \cdot dx$ – suprafața de transfer de căldură, pentru dQ , în elementul considerat, [m²].

Egalând relațiile (I.44) și (I.45) se obține ecuația diferențială care descrie modul în care are loc distribuția temperaturii pe suprafața exterioară a peretelui tubului traductorului:

$$\lambda \cdot S \cdot \frac{d^2\theta}{dx^2} - \alpha \cdot \theta \cdot S = 0 \quad (\text{I.46})$$

sau

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{\alpha \cdot P}{\lambda \cdot S} \cdot \theta = m^2 \cdot \theta \quad (\text{I.47})$$

unde

$$m^2 = \frac{\alpha \cdot P}{\lambda \cdot S} \quad (\text{I.48})$$

Soluția ecuației (I.46) va fi de forma relației (I.49).

$$\theta = c_1 \cdot e^{mx} + c_2 \cdot e^{-mx} \quad (\text{I.49})$$

Constantele c_1 și c_2 se determină din condițiile limită și anume:

- pentru $x = 0$: $\theta = \theta_i$
- pentru $x = \infty$: $\theta = 0$.

Înlocuind aceste condiții la limită în ecuația (I.49) se obține:

- la $x = 0$: $\theta_i = c_1 + c_2$
- la $x = \infty$: $c_1 \cdot e^{\infty} = 0$.

Ultima egalitate este posibilă numai dacă $c_1 = 0$, deci $c_2 = \theta_i$.

Înlocuind valorile lui c_1 și c_2 în ecuația (I.49) se obține (trebuie de menționat că s-a luat în discuție un element aflat în partea dreaptă a încălzitorului):

$$\theta = \theta_i \cdot e^{-mx} \quad (\text{I.50})$$

Ecuația (I.13) se poate scrie în următoarea formă adimensională:

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_i} = e^{-mx} \quad (\text{I.51})$$

În figura I.12 este prezentată distribuția temperaturii în traductorul debitmetrului termic.

Astfel, figura I.12-b se referă la câmpul de temperatură de pe suprafața tubului debitmetrului termic, când în tub nu există curent de fluid, a cărui distribuție este redată de către ecuația (I.50). Măsurarea temperaturii se execută în punctele A și B.

Figura I.12-c ilustrează distribuția temperaturii pe suprafața interioară a tubului debitmetric, sau în stratul limită, distribuție provocată de mărirea coeficientului de transfer α de la perete, la apariția curentului de fluid în tub. Temperatura scade în toate punctele cu aceeași valoare, și anume:

$$\Delta\theta = \frac{Q}{S} \left(\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha + \Delta\alpha} \right) \quad (\text{I.52})$$

unde:

$\Delta\alpha$ – creșterea coeficientului de transfer de căldură α , la apariția curentului de fluid în tub, [$W/(m^2 \cdot \text{grad})$];

Q – cantitatea de căldură transmisă din fluid în perete când se mărește α , [W];

S – suprafața interioară a tubului debitmetric, [m^2].

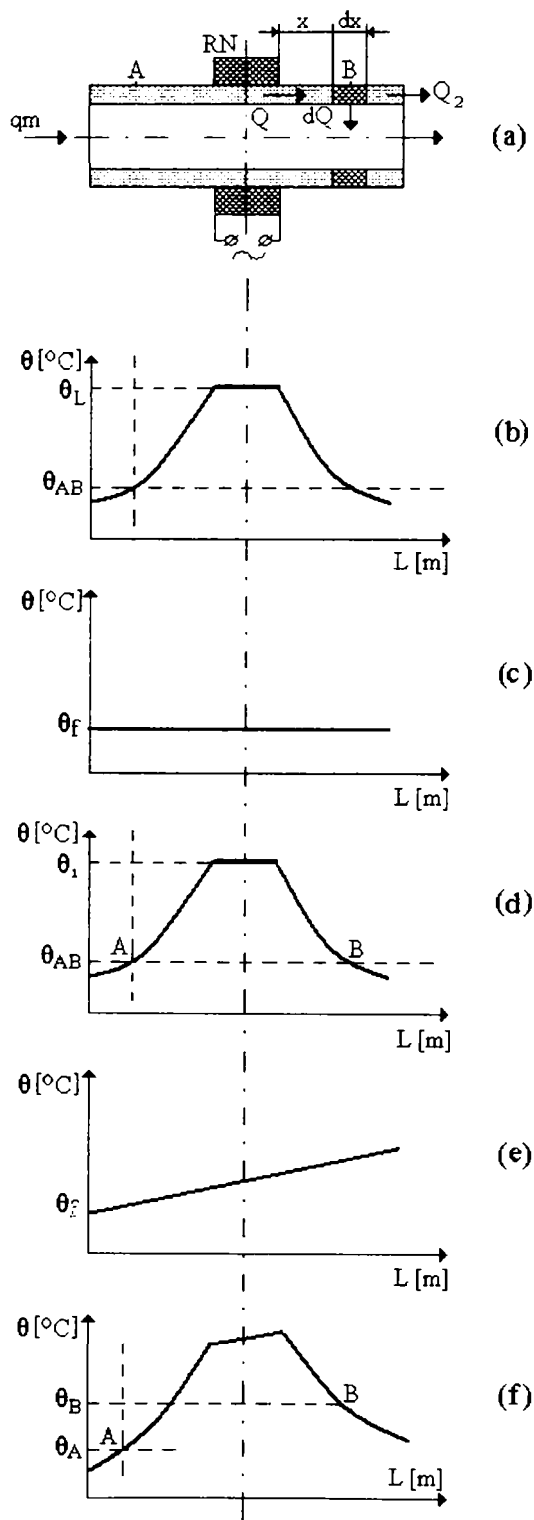


Figura I.12. Distribuția temperaturii în traductorul debitmetrului termic

Figura I.12-d reprezintă rezultanta distribuției temperaturii în peretele tubului, în ipoteza că fluidul are direcția de mișcare perpendiculară pe axa tubului, lucru desigur neverosimil (toate ordonatele curbei s-au micșorat cu aceeași diferență $\Delta(\theta_p - \theta_f)$ și câmpul de temperatură a rămas simetric).

Deoarece direcția de mișcare a fluidului este paralelă cu axa tubului, la creșterea vitezei curentului de fluid crește și coeficientul de transfer, ceea ce provoacă creșterea temperaturii fluidului θ_f și concomitent cu aceasta creșterea temperaturii pe suprafața interioară a tubului debitmetric (în stratul limită). Graficul prezentat în figura I.12-e ilustrează această creștere de temperatură, care pentru simplificare se consideră liniară.

În figura I.12-f este reprezentată rezultanta celor două procese distincte din peretele tubului, datorită căreia apare nesimetria câmpului de temperatură exprimată concret prin diferența temperaturilor din punctele A și B. Această diferență de temperatură este o măsură a vitezei curentului de fluid, implicit și a debitului.

I.1.8.2. Transferul de căldură în debitmetrele termice cu încălzitor inelar

Distribuția temperaturii pe suprafața exterioră a tubului traductorului, funcție de debitul de fluid care circulă prin acesta, are o deosebită importanță pentru calculele de proiectare a debitmetrelor cu încălzitor inelar.

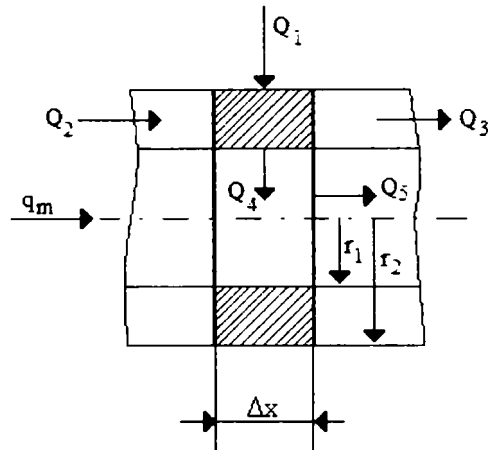
Exprimarea analitică a distribuției temperaturii în cazul curgerii soluțiilor și a gazelor se face fără a ține cont de conductibilitatea axială a fluidului, iar în cazul curgerii metalelor lichide este necesar să se cunoască și această mărime.

Pentru conducerea calculului matematic, se consideră un element din peretele tubului traductorului debitmetric termic cu lungimea Δx . În vederea rezolvării acestei probleme pe cale matematică este necesar să se facă o serie de ipoteze simplificatoare. Astfel, se poate admite că:

- temperatura peretelui tubului θ_p se modifică numai în direcția axei x (direcția de curgere a fluidului);
- cantitatea de căldură transmisă din peretele tubului la fluid este proporțională numai cu coeficientul de transfer de căldură α , care se consideră constant, și cu diferența dintre temperatura peretelui θ_p și temperatura fluidului θ_f ;
- conductibilitatea termică a fluidului după axa x se neglijează;
- procesul hidrodinamic și termic se consideră staționar;
- se neglijează pierderile de căldură în mediul exterior.

Schema bilanțului termic al elementului de perete din tubul considerat este redată în figura I.13.

Pentru a deduce ecuația bilanțului termic al inelului elementar de lungime Δx , este necesar să se cunoască cantitatea de căldură adusă Q_a , respectiv cantitatea de căldură evacuată Q_e din inel, în unitatea de timp.

Figura I.13. Element de lungime Δx din peretele tubului traductorului debitmetric

Cantitatea de căldură adusă în inel Q_a se va calcula din doi termeni:

- o cantitatea de căldură Q_1 care se transmite de la încălzitor la inel, dată de relația (I.53):

$$Q_1 = q(x) \cdot \Delta x \quad (I.53)$$

relație în care $q(x)$ reprezintă fluxul termic pe unitatea de lungime a tubului.

- o cantitatea de căldură Q_2 care se transmite în inelul considerat după direcția x a fluidului:

$$Q_2 = \lambda_p \cdot S_1 \cdot \frac{d\theta_p}{dx} = \lambda_p \cdot \pi(r_2^2 - r_1^2) \frac{d\theta_p}{dx} \quad (I.54)$$

unde:

r_1 – raza interioară a tubului debitmetric, [m];

r_2 – raza exterioară a tubului debitmetric, [m];

λ_p – coeficient de conductibilitate termică a peretelui, [W/(m²·grd)].

Cantitatea de căldură evacuată din inelul elementar Q_e va fi și ea alcătuită din doi termeni:

- o cantitatea de căldură evacuată din inel prin conductibilitate după direcția curentului:

$$Q_3 = \lambda_p \cdot \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \frac{d}{dx} \left(\theta_p + \frac{d\theta_p}{dx} \cdot \Delta x \right) \quad (I.55)$$

- o cantitatea de căldură transmisă din inelul elementar fluidului:

$$Q_4 = \alpha \cdot S_2 \cdot (\theta_p - \theta_f) = 2\alpha \cdot \pi \cdot r_1 \cdot (\theta_p - \theta_f) \cdot \Delta x \quad (I.56)$$

În regim staționar trebuie să existe egalitatea:

$$Q_a = Q_e \quad (I.57)$$

Deci

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (I.58)$$

Sau

$$-\lambda_p \cdot \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \frac{d^2\theta_p}{dx^2} + q(x) = 2\alpha \cdot \pi \cdot r_1 \cdot (\theta_p - \theta_f) \quad (I.59)$$

Dacă se consideră și un element din curentul de fluid de aceeași lungime Δx , bilanțul termic al acestuia va ține cont atât de cantitatea de căldură care ajunge din inel în fluid egală cu Q_4 , precum și de cantitatea de căldură Q_5 acumulată de fluidul care părăsește elementul considerat și care provoacă modificarea temperaturii cu θ_f . Relația (I.60) reprezintă expresia pentru cantitatea de căldură Q_5 .

$$Q_5 = q_m \cdot C_p \cdot \frac{d\theta_f}{dx} \cdot \Delta x \quad (I.60)$$

În regim staționar $Q_4 = Q_5$, deci:

$$\Delta x \cdot 2\alpha \cdot \pi \cdot r_1 \cdot (\theta_p - \theta_f) = q_m \cdot C_p \cdot \frac{d\theta_f}{dx} \cdot \Delta x \quad (I.61)$$

unde:

$$q_m = \rho \cdot w \cdot \pi \cdot r_1^2 \quad (I.62)$$

în care:

- q_m – debitul masic de fluid [kg/s];
- C_p – căldura specifică a fluidului [J/(kg·grad)];
- ρ – densitatea fluidului [kg/m³];
- w – viteza de curgere a fluidului [m/s].

După cum se observă, ecuațiile ce descriu bilanțul termic (I.59) și (I.61), atât pentru elementul de inel cât și pentru elementul din curentul de fluid, formează un sistem de ecuații diferențiale.

Pentru rezolvarea acestui sistem este necesar să se cunoască condițiile limită pentru variabilele independente, iar pentru simplificarea calculului, ecuațiile se pot trece din forma obișnuită în formă adimensională.

Condițiile limită considerate sunt următoarele:

- pentru $x \rightarrow -\infty$: $\theta_f = \theta_p = \theta_{intrare}$
- pentru $x \rightarrow \infty$: $\theta_f = \theta_p = \theta_{iesire}$

Pentru comoditatea calculului se pot utiliza două variabile noi:

$$\theta_1 = \theta_f - \theta_{int rare}$$

$$\theta_2 = \theta_p - \theta_{int rare}$$

și atunci condițiile limită devin:

- $x \rightarrow -\infty$ când $\theta_1 = 0$
- $x \rightarrow \infty$ când $\theta_1 = \theta_2 = \theta_{iesire}$.

Pentru a trece ecuațiile (I.34) și (I.35) în forma adimensională se definesc următoarele mărimi adimensionale:

$$X = \frac{x}{r_1}; \quad \Theta_1 = \frac{\theta_1}{\theta_{iesire}}; \quad \Theta_2 = \frac{\theta_2}{\theta_{iesire}};$$

$$A = Nu \cdot \frac{\lambda_f \cdot r_1^2}{\lambda_p (r_2^2 - r_1^2)} = N \cdot Nu; \quad B = \frac{2 \cdot Nu}{Re \cdot Pr}$$

Înlocuind aceste mărimi în ecuațiile (I.59) și (I.61), acestea vor deveni:

$$\frac{d^2\Theta_2}{dx^2} + q(x) = A(\Theta_2 - \Theta_1) \quad (I.63)$$

$$\frac{d\Theta_1}{dx} = B(\Theta_2 - \Theta_1) \quad (I.64)$$

În ecuația (I.36) relația pentru $q(X)$ este:

$$q(X) = \left[\frac{q(x)}{\Theta \cdot \lambda_p \cdot \pi} \right] \cdot \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (I.65)$$

iar condițiile limită sunt:

$$\bullet \quad X \rightarrow -\infty \text{ când } \Theta_1 = \Theta_2 = 0 \quad (I.66)$$

$$\bullet \quad X \rightarrow \infty \text{ când } \Theta_1 = \Theta_2 = 1. \quad (I.67)$$

Pentru rezolvarea sistemului de ecuații (I.63), (I.64), se explicitează diferența $\Theta_2 - \Theta_1$ din ecuația (I.64), care se înlocuiește în relația (I.63) și aceasta se integrează de la $-\infty$ la X . În acest fel se obține expresia pentru temperatura adimensională Θ_1 :

$$\Theta_1 = \frac{B}{A} \cdot \left[\frac{d\Theta_2}{dx} + \int_{-\infty}^X q(\xi) \cdot d\xi \right] \quad (I.68)$$

în care: ξ – variabilă intermediară.

Valoarea lui Θ_1 se înlocuiește în ecuația (I.63) obținându-se în acest fel:

$$\frac{d^2\Theta_2}{dx^2} + B \cdot \frac{d\Theta_2}{dx} - A \cdot \Theta_2 = -q(x) - B \int_{-\infty}^X q(\xi) \cdot d\xi \quad (I.69)$$

Soluția ecuației (I.69) va fi de forma:

$$\Theta_2 = C \cdot e^{p_1 X} + D \cdot e^{p_2 X} + \Theta_2^* \quad (I.70)$$

unde:

C, D – constante;

p_1, p_2 – rădăcinile ecuației caracteristice ecuației (I.69);

Θ_2^* - soluția particulară a ecuației (I.69), care depinde de funcția $q(X)$.

Se consideră că $q(X) = 0$, neținând cont de sectorul așezat imediat în apropierea încălzitorului în care fluxul termic se consideră constant.

Valorile obținute pentru Θ_2^* sunt:

$$\Theta_2^* = \begin{cases} 0 & \text{pentru } -\infty < X \leq L \\ \frac{LB}{2} + 1 & \text{pentru } -L \leq X \leq L \\ 1 & \text{pentru } L \leq X < \infty, L = \frac{1}{r_1} \end{cases}$$

Soluția sistemului de ecuații (I.63), (I.64), cu condițiile limită (I.66) și (I.67) va deveni de forma:

$$\Theta_2 = \begin{cases} C_1 \cdot e^{P_1 X} & \text{pentru } -\infty < X \leq -L \\ C_2 \cdot e^{P_1 X} + D_2 \cdot e^{P_2 X} + \frac{1}{2}LB + 1 & \text{pentru } -L \leq X \leq L \\ D_1 \cdot e^{P_2 X} + 1 & \text{pentru } L \leq X < \infty \end{cases}$$

Valorile constantelor C_1 , C_2 , D_1 și D_2 se determină din condițiile limită pentru Θ_2 și pentru $X = \pm L$.

În figura I.14 sunt date valorile calculate pentru Θ_2 pentru $A=2$, $B=1$ și $L=0$, $L=1$, $L=2$. Liniile întrerupte arată modificarea temperaturii fluidului în cazul în care se neglijează termoconductibilitatea în peretele tubului în lungul axei lui [28].

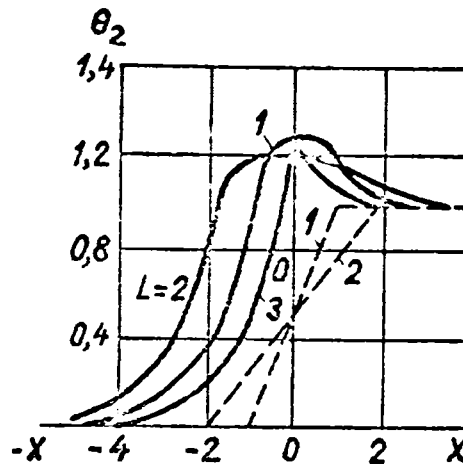


Figura I.14. Reprezentarea valorilor calculate pentru Θ_2 pentru $A=2$, $B=1$ și $L=0$, $L=1$, $L=2$

Rezolvarea propriu zisă a problemei distribuției temperaturii în pereții tubului traductorului debitmetrului termic se poate face numai pe baza unui număr mare de experimente legate de funcționarea acestor aparate de măsurare a debitului, prin trasarea concretă a curbelor de etalonare precum și prin aprecierea corectă a performanțelor acestora.

I.1.8.3. Transferul de căldură în debitmetrele termice cu încălzitor punctiform

La măsurarea debitelor de fluid în conducte cu diametru mare se poate folosi debitmetrul termic care are încălzitorul de dimensiuni mici sau încălzitor punctiform. În această situație folosirea unor încălzitoare inelare nu este eficientă mai ales din punct de vedere economic.

Pentru calculul de proiectare al acestor debitmetre un interes deosebit îl prezintă dependențele analitice existente între temperatura peretelui θ_p din apropierea încălzitorului, coeficientul de transfer de căldură α , temperatura fluidului θ_f și viteza de curgere w a acestuia. Funcția $\alpha = f(w)$ fiind o ecuație criterială care

leagă coeficientul de transfer de căldură α de parametrii termofizici ai curentului de fluid și de parametrii materialului din care este confecționat tubul traductorului.

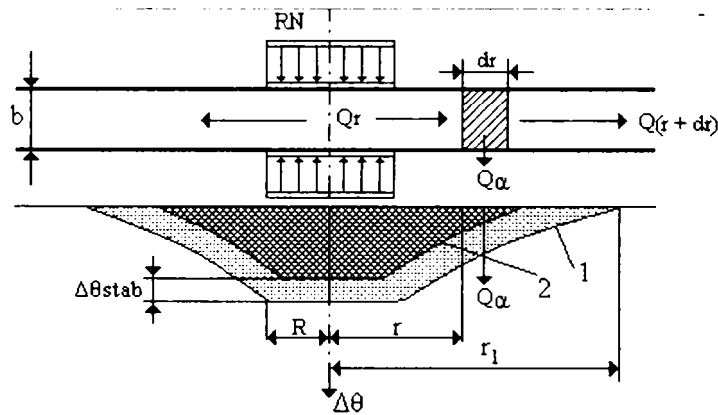
Pentru a analiza mai ușor procesul de transfer de căldură între zona încălzită și curentul de fluid se pot admite o serie de ipoteze simplificatoare:

- viteza curentului de fluid fiind mare și puterea de încălzire mică, se poate considera că temperatura fluidului θ_f practic rămâne constantă;
- se neglijează toate rezistențele termice în afară de rezistența termică a peretelui tubului;
- se consideră că întreaga cantitate de căldură dată de încălzitorul RN se transmite fluidului din tub;
- peretele tubului debitmetric este neted, fără asperități;
- corpul încălzitorului RN este un cilindru de rază R.

Din figura I.15 se observă că dacă la o oarecare viteză a curentului de fluid, α se mărește, diferența de temperatură în toate punctele scade și devine egală cu θ_w . Mărima diferenței de temperatură $\Delta\theta_{stab}$ se obține din diferența diferențelor de temperatură astfel:

$$\Delta\theta_{stab} = \Delta\theta_0 - \Delta\theta_w \quad (I.71)$$

relație în care $\Delta\theta_0$ reprezintă diferența stabilită când debitul prin tub este 0.



1. Distribuția diferenței de temperatură dintre perete și fluid în absența curentului
2. Distribuția diferenței de temperatură dintre perete și fluid la o viteză constantă a fluidului

Figura I.15. Distribuția diferenței de temperatură dintre perete și fluid

Mărimea determinantă pentru studiul procesului de transfer de căldură se consideră diferența de temperatură $\Delta\theta$ dintre temperatura peretelui sub încălzitor θ_{pi} și temperatura fluidului θ_f , și este necesar să se găsească dependența funcțională dintre $\Delta\theta$ și raza R. Aceasta poate fi descrisă de expresia:

$$\Delta\theta = \theta_{pi} - \theta_f = f(R) \quad (I.72)$$

relație în care R reprezintă raza încălzitorului punctiform.

Pentru a determina această dependență se va lua în considerare un inel elementar circular de fluid în apropierea încălzitorului punctiform pe peretele tubului, de grosime dr și înălțime b , egală cu grosimea tubului pentru care se va scrie bilanțul termic.

Cantitatea de căldură transmisă de la încălzitor la inelul elementar Q_r prin termoconductibilitate este dată de relația:

$$Q_r = -2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot b \cdot r \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (I.73)$$

Cantitatea de căldură evacuată din inel $Q_{(r+dr)}$ prin termoconductibilitate este dată de relația:

$$Q_{(r+dr)} = -2 \cdot \lambda \cdot \pi \cdot b \cdot \left(\frac{d\theta}{dr} + \frac{d^2\theta}{dr^2} \cdot dr + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\theta}{dr} \cdot dr \right) \quad (I.74)$$

Din inel cantitatea de căldură Q_α este transmisă fluidului din tubul traductorului, proces descris de relația (I.75).

$$Q_\alpha = 2 \cdot \alpha \cdot \pi \cdot r \cdot (\theta - \theta_f) \cdot dr \quad (I.75)$$

În regim staționar trebuie să existe egalitatea:

$$Q_r = Q_{(r+dr)} + Q_\alpha \quad (I.76)$$

Înlocuind relațiile (I.73), (I.74), (I.75) și (I.76) se obține o ecuație diferențială de gradul doi, de forma (I.77).

$$r^2 \frac{d^2\theta}{dr^2} + r \frac{d\theta}{dr} - r^2 \frac{\alpha}{\lambda \cdot b} (\theta - \theta_f) = 0 \quad (I.77)$$

Soluția ecuației (I.77) este de forma:

$$\theta - \theta_f = c_1 \cdot I_0(\beta \cdot r) + c_2 \cdot K_0(\beta \cdot r) \quad (I.78)$$

unde:

$I_0(\beta \cdot r)$ și $K_0(\beta \cdot r)$ – funcții cilindrice cu argument de ordinul 0, iar $\beta = \sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot b}}$

c_1 și c_2 – constante.

Valoarea funcțiilor se determină de obicei din tabele, iar constantele se calculează din condițiile limită ale problemei.

De cele mai multe ori ecuația (I.78) ce caracterizează câmpul de temperatură în domeniul $R < r < \infty$ are forma:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_f = \frac{N \cdot K_0(\beta \cdot R)}{\alpha \cdot \pi \cdot R^2 \cdot K_0(\beta \cdot R) + 2\pi \cdot \lambda \cdot b \cdot \beta \cdot RK_1(\beta \cdot R)} \quad (I.79)$$

în care:

N – cantitatea de căldură dată de încălzitor, [W];

$K(\beta \cdot R)$ – funcție cilindrică de ordinul 1.

Ecuația ce caracterizează câmpul de temperatură θ_R de sub încălzitor este:

$$\Delta\theta_R = \theta_R - \theta_f = \frac{N \cdot K_0(\beta \cdot R)}{\alpha \cdot \pi \cdot R^2 \cdot K_0(\beta \cdot R) + 2\pi \cdot \lambda \cdot b \cdot \beta \cdot RK_1(\beta \cdot R)} \quad (I.80)$$

Împărțind relația (51) cu (52) se obține expresia pentru temperatura adimensională [60]:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_f}{\theta_R - \theta_f} = \frac{K_0(\beta \cdot r)}{K_0(\beta \cdot R)} \quad (I.81)$$

Mărimea βR depinde de construcția debitmetrului, proprietățile termofizice ale fluidului și de mărimea debitului.

În figura I.16 este prezentat graficul dependenței $\Theta = f(r/R)$ pentru diferite valori ale lui βR [28]. Se observă că la creșterea raportului r/R crește și posibilitatea aproximării temperaturii peretelui θ_p cu temperatura fluidului θ_f , apropiere cu atât mai bună cu cât produsul βR este mai mare, deci coeficientul de transfer α mai ridicat.

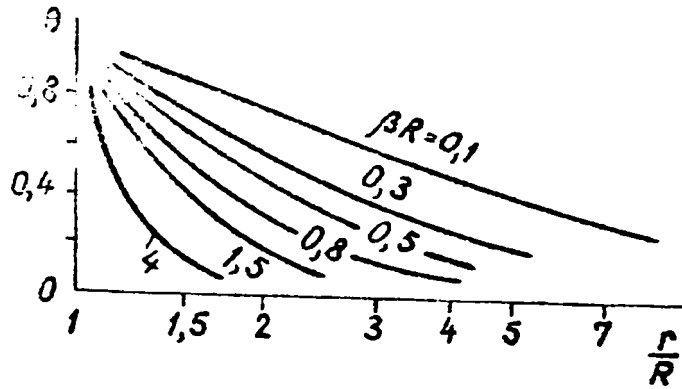


Figura I.16. Graficul dependenței $\Theta = f(r/R)$ pentru diferite valori ale lui βR

Pentru dimensionarea zonei de încălzire este necesar să se calculeze distanța r_1 de la centrul încălzitorului până în punctul în care diferența $\theta_{r_1} - \theta_f$ devine mai mică decât pragul de sensibilitate al traductorului. Considerând că pragul de sensibilitate este egal cu $0,01$ °C, r_1 se poate calcula din relația (I.82).

$$\theta_{r_1} - \theta_f = \frac{N \cdot K_0(\beta \cdot r_1)}{\alpha \cdot \pi \cdot R^2 \cdot K_0(\beta \cdot R) + 2\pi \cdot \lambda \cdot b \cdot \beta \cdot R \cdot K_1(\beta \cdot R)} \quad (I.82)$$

Deoarece cea mai mare zonă de încălzire în traductor va exista la viteza minimă a curentului de fluid, la determinarea lui r_1 , mărimea β trebuie să se aleagă pentru coeficientul minim de transfer de căldură care corespunde limitei inferioare din domeniul de măsurare al debitului.

I.1.9. Comportarea dinamică a debitmetrelor termice și posibilități de compensare a erorilor dinamice ale acestora

Privit ca element de reglare, debitmetrul termic este un element proporțional de ordinul unu, iar comportarea dinamică este caracterizată printr-o ecuație diferențială de ordinul unu, liniară, cu coeficienți constanți, de forma ecuației (I.83).

$$T \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = k \cdot \Delta q_m \quad (I.83)$$

în care:

- θ – temperatura în traductorul debitmetrului (mărime de ieșire), [°C];
- t – timpul, [s];
- Δq_m – variația debitului de fluid (mărime de intrare), [kg/s];
- k – coeficient de transfer;

T – constantă de timp, [s].

Ecuția (I.83) descrie comportarea debitmetrelor termice în regim nestaționar, când după o variație oarecare a variabilei de intrare, variabila de ieșire se modifică în timp, tinzând spre o valoare staționară [2, 61].

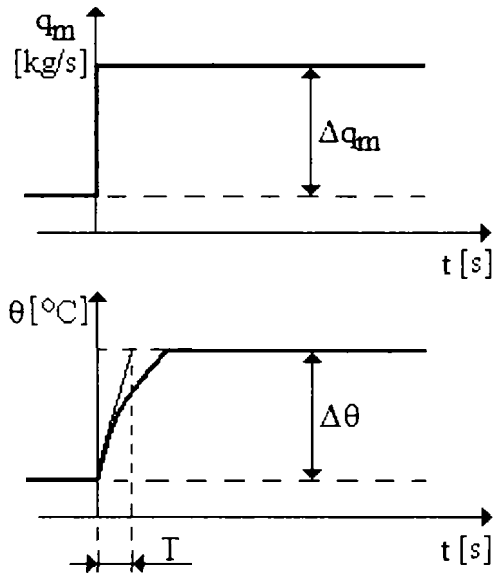


Figura I.17. Răspunsul la semnal treaptă

Dacă debitmetrului termic i se aplică un semnal treaptă Δq_m , variația variabilei de ieșire θ în timp va avea forma unei curbe exponențiale (figura I.17), descrisă de relația:

$$\theta(t) = k \cdot \Delta q_m \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (\text{I.84})$$

Ecuțiile de mai sus caracterizează comportarea tuturor debitmetrelor termice.

În cazul debitmetrelor termice fără contact, constanta de timp T este influențată de următorii factori [62]:

- inerția termică a peretelui tubului, încălzitorului și a elementului sensibil;
- parametrii termofizici ai curentului de fluid;
- intensitatea transferului de căldură între traductor și curentul de fluid;
- inerția aparatului de indicare.

Spre deosebire de debitmetrele termice fără contact, debitmetrele termice cu contact calorimetrice și termoanemometrice au constanta de timp scăzută din următoarele motive:

- în transferul de căldură participă numai masele unor fire metalice care îndeplinesc funcțiile de încălzitor și element sensibil;
- firele sunt amplasate astfel încât se găsesc în contact direct cu fluidul al cărui debit se măsoară.

Pe baza observațiilor făcute se poate afirma că inerția termică care apare la debitmetrele termice cu contact este factorul principal care introduce întârziere în răspunsul mărimii de ieșire, la o variație a mărimii de intrare, deci introduce erori dinamice.

Unul dintre dezavantajele debitmetrelor termice fără contact îl constituie valorile mari ale constantelor de timp. Astfel, în timp ce la debitmetrele calorimetrice cu contact și cele termoanemometrice, constantele de timp sunt cuprinse între miimi de secundă și maxim 8 secunde, la debitmetrele cu strat limită termic aceste valori se situează în intervalul 15 – 180 secunde.

Metodele prin care se poate reduce inerția acestor aparate, deci se poate micșora constanta lor de timp, se grupează în [63]:

- metode constructive;
- metode bazate pe introducerea unor dispozitive de corectare pentru compensarea erorilor dinamice.

Din punct de vedere constructiv, se poate uneori reduce secțiunea tubului sau se poate introduce în conducta de fluid un debitmetru de dimensiuni reduse, iar pentru îmbunătățirea transferului termic se pot instala în interiorul tubului agitatoare pentru fluidul al cărui debit se măsoară. Prin aceste metode s-a reușit să se obțină reducerea constantei de timp de câteva ori, dar aceste metode nu se pot utiliza în toate cazurile.

Dispozitivele de corecție permit reducerea erorilor dinamice de zeci de ori prin introducerea unor așa numite elemente de corecție care reduc la zero valoarea constantei de timp a întregului sistem. Elementele de corecție pot fi dispozitive electronice cu amplificare care pot fi legate în serie sau în paralel cu debitmetrul termic, sau pot fi conectate și în circuitele de echilibrare închise sau racordate la legătura inversă a aparatului de măsurat [64, 65].

I.2. Modelarea matematică și simularea, modalități moderne de realizare a cunoașterii

I.2.1. Introducere

Dezvoltarea într-un ritm accelerat a științei și tehnicii contemporane creează o complexitate de probleme ce devin din ce în ce mai greu de controlat sau condus. În sprijinul eforturilor sale de a stăpâni complexitatea, de a-i cunoaște componentele și de a ști diferitele legi ce o guvernează, cercetătorii au creat noțiunea de sistem. De aici pornind au apărut modelele matematice, iar necesitatea obținerii de informații despre sistem înainte ca el să fie realizat a condus la simulare [4].

Metoda modelării a apărut după apariția și structurarea teoriei sistemelor. Teoria sistemelor este constituită dintr-un ansamblu de elemente matematice și logice al cărui scop este de a formula și elabora principii generale pentru interpretarea și explicarea comportării sistemelor de orice natură [65]. Totodată, aceasta este capabilă să confere aspectului studiat, indiferent de domeniul de care aparține, trăsături clare, de mare generalitate. Astfel, acest aspect este asimilat cu conceptul de sistem [5]. Aria de cuprindere a teoriei sistemelor vizează un spectru larg de sisteme cum sunt cele naturale, tehnice sau abstracte care aparțin unor domenii științifice foarte diverse. Această varietate cuprinde domenii ca fizica, chimia, biologia, medicina, științele sociale și ingineria [65-68].

Datorită faptului că de cele mai multe ori sistemele studiate sunt complexe, greu abordabile pentru studiu, s-a încercat finalizarea procesului de cunoaștere prin modele ușor de realizat și studiat. Astfel, simularea s-a constituit într-o nouă metodă de cercetare, cu tehnici specifice, care pot acoperi printr-o nouă modalitate necesitatea de cunoaștere a omului [69, 70].

Dezvoltarea teoriei sistemelor a avut loc în paralel cu ceea ce se înțelege astăzi prin teoria modelării. Traiectoriile de cunoaștere ale celor două domenii s-au întrepătruns și au căpătat noi valențe odată cu dezvoltarea ciberneticii și apariția unor sisteme de calcul din ce în ce mai performante, sisteme care devin mijloacele cu ajutorul cărora investigatorii execută anumite operații [5].

Algoritmul general pentru rezolvarea unei probleme cu ajutorul calculatorului – prin modelare și simulare – este prezentat în figura I.18 [71].

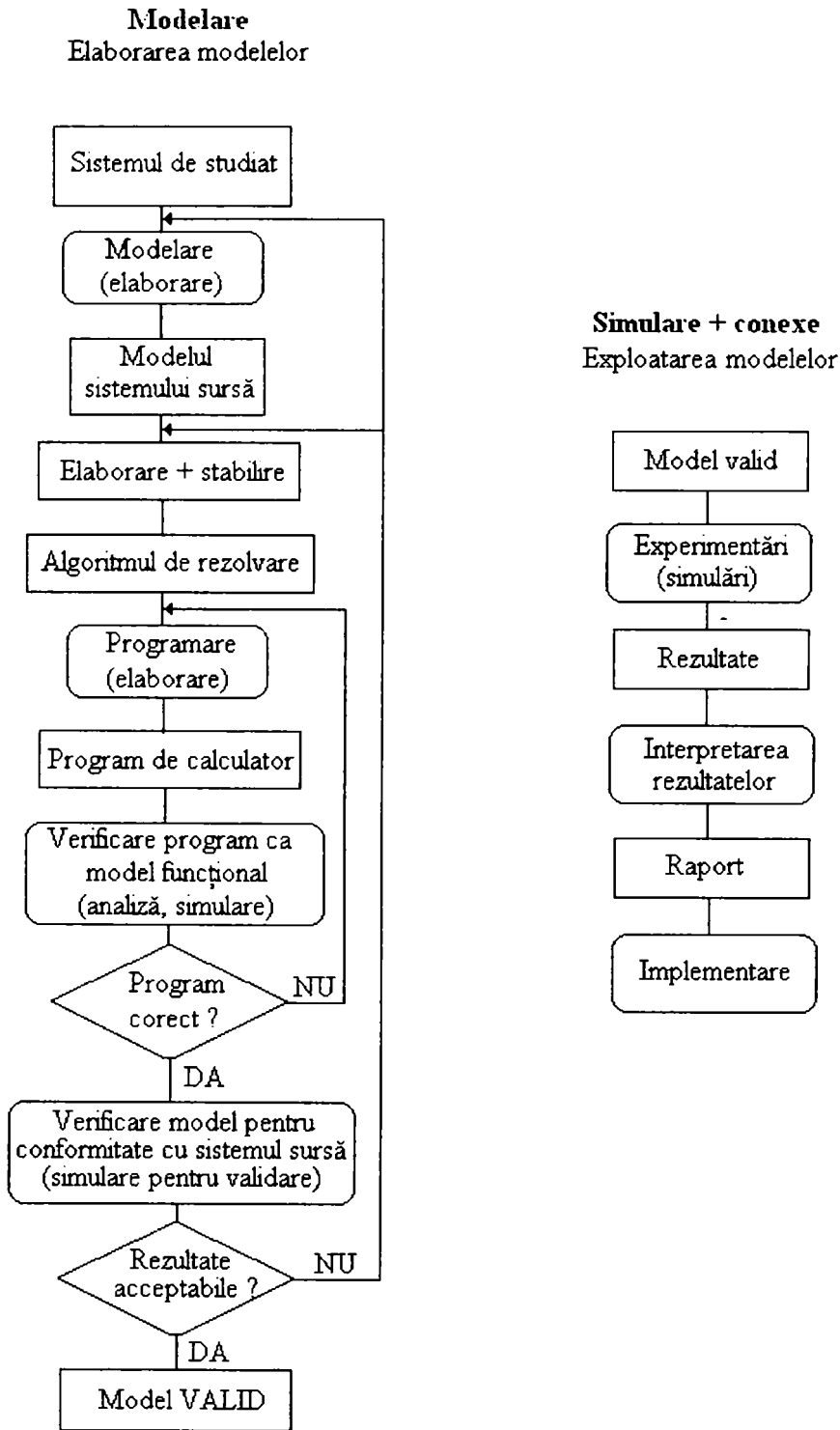


Figura 1.18. Modelarea și simularea, modalități moderne de realizare a cunoașterii

I.2.2. Tendințe actuale în abordarea teoriei modelării

O tendință nouă în abordarea teoriei modelării constă în reconsiderarea rolului conferit mijloacelor cu ajutorul cărora se desfășoară majoritatea activităților legate de modelare [5].

Interesul pentru modelarea sistemelor a crescut considerabil în ultima perioadă, motivațiile acestui fapt trebuind căutate în numeroase aplicații pe care modelarea sistemelor le are în diverse domenii. Modelarea proceselor industriale în scopul ameliorării cunoașterii acestora sau/și al conducerii lor este în continuă dezvoltare, propulsată fiind de explozia din domeniul informaticii, care a dus la apariția de noi limbaje care oferă facilități reale în simularea comportării proceselor pe baza modelelor matematice. Aplicarea modelării matematice și a simulării au priză tot mai mare, fiind de un real folos în domenii precum tehnicile de măsurare a parametrilor, automatizare și optimizarea proceselor chimice.

Teoria modelării poate fi definită ca o structură coerentă alcătuită din cinci elemente de bază, elemente interconectate prin așa numitele relații de modelare specifice [72]. Această structură integrează în mod natural calculatorul, fără de care nici nu se pot imagina procesele de modelare.

În figura I.19 [5] este prezentată schema logică care stă la baza abordării structurale a teoriei modelării.

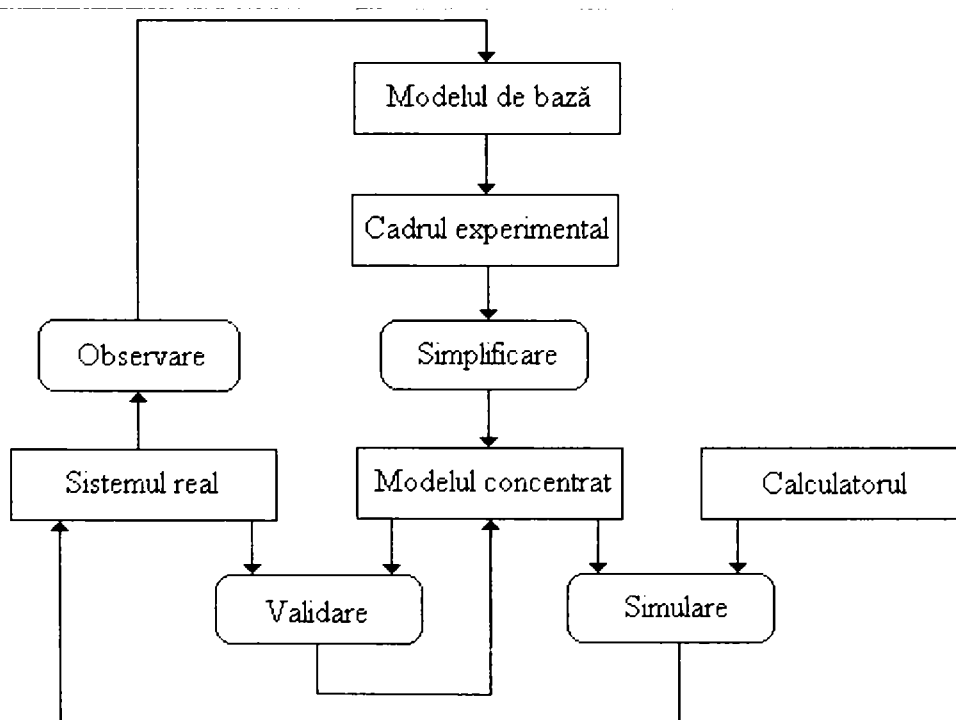


Figura I.19. Schema logică pentru abordarea structurală a teoriei modelării

Elementele de bază ale teoriei modelării sunt definite cu ajutorul conceptelor din teoria sistemelor și constau din [5]:

- Sistemul real (sistemul sursă) – constituie sursa datelor observabile, care sunt de cele mai multe ori, perechi de date intrare-ieșire.
- Modelul-bază – constituie imaginea sau modelul mintal prin care investigatorul modelelor percepe sistemul real.
- Cadrul experimental – reprezintă setul de circumstanțe limitate în domeniul cărora sistemul real va fi observat și înțeles cu scopul de a se executa modelarea. Este de fapt un set restrâns al mărimilor comportamentale de la ieșire.
- Modelul concentrat – este conceptul cel mai apropiat de cel de model propriu-zis din abordarea clasică, reprezentând sistemul capabil să reproducă comportamentul la ieșire al sistemului real prin prisma limitărilor impuse de cadrul experimental.
- Calculatorul – este mijlocul cu ajutorul căruia este reprodus comportamentul modelului concentrat.

Relațiile de modelare sunt stabilite, prin teoria modelării, între elementele de modelare [5]:

- Validarea – confirmarea faptului că modelul urmărește sistemul real. Modelul de bază este deplin valid dacă reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale, iar modelul concentrat este valid dacă reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului prin cadrul experimental pentru care a fost definit.
- Simplificarea – urmărește realizarea celui mai eficient model concentrat în interiorul cadrului experimental pentru care a fost definit.
- Simularea – urmărește asigurarea că mijlocul de calcul reproduce cu fidelitate comportamentul indus de model.

I.2.3. Conceptul de sistem. Experimentul ca sistem tehnic

Sistemul este alcătuit din o mulțime de entități componente, caracterizate de proprietăți individuale specifice, aflate în relații de dependență și care sunt cuplate împreună într-un anumit mod pentru a-i conferi ansamblului un scop bine definit [65, 73].

Sistemele sunt net delimitate de mediul înconjurător prin frontiera lor, iar tot ce nu aparține sistemului constituie mediul ambiant. Entitatea de tip frontieră face demarcația între mediul și sistem, fiind caracterizată prin relații de intrare-ieșire prin mijlocirea unor parametrii [5, 72, 74, 75].

Interacțiunea cu mediul poate avea loc în ambele sensuri, de la mediul spre sistem, respectiv de la sistem spre mediul ambiant. Mărimile prin care un sistem interacționează cu mediul și prin care se exprimă legăturile dintre sistem și mediul exterior se numesc mărimi de interfațare sau variabile terminale, iar relațiile care implică aceste variabile pot fi numite relații terminale [65, 76, 77]. În lipsa mărimilor de interfațare conceptul de sistem este inoperant.

Variabilele terminale ale sistemului pot fi împărțite în două mari categorii în funcție de natura cauză sau efect pe care o manifestă, împărțire care poartă numele de orientarea sistemului. Astfel se poate afirma că un sistem orientat este un sistem la care s-au separat variabilele terminale în variabile de tip cauză, numite variabile de intrare (intrări) și în variabile de tip efect, numite variabile de ieșire (ieșiri) [65, 78].

Prin noțiunea de mărime sau variabilă se înțelege o entitate a cărei valoare se poate modifica în timp, de exemplu: debitul, tensiunea electrică, curentul electric, temperatura, presiunea [79].

Mărimile de intrare sunt mărimile prin care se exprimă acțiunea mediului exterior asupra sistemului, ele ne depinzând de sistem, iar mărimile de ieșire sunt acele mărimi cu ajutorul cărora se receptează din exterior acea parte din comportarea sistemului care interesează [76, 80]. Aceste mărimi sunt în general mărimi vectoriale.

Relația dintre mărimile de ieșire ale unui proces și mărimile de intrare constituie modelul matematic care descrie procesul respectiv [81].

În ceea ce privește experimentul sau cercetarea experimentală, aceasta reprezintă o intervenție controlată în evoluția sau funcționarea unui sistem, având ca finalitate următoarele [82, 83]:

- verificarea și adâncirea cunoștiințelor privind acțiunea factorilor de influență (variabile de intrare) asupra funcțiilor de răspuns (variabile de ieșire) ale sistemului (experiment pasiv, de evaluare și atestare a unei stări de fapt);
- determinarea condițiilor optime de funcționare a unui sistem în raport cu criteriile și restricții impuse (experiment activ, optimizare).

Cercetările realizate în acest domeniu au evidențiat utilitatea reprezentării experimentului ca sistem cibernetic (figura I.20) [82, 83].

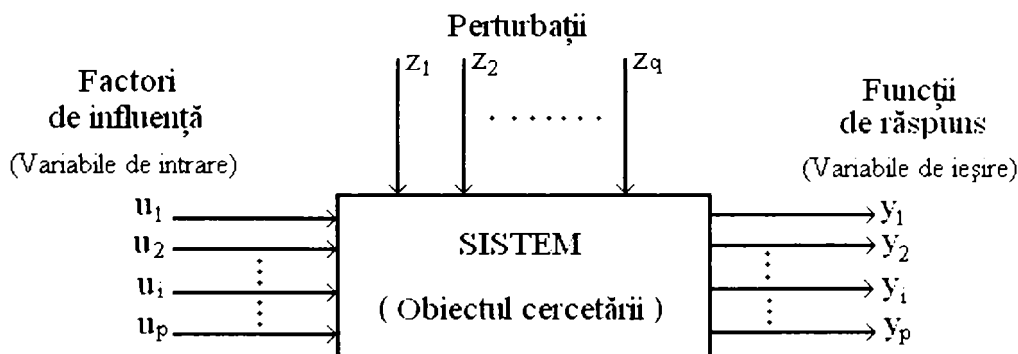


Figura I.20. Reprezentarea experimentului ca sistem cibernetic

Obiectul cercetării integrează sistemul supus cercetării experimentale cu mulțimea mijloacelor de încercare (testare) și măsurare necesare evaluării stării, comportamentului și evoluției sistemului respectiv.

Funcțiile de răspuns definesc și evaluează cantitativ comportamentul și tendințele de evoluție ale sistemului ce se constituie obiect al cercetării, în condițiile date [83].

Pentru ca o mărime concretă (fizică) sau abstractă să poată fi acceptată ca funcție de răspuns, ea trebuie să satisfacă următoarele cerințe [84]:

- să caracterizeze cuprinzător, multilateral, esența sau eficiența obiectului cercetării;
- să poată fi exprimată cantitativ, prin asocierea unui număr pentru toate stările obiectului supus experimentării (mulțimea valorilor funcției de răspuns reprezintă domeniul său de definiție);
- să aibă un caracter univoc;

- să aibă o semnificație fizică clară, cât mai simplă și mai ușor de calculat din punct de vedere matematic;
- să poată fi determinată cu precizie cât mai mare, superioară erorii experimentului.

Factorii de influență sau variabilele independente reprezintă modalități și mijloace de influențare a comportamentului obiectului cercetării, corespunzător obiectivelor urmărite prin experimentul efectuat.

Pentru ca o mulțime de mărimi fizice să poată fi acceptată ca factor de influență, trebuie satisfăcute următoarele cerințe [84]:

- să fie independente, adică să poată fi comandate la orice nivel al domeniului de existență, independent de nivelele celorlalți factori din sistem;
- să fie compatibile, adică să permită realizarea oricărei combinații a nivelelor factorilor, în condițiile funcționării normale a obiectului cercetării;
- să fie controlabile, adică să poată fi măsurate, reglate și menținute la nivelele programate existente;
- să exercite o influență directă și univocă asupra stării și comportamentului obiectului cercetării.

Fiecare factor are un domeniu de existență determinat, care poate fi continuu sau discret. Întrucât la planificarea experimentării se operează cu nivele discrete ale factorilor, atunci când domeniile de existență ale acestora sunt continue, se vor selecta din acestea submulțimi de nivele discrete adecvate obiectivelor cercetării.

Prezintă o importanță hotărâtoare pentru realizarea obiectivelor cercetării luarea în considerare a tuturor factorilor care influențează comportarea obiectului cercetării. De regulă atunci când numărul factorilor este mai mare sau egal cu 5, din considerente de limitare rațională a volumului și costului experimentului, se recurge la selectarea preliminară a factorilor semnificativi pentru sistemul considerat.

Structura experimentului este definită prin numărul și condițiile de desfășurare a încercărilor necesare și suficiente pentru realizarea obiectivelor cercetării.

În elaborarea structurii unui experiment trebuie avute în vedere următoarele [85]:

- în cadrul unei încercări fiecare factor poate lua una și numai una din mulțimea valorilor discrete disponibile în domeniul său de existență;
- mulțime determinată de nivele ale factorilor definește una din stările posibile ale obiectului cercetării și materializează posibilitatea efectuării unei încercări;
- mulțimea combinațiilor posibile ale nivelelor factorilor de influență determină mulțimea stărilor obiectului cercetării și deci volumul experimentării;
- realizarea obiectivelor cercetării în situația în care experimentul nu este controlabil în mod absolut și rezultatele sale nu sunt perfect reproductibile, obligă adeseori la replicarea încercărilor, adică la repetarea acestora prin readucerea obiectului cercetării în condițiile inițiale;
- definirea completă a structurii unui experiment impune precizarea succesiunii de efectuare a încercărilor programate;
- pentru sistemele tehnice, la care numărul factorilor de influență și a nivelelor de variație este în mod natural mare, se pune problema stabilirii unei strategii a experimentului, care să permită minimizarea numărului de încercări și implicit a costurilor cercetării.

I.2.4. Modelarea matematică

I.2.4.1. Conceptele de model, modelare. Clasificarea modelelor

La ora actuală în domeniul științifico-tehnic, modelul se consideră a fi un sistem abstract sau material cu ajutorul căruia pot fi studiate indirect proprietățile unui alt sistem, mai complex (sistemul sursă), cu care modelul prezintă o analogie limitată și orientată [5]. Cu alte cuvinte, modelul este o reprezentare a aspectelor esențiale ale unui sistem. Acesta reprezintă o simplificare, o reflectare parțială a fenomenului sau obiectului original, neglijându-se anumite laturi neesențiale pentru studiul căruia îi este destinat, cu scopul de a oferi un material mai accesibil investigației teoretice sau experimentale.

Modelul matematic al unui sistem poate fi definit ca fiind un ansamblu de relații matematice, ecuații și inecuații, ce caracterizează și descriu interdependențele dintre parametrii constructivi și funcționali ai sistemului. Prezența inecuațiilor în model se datorează unor restricții cu caracter fizico-chimic, tehnologic sau constructiv [86-89].

Modelele vizează comportarea sistemelor în regim staționar sau în regim dinamic.

Elaborarea unui model corect și eficient al unui sistem original reprezintă o sinteză a ceea ce se cunoaște despre acel sistem [90]. Paradoxal este faptul că, pentru a modela corect un fenomen, este necesară cunoașterea cât mai cuprinzătoare a acestuia, ceea ce este în opoziție cu nevoia de a-l cerceta. De asemenea, modelul trebuie să fie adecvat scopului propus. Astfel, un model excesiv de complicat, care își propune să aibă în vedere toate aspectele și detaliile posibile ale fenomenului original, poate deveni costisitor, greoi sau chiar inoperant, iar un model simplist, prea sumar, poate fi incorect, ca urmare a neglijării unor aspecte importante ale sistemului investigat.

Modelarea, în sens restrâns reprezintă activitatea de elaborare propriu-zisă a modelului unui sistem sursă, activitățile desfășurate în acest sens fiind materializate și prin [5, 91-93]:

- tehnici și proceduri de căutare și analiză;
- tehnici de simulare;
- tehnici și proceduri complementare.

Etapele prin care se realizează modelarea, la modul clasic, în sens restrâns sunt, în general, următoarele [5, 94-97]:

- construirea modelului pe baza:
 - analizei preliminare a sistemului sursă în vederea evidențierii parametrilor relevanți și a legăturilor funcționale dintre ei;
 - stabilirea unei structuri a modelului;
 - stabilirea valorilor parametrilor definitorii ai modelului.
- analiza modelului prin simulare;
- compararea rezultatelor analizei cu datele de comportare a sistemului sursă în condiții echivalente;
- corectarea modelului, în sensul apropierii comportamentului de cel al sistemului sursă.

În figura I.21 este prezentată schema logică pentru metodologia de desfășurare al modelării unui proces [98].

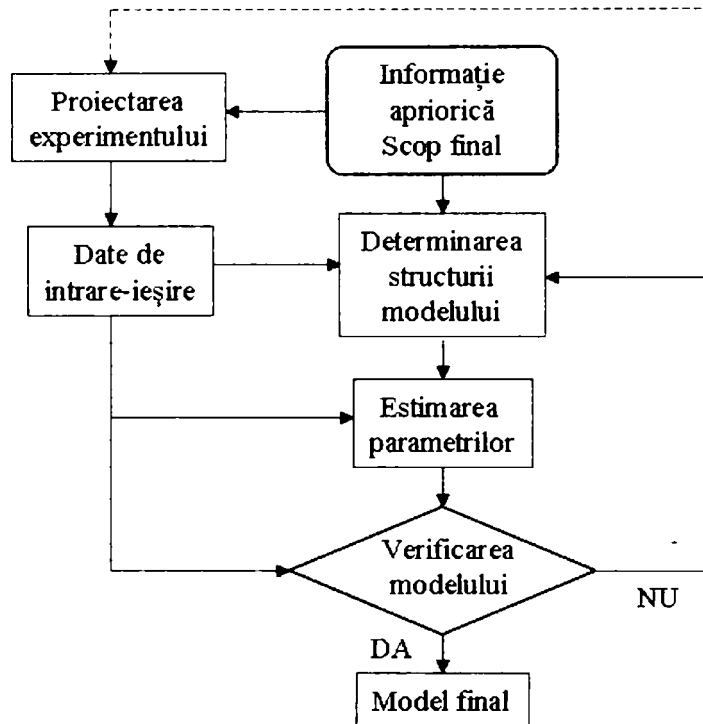


Figura I.21. Schema logică pentru metodologia de desfășurare a modelării unui proces

Modelarea matematică este utilă în toate fazele de dezvoltare ale unei teorii științifice sau tehnice, ea aducând cu sine o serie de avantaje certe [98-102]:

- aprofundarea cunoașterii și înțelegerii fenomenului sau procesului (trebuie luate în considerare secvențe complexe cauze – efect, interdependențele dintre variabile);
- proiectarea optimă a instalațiilor de cercetare sau producție (dimensionarea aparatelor și a utilajelor, evaluări ale parametrilor pe baza datelor obținute pe instalații pilot sau modele de referință, studiul efectelor modificărilor în dimensiuni, structura optimă a fluxului tehnologic, etc.);
- optimizarea exploatarei instalațiilor în funcțiune;
- controlul optimal al proceselor, etc..

În construcția modelului se adoptă, în general, o linie de compromis între cerințele legate de o descriere riguroasă a fenomenului sau procesului (ecuații complexe) și posibilitățile de simulare numerică. Nu este necesar ca modelul să constituie o descriere extrem de amănunțită a mecanismelor reale din sistem. El trebuie să aibă gradul de complexitate minim cerut de scopul pentru care a fost construit.

În ceea ce privește clasificarea, există mai multe criterii utilizabile [103]:

- după forma ecuațiilor (liniare – neliniare, parametri concentrați – parametri distribuiți);

- după gradul de cunoaștere al parametrilor modelului (determinate – când fiecărui parametru sau variabile independente i se poate atribui o valoare bine definită; stohastice – parametrii sau variabile ale procesului au valori care se pot exprima doar probabilistic).

Dacă variabilele procesului se modifică atât în timp cât și în spațiu sau dacă modificarea are loc doar în spațiu, dar pe mai mult de o singură dimensiune, se poate vorbi de modele cu parametrii distribuiți. Ele se prezintă sub forma unor ecuații diferențiale cu derivate parțiale. Dacă variabilele procesului nu se modifică în timp, se fac referiri la modele cu parametrii concentrați. Acestea sunt alcătuite din ecuații diferențiale obișnuite [104].

Uneori se recurge la o descriere a legăturilor ce există între variabilele procesului în regim staționar (model în regim static). Dacă variabilele își modifică valoarea și în timp, se poate vorbi de modele în regim dinamic.

Din punct de vedere al modului de deducere al relațiilor dintre variabile, se deosebesc următoarele tipuri de modele [105-110]:

- Modele analitice – bazate pe cunoașterea legilor fizice ce guvernează starea și evoluția sistemului studiat. La determinarea acestor tipuri de modele se pornește de la adoptarea unor ipoteze, logic justificate, prin care se particularizează și se simplifică sistemul analizat. Apoi, se scriu ecuațiile diferențiale, care descriu fenomenologia proceselor de transformare specifice sistemului, după care se integrează aceste ecuații pentru câteva cazuri particulare idealizate, considerate ca stări limită. Verificarea experimentală a modelelor propuse este foarte importantă.
- Modele experimentale, numite și modele empirice sau statistice – bazate pe corelarea datelor experimentale. În cazul modelării empirice, se renunță în mod deliberat la analiza detaliată a fenomenelor care au loc în sistem și a interacțiunii dintre ele, urmărindu-se exclusiv stabilirea, pe principiile statisticii matematice și analizei de regresie, a legăturii dintre variabilele de ieșire și variabilele independente ale sistemului într-o formă matematică cât mai simplă (cel mai des, polinomială), adaptabilă calculului automat și utilizabilă nemijlocit în aplicații practice. Domeniul de valabilitate al acestor modele se rezumă la domeniul în care au fost modificate variabilele [111].
- Modele mixte sau analitico-experimentale – deducerea modelului se realizează mixt: pe baza relațiilor dintre variabile se stabilește structura modelului, iar prin prelucrarea statistică a datelor experimentale se obțin coeficienții din ecuații [112-114].

Experiența acumulată arată că eficiența de ansamblu a modelării analitice scade, iar a modelării experimentale crește pe măsură ce complexitatea și caracterul difuz al sistemelor analizate se accentuează [85]. De aici, rezultă importanța cercetărilor experimentale în inginerie și implicit în perfecționarea sistemelor tehnice și tehnologice. Determinarea analitică a parametrilor este în general foarte dificilă, în consecință parametrii vor fi estimați utilizând date experimentale. Într-o astfel de abordare, modelarea analitică furnizează informații apriorice procedurii de modelare experimentală. Etapa efectivă de modelare a procesului este cea experimentală.

I.2.4.2. Modelarea experimentală

Modelarea experimentală mai este cunoscută în literatura de specialitate și sub numele de modelare statistică sau empirică.

În ceea ce privește cercetarea statistică se remarcă un aspect general care se referă la faptul că legile fundamentale ale statisticii își găsesc aplicații aproape universale. Limbajul statisticii devine în prezent familiar oricărui cercetător, indiferent de domeniul specific al activității sale. Explicația acestui fenomen rezidă în faptul că în procesul de matematizare al științelor, statistica matematică, ca ramură a matematicii, prezintă cea mai mare pondere [115].

Având în vedere cercetările efectuate de-a lungul timpului, se poate afirma că modelul statistic al unui proces înlocuiește un model ipotetic, real (\equiv adevărat). Acesta ar putea fi obținut numai prin efectuarea unui număr infinit de experiențe, dar statistica matematică este știința care urmărește explicarea fenomenelor de masă dintr-un număr relativ redus de observații. Limitând experiențele la numai o selecție din întreaga populație, problema devine una de inducție de la parte la întreg, metodă de inferență statistică. Ea folosește deci metode inductive de cercetare, plecând de la particular la general. Deoarece modelul adevărat nu poate fi atins se preferă să se găsească două limite, una inferioară - alta superioară, în care să se încadreze răspunsul exact cu o probabilitate care poate fi deliberat aleasă. Limitele respective definesc intervalul de încredere [116]. Firește, concluziile obținute prin inducție statistică nu sunt legități absolut sigure, însă gradul de incertitudine se poate calcula. Cunoșcând gradul de incertitudine al concluziilor obținute, metoda statistică de cercetare poate fi considerată o metodă matematică exactă [117].

Deci, cercetarea statistică pornește de la observarea unităților colectivității statistice după diferite caracteristici, materializată în strângerea datelor de bază și se continuă cu prelucrări și analize succesive care legitimează concluziile statistice. Aplicarea legilor matematicii statistice asupra datelor empirice obținute prin observarea statistică a colectivității, care a fost supusă cercetării, permite desprinderea unor concluzii importante. Aceste legi acționează numai la nivelul colectivității, exprimând comportamentul ansamblului de unități și nu a fiecărei unități în parte [118].

Modelarea experimentală sau modelarea statistică, spre deosebire de modelarea analitică care se realizează, de obicei, în faza de proiectare, este indicată pentru determinarea modelelor instalațiilor automatizate în funcțiune. Aceasta are în vedere atât cercetarea teoretică a fenomenelor ce guvernează procesul considerat cât și experimente pentru confirmarea ipotezelor teoretice privind structura modelelor și apoi determinarea parametrilor. Modelele analitice se dovedesc utile pentru determinarea structurii, însă ele nu sunt indicate pentru determinarea parametrilor. Determinarea prin calcul a valorilor parametrilor din ecuațiile modelului analitic presupune cunoașterea cu precizie a unui număr mare de date, care se referă la dimensiuni geometrice, constante de materiale, constante termofizice, etc. În acest caz modelarea analitică devine practic imposibilă și este necesar să se recurgă la metode experimentale [119-121].

Cu alte cuvinte, elaborarea experimentală a modelului matematic se impune fie când fenomenul sau procesul este insuficient cunoscut, fie când el este prea complex și se dorește un model mai simplu, bazat pe prelucrarea datelor experimentale [122]. Aceste date reprezintă valori simultane pe care le au mărimile de intrare și de ieșire ale procesului modelat. Experiența a arătat că o astfel de

abordare conduce întradevăr la modele simple, însă proiectarea experimentului pentru culegerea datelor nu este în nici un caz o problemă ușoară.

Identificarea, analizată prin prisma teoriei sistemelor, poate fi definită ca fiind determinarea, pe baza unor seturi de valori ale mărimilor de intrare și a celor de ieșire, a încadrării unui sistem într-o clasă de sisteme față de care acesta este echivalent [123-125].

Modelarea experimentală are în vedere următoarele [121]:

- planificarea și efectuarea experimentului;
- interpretarea rezultatelor experimentale;
- determinarea modelului din datele experimentale;
- validarea modelului.

De cele mai multe ori este avantajoasă cuplarea modelării analitice cu cea experimentală. Ori de câte ori este posibil, identificarea mixtă este de preferat datorită posibilităților practic nelimitate de utilizare a programelor de calcul automat.

În figura I.22 [105] se prezintă schema logică referitoare la corelarea dintre cunoștințele analitice și cele obținute pe bază de experiment în elaborarea modelului matematic.

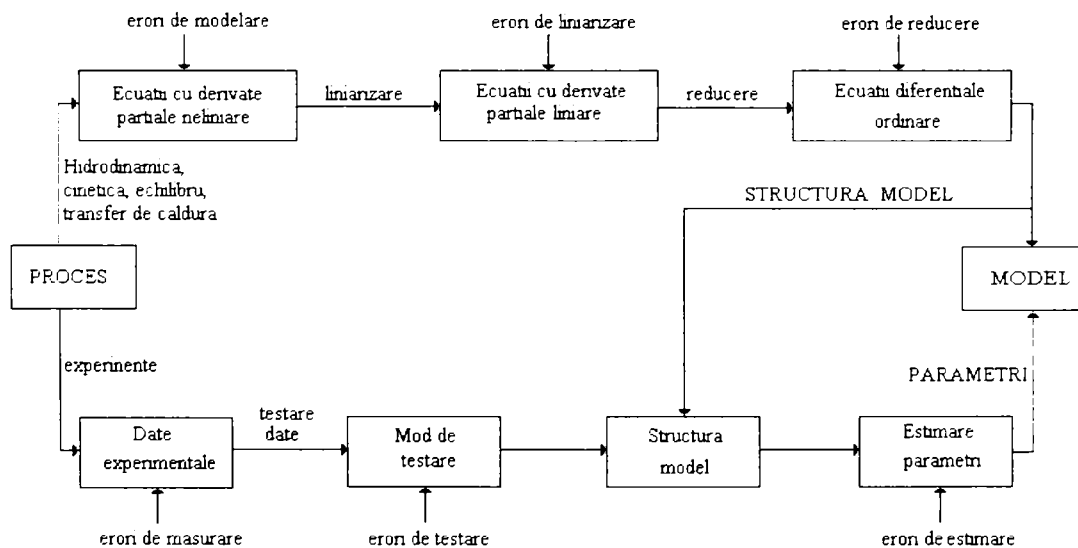


Figura I.22. Schema logică referitoare la corelarea cunoștințelor teoretice și experimentale în scopul elaborării modelului matematic

Pe baza legilor fizico-chimice ce guvernează fenomenul sau procesul, se stabilește structura modelului (forma ecuațiilor care descriu relațiile dintre variabilele procesului). În cazul în care structura este prea complexă pentru scopul pentru care a fost construit modelul, se trece la liniarizarea și reducerea ecuațiilor cu derivate parțiale [126-128]. O astfel de necesitate poate apărea în cazul conducerii procesului cu calculatorul. Dacă se utilizează un model prea complex, calculatorul ar pierde prea mult timp cu soluționarea ecuațiilor, soluția fiind obținută prea târziu, astfel în proces putând avea loc între timp alte evoluții [129, 130].

Coeficienții ecuațiilor se vor determina prin prelucrarea datelor obținute experimental. Datele experimentale trebuie să supună mai întâi unui proces de validare în vederea eliminării seturilor care au fost afectate de erori (determinarea bilanșurilor de materiale și termice – în cazul în care este vorba de regim staționar, teste statistice, etc.).

În primul rând trebuie luată în considerare eroarea de măsurare. Ideal ar fi ca eroarea de măsurare să nu fie proporțională cu mărimea măsurată, în acest caz putând introduce în model un termen aditiv de eroare. În cazul când eroarea reprezintă chiar variația naturală în evoluția variabilei dependente, este clar că un termen aditiv pentru eroare nu-și mai are sensul, preferabil fiind un factor multiplicativ [131].

Pe baza structurii stabilite pentru ecuațiile modelului și pe baza datelor experimentale validate, se trece la determinarea parametrilor modelului. Prin estimare se urmărește ca diferența între valorile mărimilor de ieșire în cazul procesului și modelului să fie cât mai mică. Se folosesc criterii de eroare cum ar fi eroarea medie pătratică. Un astfel de model este valabil doar în limitele în care au fost modificați parametrii.

Elemente matematice ale modelării experimentale

Elaborarea modelelor experimentale se bazează pe corelarea statistică a datelor concrete obținute în timpul experimentului. Valabilitatea acestor modele este limitată de domeniul în care au fost modificate variabilele. Funcția de eroare depinde de mărimile de ieșire ale procesului și modelului (y și respectiv y_m):

$$F_{er} = F_{er}(y, y_m) \quad (I.85)$$

În general, etapele din metodologia de elaborare a modelului sunt următoarele [104]:

- stabilirea structurii modelului;
- organizarea și realizarea experimentărilor pe instalația reală;
- interpretarea și prelucrarea rezultatelor;
- deducerea formei finale a ecuațiilor modelului și calculul coeficienților din ecuații (parametrii modelului);
- verificarea modelului.

În cazul în care cunoștințele disponibile despre proces nu permit stabilirea structurii modelului, această operație se face în cadrul etapei de deducere a modelului. Informații cu privire la structură pot fi obținute prin examinarea unui model analitic al procesului. Întrucât obținerea datelor este afectată de erori, în modelul experimental este introdusă o anumită incertitudine, fapt ce îi conferă un caracter probabilistic.

În continuare se va aborda problematica modelării statistice în regim staționar recurgând la următoarele etape [88]: inventarierea variabilelor, alegerea formei modelului, obținerea și testarea datelor, determinarea coeficienților modelului, testarea și aprecierea calității modelului.

Inventarierea variabilelor

Întrucât variabilele ne semnificative se pot elimina, este recomandabilă o oarecare larghețe în alegerea lor. Creșterea numărului de variabile face necesară, pentru același nivel de încredere în model, creșterea numărului de date experimentale. Cel mai sigur mod de a nu greși este examinarea unui model bazat pe ecuații de conservare (a unui model analitic) [105].

Alegerea formei modelului

În cazul elaborării unui model matematic pentru regim staționar, forma de bază a modelului este cea a unui sistem de ecuații algebrice [105].

Obișnuit, stabilirea numărului de ecuații se face pe baza împărțirii variabilelor în dependente (de ieșire) și independente (de intrare). Această împărțire este adesea legată de experiență și de bun simț tehnic. Împărțirea se poate face și pe baza unui model dedus analitic.

Dacă u_1, u_2, \dots, u_m sunt variabile independente (de intrare) și y_1, \dots, y_k sunt variabilele dependente (de ieșire), pentru forma relațiilor de tipul:

$$y_j = f_j(u_1, u_2, \dots, u_m); \quad j=1, \dots, k \quad (\text{I.86})$$

nu se pot indica reguli fixe (aceste relații constituie modelul matematic).

În cazul în care există o singură variabilă independentă, reprezentarea grafică a datelor experimentale poate să sugereze o anumită formă a ecuației [88].

Stabilirea formei ecuațiilor se mai poate face și prin analiza dimensională. În mod arbitrar, se poate alege pentru exprimarea dependenței o formă polinomială:

$$y(u_1, u_2, \dots, u_m) = a_0 + a_1 \cdot u_1 + \dots + a_m \cdot u_m + a_{11} \cdot u_1^2 + a_{12} \cdot u_1 \cdot u_2 + \dots + a_{1m} \cdot u_1 \cdot u_m + \dots + a_{mm} \cdot u_m^2 + \dots \quad (\text{I.87})$$

Alegerea unei forme de tipul ecuației (I.87) este justificată de faptul că, în principiu, ea corespunde unei dezvoltări în serie trunchiată (de exemplu serie Taylor) a dependenței reale $y(u_1, u_2, \dots, u_m)$.

Avantajul principal al formei (I.87) îl constituie liniaritatea în raport cu coeficienții modelului ($a_1, \dots, a_m, a_{11}, \dots, a_{1m}, \dots, a_{mm}$).

Obținerea și testarea datelor

Experimentele trebuie să se desfășoare astfel încât [88, 105]:

- numărul datelor experimentale să fie suficient de mare pentru a putea determina coeficienții modelului;
- experimentele să fie astfel distribuite încât să acopere în mod uniform domeniul de variație al variabilelor;
- precizia determinărilor să fie corespunzătoare cerințelor impuse modelului.

Testarea și interpretarea datelor experimentale poate include aspecte referitoare la urmărirea reproductibilității datelor, verificarea omogenității dispersiilor și a normalității distribuțiilor, respectarea ecuațiilor de conservare (bilanț de materiale, termic) în cadrul fiecărui experiment, reconcilierea datelor de operare, reconciliere ce poate implica corectarea datelor preluate din instalație minimizând erorile în raport cu clasa de precizie a sistemelor de măsurare și evaluarea valorilor mărimilor nemăsurate [123].

Determinarea coeficienților modelului experimental

Utilizarea analizei de regresie în inginerie urmărește prelucrarea datelor experimentale în vederea determinării valorilor parametrilor unor modele matematice bazate pe relații de aproximare. Modelele matematice obținute prin aplicarea analizei de regresie sunt denumite ecuații de regresie [132, 133]. Ecuațiile de regresie obținute sunt supuse ulterior analizei statistice în scopul verificării – semnificației coeficienților și a adecvănței ecuației de regresie.

În continuare sunt prezentate metode de determinare a coeficienților modelului:

Estimatorul celor mai mici pătrate (metoda celor mai mici pătrate)

Aplicarea estimatorului celor mai mici pătrate impune variabilelor de intrare și celor de ieșire o serie de condiții (regim staționar, mărimile de intrare nu sunt variabile aleatoare și sunt reciproc independente, iar cele de ieșire sunt variabile aleatoare de repartiție normală și cu dispersie constantă) a căror îndeplinire trebuie testată. O utilizare corectă a metodei celor mai mici pătrate implică de asemenea o repartizare uniformă a valorilor variabilelor independente în domeniul lor de definiție și un număr însemnat de date experimentale [121].

Există următoarele tipuri de analiză de regresie:

a) Analiza de regresie cu o singură variabilă independentă – cazul dependenței liniare

Pentru un proces cu o intrare u și o ieșire y , informații preliminare (fie un model analitic, fie reprezentarea grafică a datelor experimentale) au dus la concluzia că dependența dintre y și u este liniară:

$$y = a_0 + a_1 \cdot u \quad (I.88)$$

Se presupune că măsurând concomitent intrarea și ieșirea s-a obținut următorul set de date: $(u_1, \hat{y}_1), \dots, (u_n, \hat{y}_n)$.

Conform metodei celor mai mici pătrate, suma pătratelor abaterii valorilor măsurate \hat{y}_i de la valorile y_i calculate pe baza relației (I.88) trebuie să fie minimă:

$$\begin{aligned} F(a_0, a_1) &= [\hat{y}_1 - (a_0 + a_1 \cdot u_1)]^2 + \dots + [\hat{y}_n - (a_0 + a_1 \cdot u_n)]^2 = \\ &= \sum_{i=1}^n [\hat{y}_i - (a_0 + a_1 \cdot u_i)]^2 = \min. \end{aligned} \quad (I.89)$$

Estimarea coeficienților se realizează punând condiția de minim pentru funcția F : derivatele parțiale în raport cu coeficienții a_0, a_1 se egalează cu zero.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(a_0, a_1)}{\partial(a_0)} &= -2 \cdot \left[n \cdot a_0 + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n u_i - \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \right] = 0 \\ \frac{\partial F(a_0, a_1)}{\partial(a_1)} &= -2 \cdot \left[a_0 \cdot \sum_{i=1}^n u_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^n u_i^2 - \sum_{i=1}^n u_i \cdot \hat{y}_i \right] = 0 \end{aligned} \quad (I.90)$$

Rezultă următoarea relație (I.91), prin a cărei rezolvare se obțin coeficienții a_0 și a_1 .

$$\begin{bmatrix} n & \sum u_i \\ \sum u_i & \sum u_i^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \hat{y}_i \\ \sum u_i \cdot \hat{y}_i \end{bmatrix} \quad (I.91)$$

b) Analiza de regresie cu o singură variabilă independentă – cazul dependenței neliniare

În această situație se pot întâlni două cazuri:

Caz 1 – dependența nu este liniară, dar este liniarizabilă.

$$y = k \cdot e^{a \cdot u} \tag{I.92}$$

Prin logaritmare, relația (I.92) devine liniară, iar coeficienții se obțin prin rezolvarea sistemului (I.91), unde $a_0 = \ln(k)$, iar $a_1 = a$.

Caz 2 – dependența dintre y și u nu este liniarizabilă.

$$y = a_0 + a_1 \cdot u + a_2 \cdot u^2 \tag{I.93}$$

Pentru calculul coeficienților modelului se poate aplica tot metoda celor mai mici pătrate:

$$F(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left[\hat{y}_i - (a_0 + a_1 \cdot u_i + a_2 \cdot u_i^2) \right]^2 = \min. \tag{I.94}$$

Egalând cu zero derivatele parțiale în raport cu coeficienții a_0 , a_1 și a_2 după aranjarea termenilor, se obține sistemul (I.95) (scris matricial) a cărui rezolvare conduce la obținerea coeficienților modelului a_0 , a_1 și a_2 .

$$\begin{bmatrix} n & \sum u_i & \sum u_i^2 \\ \sum u_i & \sum u_i^2 & \sum u_i^3 \\ \sum u_i^2 & \sum u_i^3 & \sum u_i^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \hat{y}_i \\ \sum u_i \cdot \hat{y}_i \\ \sum u_i^2 \cdot \hat{y}_i \end{bmatrix} \tag{I.95}$$

c) Analiza de regresie multiplă

Cazul cel mai general al modelării statice este cazul procesului cu mai multe intrări u_1, \dots, u_m și o singură ieșire y .

Dacă ecuația (I.96) descrie modelul matematic (o ieșire și m intrări),

$$y = a_0 + a_1 \cdot u_1 + \dots + a_m \cdot u_m \tag{I.96}$$

determinarea coeficienților a_0, \dots, a_m se efectuează minimizând suma abaterilor pătratice ale valorilor măsurate ale ieșirii \hat{y}_i față de cele calculate pe baza ecuației, conform (I.97).

$$F(a_0, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \min. \tag{I.97}$$

Dacă U este matricea valorilor măsurate ale variabilelor de intrare și Y este vectorul valorilor măsurate ale variabilei de ieșire:

$$U = \begin{bmatrix} 1 & u_{11} & u_{21} & \dots & u_{m1} \\ 1 & u_{12} & u_{22} & \dots & u_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & u_{1n} & u_{2n} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \dots \\ \hat{y}_n \end{bmatrix} \tag{I.98}$$

atunci vectorul parametrilor modelului se calculează pe baza relației:

$$A = (U^T \cdot U)^{-1} \cdot U^T \cdot Y \tag{I.99}$$

Utilizarea corectă a estimatorului celor mai mici pătrate implică o repartizare uniformă a valorilor variabilelor independente în domeniul lor de definiție și un număr însemnat de date experimentale.

În cazul în care structura modelului este neliniară în raport cu parametrii, punând din nou condiția de minim a sumei abaterilor pătrăte ale valorilor măsurate față de cele calculate pe baza ecuației de regresie, se obține un sistem de ecuații algebrice neliniare. Rezolvarea unor astfel de sisteme este posibilă numeric utilizând tehnici specifice [134-136]: algoritmul Newton-Raphson, algoritmul Broyden, etc.

Estimatorul generalizat al celor mai mici pătrate. Alți estimatori

Între premisele care stau la baza estimatorului celor mai mici pătrate este și aceea că dispersia σ^2 este constantă (eroarea în determinarea variabilei dependente y nu depinde de valoarea ei absolută).

Dacă dispersia lui y depinde de valoarea sa absolută, pentru a lua în considerare acest lucru, se poate introduce o mărime w care să cuantifice importanța punctelor luate în calcul. Pentru calculul parametrilor modelului, în cazul unui sistem liniar monovariabil, trebuie minimizată funcția:

$$F(a_0, a_1) = \sum_{i=1}^n [\hat{y}_i - (a_0 + a_1 \cdot u_i)]^2 \cdot w_i = \min. \quad (I.100)$$

Se ajunge astfel la estimatorul cel mai mici pătrate generalizate. În cazul regresiei multiple, valoarea parametrilor modelului se obține din următoarea ecuație matriceală (W este matricea „importanțelor”):

$$A = [U^T \cdot W \cdot U]^{-1} \cdot U^T \cdot W \cdot Y \quad (I.101)$$

Estimatorul celor mai mici pătrate recursiv este un estimator secvențial: vectorul parametrilor modelului se obține ca o combinație liniară între estimația anterioară și un termen de corecție care depinde de eroarea dintre ultima măsurătoare și valoarea estimată a acesteia (se pornește fie cu un set de valori de start, fie primele seturi de date sunt utilizate pentru a obține vectorul start – de exemplu cu ajutorul estimatorului generalizat al celor mai mici pătrate – după care estimarea decurge secvențial) [134, 135].

Alți estimatori, cum ar fi cel al verosimilității maxime și Bayes, impun definirea densității de probabilitate a lui y condiționată de parametrii modelului și respectiv densitatea de probabilitate a parametrilor înșiși.

Testarea și aprecierea calității modelului

Valoarea unui model este dată de măsura în care predicțiile sale concordă cu realitatea. Dar stabilirea adecvanței unui model la realitate este deosebit de complexă. Încă din etapele de elaborare a modelului este necesar să se mențină un echilibru rațional între precizia cerută modelului și cea a informațiilor primare de care se dispune. Se caută ca rezultatul modelului să aibă gradul de precizie al datelor care se introduc în model. La nivelul de cunoaștere atins astăzi în studiul sistemelor există posibilitatea dezvoltării mult mai riguroase decât precizia datelor care se utilizează și care provin din experiențe sau din formule aproximative. Modelul ridică de multe ori probleme interesante din punct de vedere strict matematic, dar lipsite de semnificație pentru procesul concret studiat. Orice model conține un anumit număr de parametri ce trebuie estimați pentru a compara predicțiile cu datele empirice. Este important ca parametrii modelelor să fie studiați în condiții apropiate de cele existente în natură sau în sistemele reale. Precizia cu care trebuie determinați parametrii depinde și de influența lor în model. Dacă un model conține parametri care nu pot fi estimați, el trebuie modificat astfel încât să devină verificabil.

După calcularea parametrilor modelului, este necesar să se efectueze o comparație între prezicerile modelului și datele furnizate de procesul real.

Adecvanța globală a modelului reprezintă capacitatea modelului identificat (cu structură precizată și parametri identificați) de a reprezenta datele experimentale cu o suficientă precizie în raport cu precizia (eroarea) experimentală [137].

Dacă modelul este adecvat, el poate fi acceptat cu condiția să nu poată fi simplificat, de pildă prin eliminarea unor termeni sau variabile (este necesară testarea semnificației coeficienților).

Drept indicatori ai adecvănței modelului se pot folosi:

Testul F al lui Fischer

În limbajul statisticii matematice, testul F sau criteriul F arată că pe baza unui număr mic de observații trebuie comparate dispersiile, S_e a două probe [138, 139].

Criteriul Fischer, F_c se calculează cu expresia $F_c = \frac{S_{e,\max}^2}{S_{e,\min}^2}$, dintre cea mai

mare (maximă) și cea mai mică (minimă) dispersie. În funcție de gradele de libertate ale celor două teste, în cazul unui nivel de încredere $P=95\%$, din tabele din literatura de specialitate se află valoarea criteriului Fischer (F_T).

Se compară criteriul Fischer calculat, F_c cu criteriul Fischer tabelat, F_T . Dacă:

- $F_c < F_T$ – dispersiile sunt omogene, nu diferă semnificativ;
- $F_c > F_T$ – dispersiile sunt neomogene, se consideră că dispersia maximă corespunde unui test eronat și aceasta se reface. Se testează dispersia imediat inferioară celei maxime ș.a.m.d., până se obține $F_c < F_T$ [117].

Testul Fischer se utilizează și pentru modele matematice cu o singură variabilă dependentă (y) și mai multe independente (x), dacă eroarea experimentală (considerată constantă) este necunoscută, dar evaluabilă din n_e experiențe replicate [139]:

$$\sigma^2 \approx E(S_e^2) \quad S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_e} (y_i - \bar{y})^2}{n_e - 1} \quad (I.102)$$

unde: E reprezintă media variabilei repartizate statistic, iar S_e^2 dispersiile valorilor variabilelor față de mediile lor aritmetice.

Testul Fischer se utilizează pentru modele matematice cu o singură variabilă dependentă (y) și mai multe independente (x), dacă eroarea experimentală σ^2 (considerată constantă) este necunoscută dar evaluabilă din n_e experiențe replicate.

Dispersia de adecvănță, σ^2 :

- pentru o singură variabilă independentă și n determinări:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_{i\text{calc}})^2}{n - 1} \quad (I.103)$$

- pentru m variabile independente și pentru n determinări:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_{icalc})^2}{n - m - 1} \quad (I.104)$$

Deviația standard (deviația medie pătratică), σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_{icalc})^2}{n - 1}} \quad (I.105)$$

Indicatorul preciziei modelului, R^2 :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{icalc} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (I.106)$$

Coeficientul de corelare multiplă, R :

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_{icalc})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}} \quad (I.107)$$

unde:

- n - numărul de seturi de date (determinări),
- y - variabila dependentă,
- y_{icalc} - valoarea rezultată pentru y pe baza ecuației de regresie,
- \hat{y}_i - valoarea experimentală,
- \bar{y} - valoarea medie.

Coeficientul de corelare multiplă reprezintă o măsură a capacității globale a modelului de a reprezenta datele experimentale, chiar dacă pe porțiuni modelul este mai puțin adecvat. Acest coeficient trebuie să fie mai mare de 90%, fiind recomandabilă utilizarea numai împreună cu alte teste de adecvanță pentru model și calitatea estimatului.

Dacă modelul nu este adecvat, se pot lua următoarele decizii [88]:

- care nu implică schimbarea formei modelului (completarea datelor experimentale, modificarea intervalului de variație al factorilor, etc.);
- care implică schimbarea formei modelului și reluări ale determinărilor experimentale.

Calitatea unui model este exprimată, în primul rând, de fidelitatea cu care modelul reproduce comportamentul cunoscut al sistemului modelat. Comportamentul modelului este relevant prin funcționare, deci în cadrul operațiilor conexe modelării, care țin de simulare [5, 140].

Fidelitatea depinde de următoarele [5]:

- corectitudinea cu care s-a efectuat aprecierea a ceea ce este esențialul, relevant pentru scopul urmărit;
- procedeele de constituire a modelului;
- calitatea și cantitatea cunoștințelor disponibile care au putut fi și utilizate.

Cele de mai sus se pot constitui în criterii de fidelitate, cu ajutorul cărora pot fi diferențiate calitativ modelele unui sistem sursă. Calitatea unui model mai este determinată și de alte aspecte: simplitate, inteligibilitate, costul, etc.

I.2.5. Simularea

Modelarea și simularea constituie un complex de activități asociate în construirea modelelor sistemelor reale și simularea lor cu ajutorul calculatorului electronic. Astfel, în procesul de simulare sunt implicate trei elemente importante, și anume [4, 141]:

- sistemul real;
- modelul;
- calculatorul.

În figura I.23 [141] este ilustrată schema logică generală a simulării.

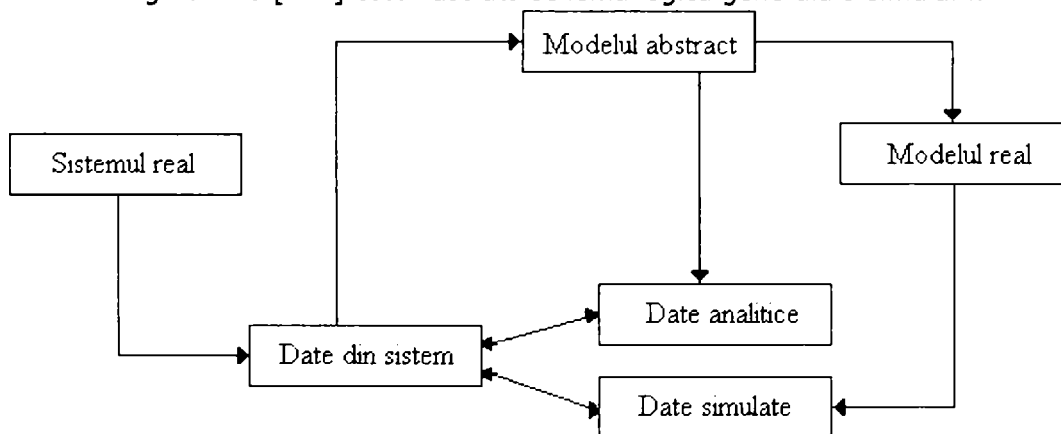


Figura I.23. Schema logică generală a simulării

Simularea poate fi definită ca fiind o tehnică de realizare a experimentelor, reprezentarea unui proces fizic sau doar conceptual, cu ajutorul calculatorului numeric, ce implică realizarea unor modele matematice logice ce descriu comportarea sistemului real sau a unor componente ale sale, cu scopul precis de a obține informații în ceea ce privește comportarea lui [141-143].

Procesul de simulare, ca și alte metode ale cercetării operaționale, presupune parcurgerea următoarelor faze [4]:

- Formularea problemei, care de cele mai multe ori se confundă cu formularea obiectivului atașat unei descrieri, adesea destul de vagi, a condițiilor de funcționare a procesului studiat;

- Construirea modelului, care implică identificarea relațiilor dintre parametrii definitori ai procesului și exprimarea obiectivului în funcție de acești parametrii.
- Validarea modelului și determinarea clasei sale;
- Căutarea unei soluții care să satisfacă restricțiile funcționale reprezentate în model și care să conducă la calitatea cerută funcției obiectiv (valoarea maximă sau minimă sau într-o plajă de valori prestabilită);
- Implementarea soluției determinate ca satisfăcătoare.

Avantajele simulării constau în faptul că se pot face experiențe pe un model ce este o reprezentare simbolică a sistemului. Tocmai de aceea simularea se remarcă, și este de preferat utilizarea ei, datorită faptului că experimentarea unor variante de decizie direct pe sistemul real nu este cea mai potrivită cale de a încerca eficacitatea acestor variante, din mai multe motive, printre care durata și costul experimentării ce pot atinge valori mari. Totodată, sistemele reale nu pot fi studiate în mod direct, fie din cauza dificultăților de evaluare calitativă sau cantitativă a fenomenelor, fie din cauza complexității acestora.

Consecințele unor experimente reale, fără aplicarea simulării, pot fi cu totul necunoscute. Intervenția directă asupra sistemului experimentat poate avea rezultate nesatisfăcătoare dacă varianta încercată nu a fost prea inspirată, revenirile și anihilarea acestor rezultate fiind de cele mai multe ori imposibile sau foarte costisitoare. În plus, cel mai adesea, sub presiunea timpului se pot încerca diferite căi de acțiune fără ca aceasta să nu modifice însuși problema ce trebuie rezolvată, prin ireversibilitatea unor transformări în sistemul studiat [4].

Toate acestea sunt argumente pentru folosirea modelelor în pregătirea deciziilor, alegând pentru fiecare caz în parte tipul adecvat de model.

Datorită simulării este posibilă obținerea unor detalii despre sistemele studiate, a unor adevărate instantanee privind comportarea la diferite momente și în variate condiții în care utilizatorul consideră modelul, bineînțeles ținându-se cont de cadrul experimental pentru care a fost dedus modelul matematic. Totodată trebuie subliniat faptul că, în general, simularea nu oferă soluția optimă pentru problema de decizie, ci doar tabloul rezultatelor ce s-ar obține ca urmare a variantelor utilizate [144].

Dacă modelarea matematică ne conduce la modele al căror studiu poate fi făcut analitic, permițând în aceste condiții determinarea cu destulă exactitate a variantei de decizie ce trebuie utilizată, simularea oferă o imagine ce reprezintă prelungirea în spațiu și timp a desfășurării unui proces ale cărui coordonate definitorii se consideră cunoscute cel puțin statistic din trecut și care se presupune a funcționa cel mai adesea în regim regulat sau staționar, adică fără modificări consistente ale caracteristicilor de bază [4, 141, 145].

În concluzie, simularea trebuie înțeleasă ca o imitare a comportării sistemului real, reprezentat prin modelul său, obiectul simulării fiind asigurarea că mijlocul de calcul reproduce cu fidelitate comportamentul indus de model. Trebuie adăugat și faptul că multe dintre tehnicile folosite la validarea modelelor sunt de asemenea utilizate și la verificarea simulărilor [5, 140].

Printre principalele avantaje ale metodelor de simulare se remarcă următoarele [141]:

- se pot studia sisteme de orice complexitate;
- pe modelele de simulare condițiile unui experiment se pot controla mai ușor decât pe sistemul real;
- timpul este condensat în cazul simulării, câștigând în câteva minute

- experiență care altfel ar putea dura ani;
- un experiment cu un model de simulare este, în general, mai ieftin decât o experimentare pe sistemul real;
- un experiment cu un model de simulare nu bruiază sistemul real;
- modelele de simulare dau o imagine mai concludentă decât modelele matematice;
- în timpul simulării se pot schimba cu ușurință unii parametrii, spre deosebire de experimentarea pe sistemul real, noile aspecte apărute putând fi luate rapid în considerare.

De asemenea, simularea prezintă și o serie de dezavantaje, cum ar fi [141]:

- prin definiție, modelul de simulare este mai simplu decât realitatea pe care o reprezintă și, de aici, pericolul de a neglija unele aspecte esențiale;
- prin simulare nu se pot oferi soluții foarte precise, acolo unde ele sunt absolut necesare fiind preferate metodele analitice;
- când se începe studiul unui model de simulare nu se știe precis dacă simularea va produce rezultatele scontate;
- simularea nu poate da un rezultat optim și nu prezintă garanția unei soluții optime, aceasta datorându-se faptului că metoda simulării este o metodă euristică ce răspunde doar la întrebarea „Ce se întâmplă dacă...?”.

I.3. Măsurarea și erorile de măsurare

I.3.1. Importanța și scopul teoriei erorilor de măsurare

Problema aproximărilor, erorilor și deci a preciziei legate de calculul numeric a prezentat dintotdeauna o importanță deosebită în inginerie, știință și matematica aplicată. O recunoaștere a acestui fapt este și aceea că toate lucrările de bază din domeniile amintite acordă atenția cuvenită preciziei calculelor.

Activitatea concretă a omului nu poate fi imaginată fără soluționarea de probleme, presupunând aspecte de aproximare, de erori și de precizie. Toate aceste aspecte au câștigat în importanță o dată cu dezvoltarea și utilizarea calculatorului în toate domeniile de activitate umană.

Fără a neglija importanța soluțiilor analitice oferite de matematică, cele mai multe probleme de inginerie în general, și în particular cele de inginerie chimică, nu cunosc decât soluții numerice. În activitatea concretă de calcul al soluțiilor numerice utilizatorul tehnicii de calcul moderne este obligat să țină seama de problemele privitoare la aproximare și erori, de influența acestora asupra preciziei rezultatelor obținute [133].

Informațiile care constituie baza concretă de date necesară rezolvării unor probleme provin din observațiile de măsurare efectuate asupra unor mărimi cu care se lucrează frecvent. Calitatea informațiilor obținute din măsurători este funcție directă de volumul observațiilor și precizia aparatelor și instrumentelor de măsurat. Se impune așadar, ca pornind de la scopul pentru care sunt efectuate măsurătorile să se stabilească valorile corespunzătoare ca mărime și ca precizie, luând însă în considerare aspectul economic referitor la volumul observațiilor, necesar și suficient, care se impune. Teoria erorilor de măsurare sau teoria prelucrării măsurătorilor intervine cu succes și rezolvă favorabil aceste aspecte [146].

Dacă o mărime se măsoară de mai multe ori, de fiecare dată se obține o altă valoare chiar dacă măsurătorile se desfășoară în aceleași condiții de către același operator și cu instrumente de mare precizie. Cauza acestor nepotriviri de valori se datorește erorilor care afectează întotdeauna o măsurătoare, făcând ca valoarea adevărată a mărimii măsurate să nu poată fi cunoscută niciodată.

Practic neputând fi determinată valoarea adevărată a mărimii măsurate se determină o valoare apropiată de cea adevărată într-un grad mai mare sau mai mic funcție de scopul pentru care se execută măsurătorile. Aproximarea mărimii determinate față de valoarea adevărată a acesteia caracterizează precizia determinării. Ca urmare, prelucrarea măsurătorilor efectuate asupra unei mărimi urmărește obținerea celei mai bune valori a acesteia și a diferenței minime între valoarea determinată și valoarea adevărată.

Găsirea unei soluții optime pentru o operație de măsurare nu este o problemă simplă deoarece trebuie luate în considerare o serie de factori. Cel mai important este însă criteriul dat de eroarea de măsurare care determină cerințele economice și tehnice puse în fața instrumentului de măsurare. Deoarece eroarea de măsurare de obicei nu se impune ca o cerință minimală ci are mai mult caracterul unui criteriu de calitate care exprimă utilizabilitatea unui rezultat se poate formula regula de bază a tehnicii măsurărilor: „Nu trebuie măsurat atât de exact cât este posibil, ci cât este necesar.”, cu alte cuvinte, cerințele de precizie puse în fața unei probleme de măsurare sunt determinate atât de considerente tehnice cât și de considerente economice [147, 148].

I.3.2. Considerații generale privind procesul de măsurare

Măsurarea este prin excelență o activitate umană. În sensul cel mai general prin măsurare se caută obținerea unei informații de un caracter deosebit – informația de măsurare – de la obiectul, fenomenul sau procesul investigat [147].

Măsurarea este operația de evaluare cantitativă a unei mărimi pe cale experimentală, prin compararea directă sau indirectă cu o mărime de aceeași natură ce reprezintă un reper dintr-o scară [149, 150].

Cu alte cuvinte, mărimii de măsurat M îi corespunde un multiplu M_m al unității de măsură U [141, 150].

$$M = M_m \cdot U \quad (I.108)$$

Ecuția (I.108) reprezintă ecuația fundamentală a măsurării.

Prin mărime se înțelege o anumită proprietate, caracteristică sau atribut al unui material, fenomen sau proces, care este bine definit și care poate varia cantitativ.

Mărimea de măsurat este un parametru fizic care poate fi evaluat prin măsurare, comparare sau reperare, exprimându-se întotdeauna sub formă numerică.

Unitatea de măsură este mărimea care servește ca măsură de bază pentru toți parametrii de același fel. Materializarea fizică a unității de măsură este etalonul.

O mărime poate fi considerată principal măsurabilă dacă sunt îndeplinite următoarele două premise fundamentale:

- mărimea să fie observabilă (condiție necesară);
- pentru mărimea respectivă poate fi construită o scală de măsurare (condiție suficientă) [147].

O mărime principal măsurabilă devine practic măsurabilă dacă pentru aceasta a fost construită o scală adecvată de măsurare și au fost create condițiile necesare realizării practice a observabilității, ceea ce în cazul măsurătorilor instrumentale înseamnă existența unor traductoare capabile să preleveze un semnal purtător al informației de măsurare.

Pentru a putea efectua măsurarea cele două premise fundamentale devin:

- mărimea de măsurat trebuie să fie definită univoc; ea trebuie să constituie o mulțime ordonabilă, adică o mulțime în care să se poată defini relațiile de egal, mai mic și mai mare, între elementele ei;
- unitatea de măsură trebuie să fie stabilită printr-o convenție, astfel încât să poată fi determinată cu precizie, reprodusă și păstrată cu ușurință [147].

În conformitate cu cele de mai sus, considerând măsurandul o mulțime de definiție, finită sau infinită, $\{M\}$ ale cărei elemente $M_j \in \{M\}$ corespund stărilor posibile în care se poate găsi caracteristica ce constituie obiectul măsurării, se poate introduce următorul model matematic al procesului de măsurare. Dacă $\{Y\}$ este o mulțime de numere reale care permite ca prin intermediul unor proceduri speciale – proceduri de scalare – să se evidențieze una sau mai multe funcții de scalare (f), având proprietatea că fiecărui element $M_j \in \{M\}$ să îi pună în corespondență un anumit $Y_j \in \{Y\}$, atunci procesul propriu-zis de măsurare constă în identificarea corespondentului M_j prin funcția f . Informația de măsurare este deci un tip specific

de informație, conținând rezultatul identificării unui măsurand prin intermediul unei funcții scalare adecvate [147].

Se poate afirma că rolul tehnicii măsurărilor nu se rezumă doar la obținerea unor informații cantitative cu privire la procesele examinate ci are un rol important și în procesul cunoașterii propriu-zise, contribuind la stabilirea unor legități exprimate sub formă matematică.

Procesul de măsurare definit conform relației (I.108) se poate reprezenta în mod idealizat printr-o schemă bloc (figura I.24) din care rezultă că neglijând influențele parazite, valoarea măsurată sau rezultatul măsurării este influențat doar de măsurand și etalon.

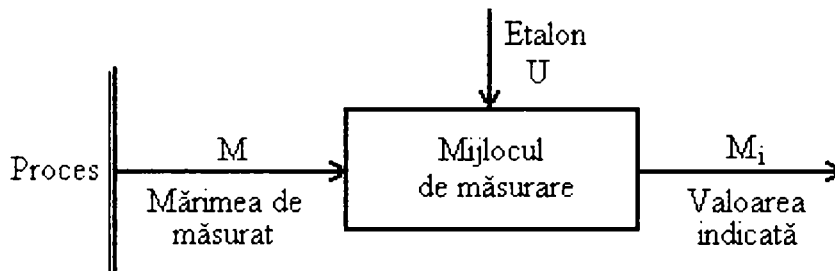


Figura I.24. Schema bloc pentru operația de măsurare ideală

În figura I.25 este prezentată schema bloc a unui sistem de măsurare real [151].

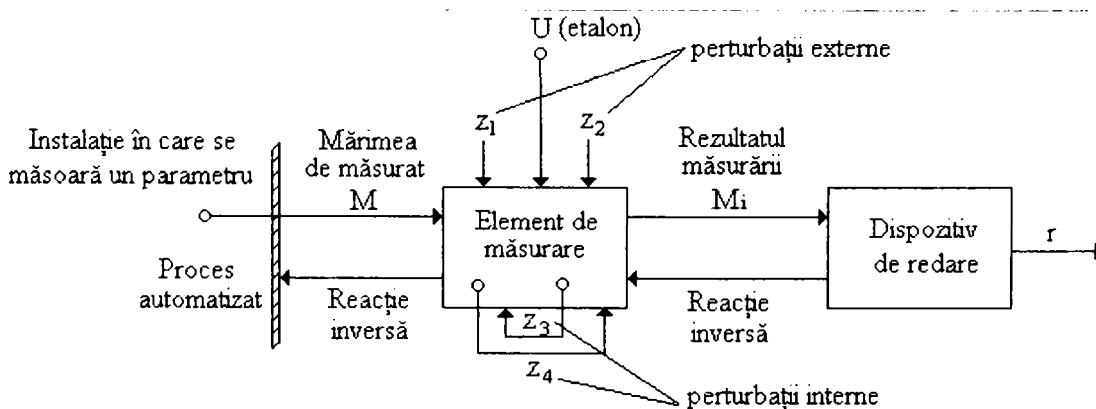


Figura I.25. Schema bloc a unui sistem de măsurare real

Informația despre mărimea de măsurat, caracteristică unui proces oarecare este prelucrată în instalația de măsurare și redată de dispozitivul de indicare.

Stabilirea corespondenței dintre valoarea măsurandului și unitatea de măsură se face cu ajutorul unui mijloc de măsurare, care poate fi definit ca fiind un mijloc tehnic pentru obținerea, prelucrarea, transmiterea și stoparea unor informații de măsurare, permițând obținerea unei informații dependente de mărimea de măsurat, accesibilă simțurilor noastre sau compatibilă cu anumite sisteme de prelucrare a datelor [152, 153].

Instrumentul de măsurare cuprinde totalitatea elementelor conectate în cadrul lanțului de măsurare (traductoare, amplificatoare, calculatoare, etc.) cât și un dispozitiv de redare (indicare) a rezultatului măsurării. În cel mai simplu caz un instrument de măsurare se reduce la un aparat de măsurare sau o măsură (etalonul) care materializează unitatea de măsură a unei mărimi.

Un sistem de măsurare reprezintă o succesiune de mijloace tehnice cu ajutorul cărora se face operația de măsurare. Schematic un sistem de măsurare real cuprinde elementele prezentate în figura I.26 [141].

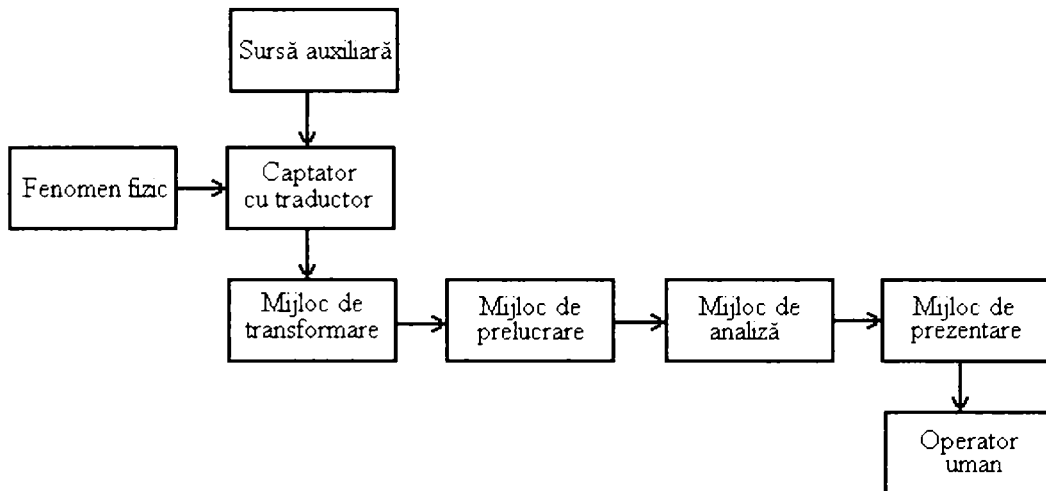


Figura I.26. Schema unui sistem de măsurare

Dintre toate sistemele de măsurare s-au impus lanțurile de măsurare electrice, la care transmiterea, prelucrarea, analiza și prezentarea semnalului se face pe cale electrică.

Cele mai evoluate sisteme de măsurare sunt sistemele computerizate pentru achiziții de date.

Spre deosebire de sistemele de măsurare clasice, care prelucrează pe întreg parcursul lanțului de măsurare semnalul primit de la traductoare sub formă analogică, sistemele de măsurare computerizate realizează, la un moment dat, transformarea semnalului reprezentând valoarea mărimii măsurate, dintr-o formă analogică într-una digitală. După această transformare toate prelucrările asupra sistemului respectiv sunt de fapt prelucrări numerice, realizate într-un sistem de calcul pe bază de microprocesor [141, 154].

Sistemele computerizate pentru achiziția date s-au impus datorită avantajelor pe care le prezintă [141, 155]:

- păstrarea preciziei semnalului pe parcursul prelucrării sale în lațul de măsurare (caracteristică sistemelor digitale față de cele numerice);
- eliminarea greșelilor de citire analogică datorată condițiilor specifice de iluminare, contrast, etc.;
- micșorarea erorii de citire în regim dinamic;
- în transmiterea semnalelor numerice se evită apariția unor erori suplimentare;
- posibilitatea stocării și prelucrării mult mai facile și mai complexe a rezultatelor experimentale;

- flexibilitatea și portabilitatea sporite, prin reconfigurarea sistemelor computerizate în funcție de tipul semnalelor provenite de la traductoare.

După modul de prezentare al măsurătorilor care se efectuează pentru a deduce valorile mărimilor ce interesează, se pot distinge trei feluri de măsurători [17, 148]:

- măsurători directe – fiecare din măsurători reprezintă valoarea mărimii măsurate;
- măsurători indirecte – fiecare din măsurările făcute contribuie la determinarea mai multor mărimi care nu se măsoară în mod direct; acestea sunt legate de mărimile măsurate direct prin relații matematice;
- măsurători condiționate – reprezintă un caz particular de măsurători directe și anume când mărimile măsurate direct nu sunt mărimi independente, ci sunt legate prin anumite relații de condiție.

În raport cu condițiile în care sunt executate, măsurătorile pot fi de două tipuri [148]:

- măsurători de aceeași precizie – când, de exemplu, în cazul măsurătorilor directe, acestea s-au efectuat cu aceleași instrumente, în același mod, etc., astfel încât li se acordă la toate aceeași încredere;
- măsurători de precizii diferite – când, de exemplu, în cazul măsurătorilor directe, acestea s-au executat cu instrumente diferite, s-au aplicat metode de lucru diferite, etc., aceasta presupune să nu li se poată acorda la toate aceeași încredere, ci din contră, să se considere că unele sunt mai precise decât altele.

I.3.3. Caracteristicile mijloacelor de măsurare

Mijloacele de măsurare prezintă următoarele caracteristici [29]:

- statice;
- metrologice;
- tehnice;
- dinamice.

Caracteristicile statice sunt [29, 156]:

- domeniul de măsurare;
- limita de supraîncărcare;
- limita de siguranță;
- constanta sistemului de măsurare;
- caracteristica statică de etalonare.

Domeniul de măsurare este domeniul de valori ale mărimii de măsurat pentru care erorile de măsură sunt reglementate prin norme legale individuale.

Limita de supraîncărcare este valoarea maximă a mărimii de măsurat pentru care după revenirea în limitele domeniului de măsurare nu se modifică caracteristicile statice sau dinamice ale elementului de măsurare [138].

Limita de siguranță este valoarea maximă admisibilă a mărimii de măsurat la care poate fi expus elementul de măsurare fără a fi distrus, cu toate că apar modificări ireversibile ale caracteristicii statice a acestuia [138].

Constanta de măsurare este raportul dintre valoarea mărimii de măsurat și valoarea citită pe scala aparatului. Valoarea mărimii măsurate se obține înmulțind indicația obținută cu constanta de măsurare. În practică pot să apară două, trei, scale pentru domenii diferite de valori ale aceluiași parametru.

Caracteristica statică este dependența redată grafic, matematic sau tabelar dintre indicația aparatului și mărimea măsurată.

Caracteristicile metrologice sunt [29, 156]:

- precizia;
- justețea;
- fidelitatea;
- sensibilitatea;
- pragul de sensibilitate;
- domeniul de histereză.

Precizia reflectă gradul de exactitate al rezultatelor măsurărilor. Cea mai utilizată formă de exprimare a preciziei este cea ca un raport între valoarea erorii maxime și valoarea domeniului de măsurare. Acest raport se numește eroare de bază relativă și se exprimă în procente. Clasa de precizie reprezintă de fapt mărimea erorii de bază relativă iar precizia erorii de bază relativă exprimată procentual. Elementele de măsurare ale căror erori maxime tolerate sunt exprimate în erori absolute sunt repartizate în clase de precizie cărora le sunt atribuite numere de ordine. Cele mai mari numere desemnează elementele de măsurare ale căror erori maxime tolerate sunt cele mai mari.

Justețea este proprietatea de a da rezultate apropiate de valoarea adevărată a mărimii de măsurat [138].

Fidelitatea se referă la proprietatea unui element de măsurare de a avea variații cât mai mici ale rezultatului la variația repetată a aceleiași mărimi în condiții identice de măsurare [138].

Sensibilitatea este proprietatea de a percepe și a reda variații cât mai mici ale mărimii de măsurat. În cadrul elementelor de măsurare cu caracteristica statică liniară, sensibilitatea este chiar panta caracteristicii statice care este egală cu raportul dintre variația indicației scalei dispozitivului de redare și variația corespunzătoare a mărimii de măsurare M .

Pragul de sensibilitate se definește ca cea mai mică valoare a mărimii de măsurat M pentru care se obține o variație sesizabilă la indicația dispozitivului de redare [138].

Domeniul de histereză este diferența maximă a valorilor indicației dispozitivului de redare care se obține pentru aceleași valori a mărimii de măsurat M , dacă la această valoare se ajunge printr-o variație lentă crescătoare sau descrescătoare a mărimii de măsurat M .

Caracteristicile tehnice sunt determinate de principiul de funcționare, formă, gabarit și modul în care influențează măsurarea factorii perturbanți.

Aceste caracteristici sunt [29]:

- stabilitate;
- inerție;
- generalitate;
- fiabilitate.

Stabilitatea constă în menținerea caracteristicilor metrologice în timp, indiferent de condițiile externe.

Inerția reflectă modul în care elementul de măsurare răspunde în timp la variația mărimii de măsurat.

Generalitatea este caracteristica unui element de măsurare de a putea fi înlocuit în determinări similare cu echipamente de același fel cu aceleași caracteristici metrologice și tehnice.

Fiabilitatea este proprietatea care se exprimă prin probabilitatea ca un mijloc de măsurare să-și îndeplinească funcția impusă în anumite condiții prescrise în cursul unei perioade de timp date.

Cei mai importanți parametri ce caracterizează fiabilitatea și care trebuie precizați pentru un mijloc de măsurare sunt:

- durata de viață: durata de timp din momentul în care aparatul iese din fabrică până la uzura totală;
- număr de porniri;
- timpul de reparare: timpul total afectat reparațiilor în durata de viață;
- durata de bună funcționare exprimată prin suma timpilor de bună funcționare;
- mentenabilitatea - exprimată prin probabilitatea ca un element de măsurare să poată fi supravegheat, întreținut, reparat într-o anumită perioadă de timp;
- disponibilitatea exprimată prin probabilitatea ca un element de măsurare să fie în stare de funcționare în orice moment în intervalul dintre operațiile de întreținere planificate.

Caracteristicile dinamice sunt reflectate prin răspunsurile la semnal tip a elementelor de măsurare. Cel mai des este utilizat răspunsul la semnal treaptă. Cel mai important indicator ce caracterizează proprietățile dinamice este constanta de timp T care este obligatoriu să fie inserată în orice prospect în care este prezentat elementul de măsurare. Această constantă T reflectă întârzierea transmiterii informației în interiorul instalației de măsurare de la locul în care se află montat elementul sensibil la scala dispozitivului de redare.

Dacă în structura elementului de măsurare există și elemente de reglare de întârziere pură, acestea trebuie să se specifice, având ca și caracteristică dinamică timpul mort, T_m .

I.3.4. Clasificarea și definirea erorilor

Eroarea poate fi definită ca fiind diferența dintre o valoare reală oarecare și rezultatul găsit pentru aceasta prin calcul sau măsurare (experimental) [17, 157].

Eroarea absolută este diferența dintre valoarea adevărată a unei mărimi și valoarea obținută prin măsurare sau calcul, iar valoarea erorii relative este dată de raportul dintre eroarea absolută și valoarea adevărată [157, 158].

În ansamblu, în funcție de cauzele care le generează, erorile se pot clasifica astfel:

- erori instrumentale;
- erori de metodă;
- erori datorate operatorului uman.

Din punct de vedere al dependenței lor față de măsurand, erorile se pot clasifica în:

- erori aditive, care nu depind de valoarea măsurandului;
- erori multiplicative a căror mărime depinde de valoarea măsurandului.

Erorile instrumentale sunt date de ansamblul erorilor de măsurare datorate mijloacelor tehnice prin intermediul cărora se obțin informațiile de măsurare.

Erorile de metodă se datorează imperfecțiunii metodelor utilizate pentru obținerea informației de măsurare.

Erorile datorate operatorului uman efector al măsurării și/sau adresant al informației de măsurare depind de calitățile și condiția psiho-fizică a acestuia și în mod deosebit de atenție, deprinderi specifice, acuitate senzorială în privința recepției semnalelor care poartă informația de măsurare, precum și aptitudinea de a efectua interpoalări vizuale.

Erorile intrumentale se pot clasifica la rândul în:

- erori statice;
- erori dinamice.

Erorile statice rezultă la un regim staționar constant al măsurandului. Regimul staționar al măsurandului corespunde situației în care derivatele acestuia în raport cu timpul sunt egale cu zero. Ele se datorează modificării caracteristicii de convertire a mijlocului de măsurare sau funcționării după o caracteristică de convertire nominală diferită de cea reală.

Erorile dinamice apar la un regim variabil al măsurandului și au cauze multiple. Sunt determinate atât de caracteristicile mijloacelor și metodelor de măsurare utilizate cât și de natura variației măsurandului. Astfel forțele masice, sistemele de amortizare, capacitățile calorice a părților componente a aparatului mecanice, condensatorii și rezistențele ohmice sunt câteva surse de erori dinamice.

Dacă o instalație de măsurare trebuie să măsoare o mărime variabilă în timp există întotdeauna o eroare dinamică deoarece semnalul de ieșire urmărește inexact variația semnalului de intrare [159]. Aceste erori sunt mai mari dacă în componența instalației de măsurare intră elemente de reglare cu timp mort. Din această categorie fac parte analizoarele de gaze și lichide care trebuiesc montate la o anumită distanță de utilaj sau instalație, conductele de legătură sunt elemente de întârziere pură ce introduc timpi morți în comportarea dinamică a acestor echipamente.

Din punct de vedere al formei de manifestare și al cauzelor care le produc, erorile statice se pot grupa în trei tipuri de erori:

- erori sistematice;
- erori întâmplătoare sau aleatoare;
- erori grosolane.

Erorile sistematice sunt determinate de factori care acționează în același mod la o repetare a măsurărilor, rămân constante în condiții identice de operare [160]. Acestea apar în mod sistematic în timpul operației de măsurare și se clasifică în două clase: după sursa de apariție și după aspectul analitic. Erorile sistematice au o acțiune unilaterală și deosebit de periculoasă prin efectul lor cumulativ asupra operației de măsurare, motiv pentru care trebuie eliminate.

Erorile întâmplătoare sau aleatoare sunt determinate de factori care acționează aleatoriu de la o măsurare la alta, chiar dacă măsurătorile sunt efectuate practic în condiții identice. Acestea se datorează modificării condițiilor exterioare sau acțiunii unor mărimi de perturbație exterioare accidentale. Caracteristica principală a acestor erori constă în faptul că acestea diferă între ele atât ca mărime cât și ca

semn, fără a rezulta din înșiruirea datelor vreo regulă sistematică de ordonare [160]. Aceste erori se repartizează după legi statistice ca de exemplu curba lui Gauss. În marea majoritate a situațiilor mărimea adevărată a erorii întâmplătoare rămâne necunoscută deoarece rămâne necunoscută valoarea adevărată a mărimii măsurate.

Erorile grosolane intervin atunci când se manifestă neglijențe fie în realizarea condițiilor de măsurare, fie în aplicarea corectă a metodelor de măsurare [160]. Aceste erori sunt momentane și foarte ușor de descoperit deoarece sunt incomparabil mai mari decât erorile întâmplătoare.

Erorile sistematice și cele întâmplătoare determină exactitatea, respectiv precizia măsurătorilor.

Se poate spune despre o serie de măsurători repetate că este exactă dacă diferența dintre media aritmetică a măsurătorilor și valoarea reală este cât mai mică posibil [157].

O serie de măsurători repetate este precisă dacă diferențele dintre valorile găsite și media aritmetică sunt cât mai mici posibile (grupare strânsă, reproductibilitate bună) [157].

Având în vedere modul de definire al diverselor erori prezentate mai sus, se remarcă principalele caracteristici ale erorilor de măsurare:

- se pot deduce prin calcul cunoscând cauzele lor;
- se pot elimina numai prin schimbarea principiului de măsurare;
- nu se pot observa sau elimina prin schimbarea aparatului de măsurat cu altul de același tip, prin schimbarea operatorului sau repetarea măsurărilor;
- pentru măsurări în condiții identice au o mărime constantă și același semn.

I.3.5. Estimarea valorii adevărate a unei mărimi măsurate

Pentru determinarea calitativă a uneia sau mai multor mărimi pe cale experimentală, se efectuează un număr finit de măsurări cu o suficientă precizie, menținând aceleași condiții de măsurare.

Prin măsurarea repetată a unei mărimi M se obține un șir de valori M_1, M_2, \dots, M_m , fiecare din ele diferind de valoarea adevărată M_A printr-o eroare necunoscută e_x . Se pune problema de a determina valoarea adevărată cu o eroare cât mai mică.

Rezultatul corect al unei măsurări se poate obține aplicând rezultatului brut al măsurării o corecție egală cu eroarea determinabilă luată cu semn schimbat [156]. Astfel valoarea adevărată a mărimii măsurate se poate exprima conform relației (I.109) [141, 148, 156].

$$M_A = M_n \pm e_x ; \quad n = 1, m. \quad (I.109)$$

Studiul global al erorilor aleatorii se bazează pe metode ale statisticii matematice. Astfel, parametrii statistici cei mai importanți sunt:

• media aritmetică:
$$\bar{M}_a = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m M_n ; \quad (I.110)$$

• media geometrică:
$$\bar{M}_g = (M_1 \cdot M_2 \cdot \dots \cdot M_m)^{\frac{1}{m}} \quad (I.111)$$

• media pătratică:
$$\bar{M}_p = \sqrt{\frac{(M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_m^2)}{m}} \quad (I.112)$$

Pentru stabilirea celei mai probabile valori a mărimii măsurate, care estimează valoarea adevărată, trebuie să fie cunoscută repartiția rezultatelor măsurării, respectiv repartiția frecvențelor erorilor aleatorii.

În funcție de tipul fenomenului studiat și de ipotezele făcute s-au obținut diferite forme ale legilor de repartiție: repartiție normală, binomială, Poisson, etc. Dintre acestea cea mai utilizată este legea repartiției normale deoarece corespunde repartiției mărimilor măsurate într-un număr foarte mare de cazuri, iar în anumite condiții alte legi de repartiție se aproximează cu cea normală. Totodată are avantajul că este simplă, conținând o singură variabilă [141].

Conform teoriei erorilor de măsurare, precizia de măsurare a unei mărimi poate fi evaluată prin mai mulți indicatori, denumiți indici ai preciziei de măsurare [141, 160, 161]:

- eroarea standard:
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^m (M_n - \bar{M}_a)^2}{m-1}} \quad (I.113)$$

- eroarea probabilă:
$$\varepsilon = 0,6745 \cdot \sigma \quad (I.114)$$

- eroarea medie absolută:
$$\delta = 0,7979 \cdot \sigma \quad (I.115)$$

- măsura preciziei:
$$h = 0,7071 \frac{1}{\sigma} \quad (I.116)$$

În mod curent se folosește eroarea standard, denumită și eroare medie pătratică, pătratul acesteia reprezentând dispersia erorilor. Curba de repartiție în acest caz este situată întotdeauna deasupra abscisei. În plus, ea este și simetrică față de axa ordonatelor, dacă repartiția normală este și normată, adică $\bar{M}_a = 0$ și $\sigma = 1$. Cunoașterea erorii standard permite determinarea câmpului de împrăștiere a mărimilor experimentale φ , care este 6σ , și în care sunt cuprinse peste 99% din valorile mărimii măsurate experimental [141, 162].

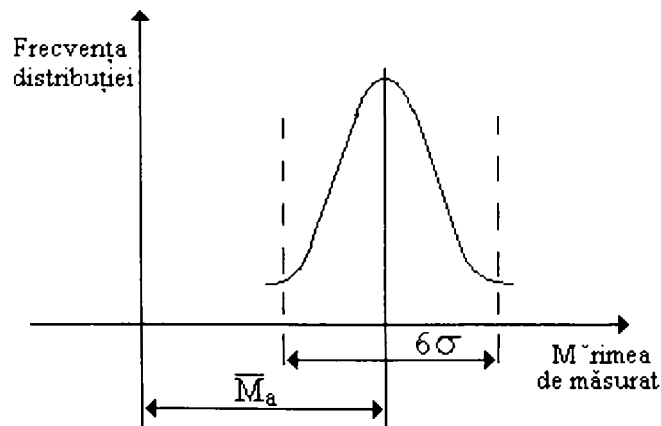


Figura I.27. Câmpul de împrăștiere a mărimilor a căror medie este \bar{M}_a

Cea mai bună valoare pentru o mărime pentru care s-a obținut prin măsurători un șir de valori este condiționată de minimul sumei pătratelor erorilor, luate față de o mărime de referință care este tocmai cea căutată. O justificare teoretică a acestui criteriu se deduce prin considerarea rezultatelor obținute în aplicarea teoriei probabilităților la calculul erorilor de măsurare [160].

Fie m mărimi independente $X: X_1, X_2, \dots, X_m$ pentru care se obțin valorile M_1, M_2, \dots, M_m . Dacă aceste mărimi ar fi valorile exacte pe care le căutăm, am avea:

$$M_1 = X_1; M_2 = X_2; M_m = X_m$$

ceea ce evident nu se realizează în practică deoarece determinarea valorilor M_n ($n = 1, 2, \dots, m$) sunt inevitabil afectate de erori. Presupunând eliminat erorile sistematice și greșelile, și mărginindu-ne numai la erorile întâmplătoare, problema care se pune este determinarea celei mai probabile valori M_n pentru care erorile medii pătratice să fie cât mai mici.

Adeseori, în practică, este incomod și chiar imposibil determinarea directă a valorilor M_n ; se determină experimental doar niște funcții de acestea, astfel încât avem de-a face cu determinări indirecte. Fie, așadar,

$$\begin{cases} \xi_1 = f_1(M_1, M_2, \dots, M_m) \\ \xi_2 = f_2(M_1, M_2, \dots, M_m) \\ \xi_i = f_i(M_1, M_2, \dots, M_m) \end{cases} \quad (I.117)$$

un număr de i mărimi ξ determinate direct. Problema care se pune este ca din aceste date (I.117) să se deducă cele mai bune valori pentru mărimile M_n . Se observă că întotdeauna $i > m$, deoarece există posibilitatea să se mărească numărul de măsurători, i , în scopul de a obține, conform principiului metodei, cele mai bune rezultate.

De obicei se admite că alte condiții suplimentare care ar urma să satisfacă necunoscutele M_n nu există.

Dacă valorile ξ_j ($j = 1, 2, \dots, i$) ar fi perfect riguroase, sistemul (I.117) ar fi compatibil și rezolvabil în raport cu necunoscutele M_n ; în acest caz, ecuațiile suplimentare în număr de $(i - m)$ ar fi simple consecințe ale celorlalte m , iar operațiile de măsurare s-ar reduce la atâtea necunoscute câte necunoscute sunt, ceea ce nu se poate realiza în practică, cu oricâtă pricepere s-ar efectua determinările experimentale. De aceea, sistemul (I.117) se înlocuiește cu așa numitul sistem al ecuațiilor erorilor:

$$\begin{cases} f_1(M_1, M_2, \dots, M_m) - \xi_1 = \varepsilon_1 \\ f_2(M_1, M_2, \dots, M_m) - \xi_2 = \varepsilon_2 \\ f_i(M_1, M_2, \dots, M_m) - \xi_i = \varepsilon_i \end{cases} \quad (I.118)$$

unde ε_j ($j = 1, 2, \dots, i$) sunt corecții care trebuie aplicate pentru a transforma sistemul incompatibil (I.117) într-un sistem compatibil, cu necunoscutele M_n .

După teoria distribuției normale, probabilitatea ca erorile de măsurare să fie exact egale, sau cât mai exact egale posibil, cu corecțiile ε_j , și anume să fie cuprinse respectiv în intervalele:

$$(\varepsilon_1, \varepsilon_1 + d\varepsilon_1); (\varepsilon_2, \varepsilon_2 + d\varepsilon_2); \dots; (\varepsilon_i, \varepsilon_i + d\varepsilon_i)$$

este proporțională cu funcția de densitate (I.119) întrucât s-a presupus că valorile ξ_j , respectiv corecțiile ε_j sunt independente.

$$\psi(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i) = \frac{h_1 \cdot h_2 \cdots h_i}{(\sqrt{\pi})^i} \cdot e^{-(h_1^2 \cdot \varepsilon_1^2 + h_2^2 \cdot \varepsilon_2^2 + \dots + h_i^2 \cdot \varepsilon_i^2)} \quad (\text{I.119})$$

în care: h – măsura preciziei.

Această probabilitate este maximă dacă exponentul funcției exponențiale (I.119) este minim; deci maximum de probabilitate se obține pentru minimum expresiei:

$$H = h_1^2 \cdot \varepsilon_1^2 + h_2^2 \cdot \varepsilon_2^2 + \dots + h_i^2 \cdot \varepsilon_i^2 \quad (\text{I.120})$$

sau

$$H = p_1 \cdot \varepsilon_1^2 + p_2 \cdot \varepsilon_2^2 + \dots + p_i \cdot \varepsilon_i^2 \quad (\text{I.121})$$

în care: p – ponderea unei măsurători ($p = h^2$).

Este evident că în cazul măsurătorilor perfecte suma (I.120), respectiv (I.121), ar trebui să fie nulă, ceea ce nu se poate realiza în practică, deoarece ar însemna ca toți ε_j să fie nuli, deoarece H este o formă pătratică pozitiv definită; sistemul (I.117) ar fi atunci compatibil. Se impune așadar elaborarea unei condiții mai puțin restrictive pentru găsirea unei valori minime a lui H , care să asigure cele mai probabile valori pentru variabilele M_n .

Dacă în expresia lui H se înlocuiesc toți ε_j prin valorile date de sistemul (I.118) se poate considera această sumă ca funcție de variabilele M_n . Făcând această substituție se obține pentru (I.121) expresia (I.122).

$$H(M_1, M_2, \dots, M_m) = \sum_{j=1}^i p_j \{f_j(M_1, M_2, \dots, M_m) - \xi_j\}^2 \quad (\text{I.122})$$

Din analiza matematică se știe că valorile minime sau maxime ale funcției (I.122) sunt soluțiile sistemului obținut prin egalarea cu zero a derivatelor parțiale ale lui H în raport cu variabilele M_n . Cum nu poate fi vorba de un maxim, care este evident obținut pentru $\varepsilon_j = +\infty$, se poate determina cu siguranță un minim efectiv. Așadar, această condiție se poate exprima prin sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial M_1} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial M_2} = 0 \\ \frac{\partial H}{\partial M_m} = 0 \end{cases} \quad (\text{I.123})$$

Se observă că numărul ecuațiilor (I.123) deduse din (I.118), respectiv (I.122), este exact egal cu numărul m al necunoscutelor; ele ne permit deci determinarea prin calcul a valorilor M_1, M_2, \dots, M_m .

Sistemul valorilor adoptate pentru variabilele M_n , considerând valorile ca fiind cele mai probabile, este sistemul care face minimă suma pătratelor erorilor directe (I.118) ale măsurătorilor, înmulțite respectiv cu ponderile acestor determinări experimentale. Aceasta constituie principiul metodei celor mai mici pătrate, justificat prin considerații teoretice asupra distribuției normale [160].

II. PARTEA EXPERIMENTALĂ

Studiile experimentale au fost realizate în cadrul laboratorului de Automatizarea Proceselor Chimice din Facultatea de Chimie Industrială și Ingineria Mediului – Universitatea „Politehnica” din Timișoara.

Acestea au fost efectuate pentru trei microdebitmetre electrotermice de gaze, diferite din punct de vedere constructiv, elaborate, proiectate și realizate ca modele de referință (prototipuri) de către colectivul de cercetare al disciplinei de „Automatizarea proceselor chimice”. Ele vor fi numite în continuare „microdebitmetru electrotermic 1”, „microdebitmetru electrotermic 2” și „microdebitmetru electrotermic 3”.

Cele trei microdebitmetre studiate fac parte din categoria debitmetrelor electrotermice calorimetrice fără contact, acestea având și rolul de traductoare de măsurare în cadrul unor sisteme de reglare automată a debitului.

II.1. Obiectivele studiilor experimentale

- Realizarea standului de etalonare a microdebitmetrelor electrotermice și testare a capacităților de funcționare;
- Elaborarea modului de lucru necesar studiului comportării la transfer al celor trei microdebitmetre electrotermice, precum și pentru obținerea cadrului experimental ce descrie comportarea microdebitmetrelor electrotermice în diferite condiții de funcționare;
- Evidențierea caracteristicilor constructive care influențează funcționarea aparatelor;
- Studiul comportării la transfer al celor trei microdebitmetre electrotermice;
- Elaborarea modelelor matematice experimentale pentru caracterizarea funcționării microdebitmetrelor electrotermice în diferite condiții specifice;
- Validarea modelelor matematice elaborate prin calculul indicatorilor de adecvanță;
- Determinarea performanțelor microdebitmetrului electrotermic pentru gaze și studiul posibilității de îmbunătățire al acestora, prin identificarea și analiza parametrilor constructivi și funcționali ce influențează funcționarea debitmetrului;
- Simularea comportării la transfer a celor trei microdebitmetre electrotermice cu ajutorul ecuației de funcționare;
- Validarea simulării prin calculul indicatorilor de adecvanță;
- Aplicarea metodelor matematice de calcul al erorilor de măsurare pentru cele trei microdebitmetre electrotermice.

II.2. Principiul de funcționare al microdebitmetrelor electrotermice

Principiul de funcționare al celor trei microdebitmetre electrotermice pentru gaze este ilustrat în figura II.1. [86].

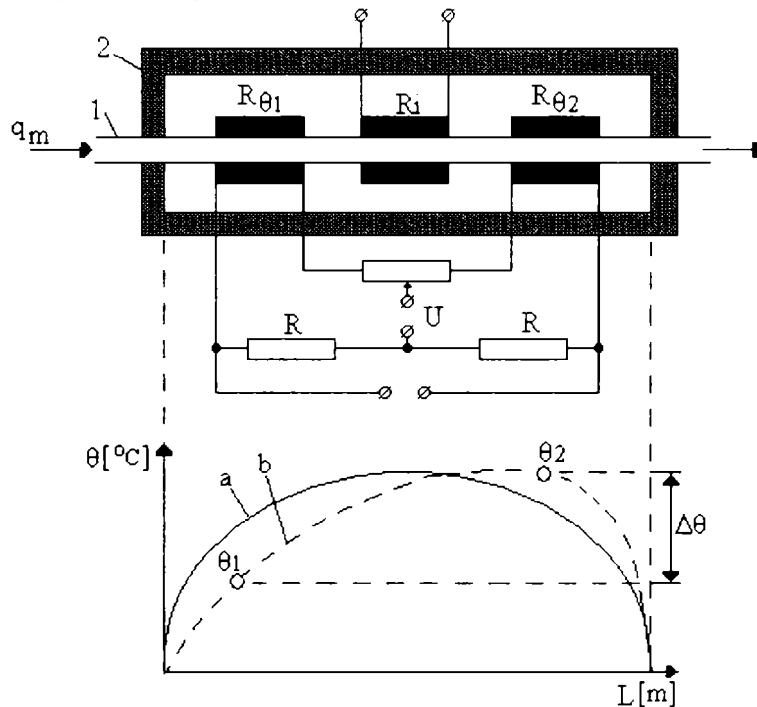


Figura II.1. Principiul de funcționare al microdebitmetrului electrotermic pentru gaze

Gazul al cărui debit se măsoară este trecut printr-un tub metalic 1, cu pereții subțiri, care conduce bine căldura. Pe tub sunt plasate, izolat față de acesta, o înfășurare de încălzire R_i și simetric față de aceasta două înfășurări care au rolul de termorezistențe ($R_{\theta 1}$ și $R_{\theta 2}$), înglobate într-un montaj în punte. În lipsa debitului prin tub, în lungul acestuia se formează o distribuție simetrică de temperatură, cu maximum la mijloc (curba a din figura II.1.). Această distribuție de temperatură se deformează sub influența curentului de gaz (curba b), și ca atare în două puncte simetrice față de înfășurarea de încălzire apare o diferență de temperatură $\Delta\theta$.

Întregul tub este introdus într-o carcasă protectoare 2, cu pereți groși, confecționată din material cu conductibilitatea termică ridicată care are rolul de a egaliza temperatura la cele două capete și de a reduce influențele mediului ambiant (fluctuații locale de temperatură) asupra tubului debitmetric.

Diferența de temperatură $\Delta\theta$ este o măsură a debitului în conformitate cu relația (II.1) [86].

$$\Delta\theta = k_1 \cdot C_p \cdot q_m \quad (\text{II.1})$$

în care:

q_m – debitul masic de gaz, [kg/s];
 C_p – căldura specifică a gazului, [J/(kg·grd)];
 k_1 – constantă ce depinde de construcția aparatului.

Sub influența acestei diferențe de temperatură puntea se dezechilibrează, apărând o tensiune de dezechilibru U . Ca atare tensiunea de dezechilibru U este proporțională cu debitul masic q_m de gaz și cu căldura specifică C_p a acestuia (vezi relația (II.3)) [26, 140].

II.3. Instalația experimentală. Caracteristici constructive

În acest paragraf sunt prezentate caracteristicile constructive ale celor trei microdebitmetre electrotermice precum și instalațiile experimentale utilizate la studiul comportării la transfer al acestora în diferite condiții de funcționare.

II.3.1. Microdebitmetrul electrotermic 1

Aparatul studiat funcționează principal după schema din figura II.1 deosebindu-se de acesta printr-o serie de modificări constructive. Astfel, pe tubul de alamă cu diametrul exterior de 0,004 m sunt bobinate patru rezistențe din fir de cupru emailat ($\varnothing = 0.07$) legate într-un montaj în punte (figura II.2).

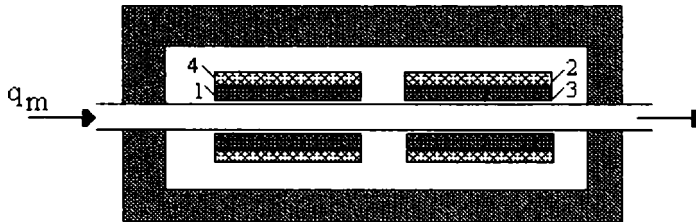


Figura II.2. Dispunerea rezistențelor microdebitmetrului electrotermic 1

Rezistențele sunt două câte două suprapuse și au pe de o parte rolul de sursă de încălzire și pe de altă parte rolul de termorezistențe. Aceste modificări constructive față de schema prezentată în figura II.1 au fost făcute în scopul măririi sensibilității aparatului, ceea ce se obține pe de o parte prin mărirea tensiunii de alimentare a punții și pe de altă parte prin folosirea a patru brațe active.

Folosirea a patru brațe active diminuează totodată influența temperaturii mediului ambiant asupra tensiunii de dezechilibru a punții în care sunt intercalate rezistențele active, deci mărește stabilitatea și reproductibilitatea indicațiilor aparatului.

Capetele tubului de alamă sunt scurtcircuitate printr-un jug masiv de alamă. Această scurtcircuitare este deosebit de importantă pentru eliminarea influenței nedorite a fluctuațiilor locale de temperatură de pe suprafața capetelor tubului debitmetric asupra stabilității indicațiilor și trebuie riguros asigurată, fapt ce explică robustețea jugului de alamă.

În lipsa debitului de gaz și cu bobinele conectate de-a lungul tubului se stabilește, ca și în cazul debitmetrului prezentat în figura II.1, o distribuție de temperatură simetrică față de mijlocul tubului. Acesta înseamnă că cele patru bobine se găsesc la aceeași temperatură medie și montajul în punte va fi în echilibru.

Distribuția simetrică a temperaturii se deformează la trecerea gazului prin tubul debitmetric, maximul deplasându-se în direcția curgerii fluidului. În aceste condiții temperatura medie a bobinelor 1 și 4 scade, iar temperatura medie a bobinelor 2 și 3 crește. Deci între bobinele 1, 4 și 2, 3 apare o diferență de temperatură $\Delta\theta$ care este o măsură a debitului, în conformitate cu relația (II.1).

În cazul în care tensiunea de dezechilibru U este mică în comparație cu tensiunea de alimentare a punții U_a , pentru microdebitmetrul electrotermic considerat, se poate admite proporționalitatea:

$$U = k_2 \cdot \Delta\theta \quad (\text{II.2})$$

în care:

U – tensiunea de dezechilibru, [V];
 k_2 – constantă ce depinde de construcția aparatului.

Din combinarea relațiilor (II.1) și (II.2) rezultă:

$$U = k_1 \cdot k_2 \cdot C_p \cdot q_m = B \cdot C_p \cdot q_m \quad (\text{II.3})$$

în care:

B – constantă ce depinde de parametrii constructivi și funcționali ai aparatului, [$V \cdot s \cdot ^\circ C \cdot J^{-1}$].

Relația (II.3) se poate scrie în forma simplificată (II.4):

$$U = K \cdot q_m \quad (\text{II.4})$$

în care:

K – sensibilitatea aparatului (mărime constantă pentru un anumit gaz), [$V \cdot s \cdot kg^{-1}$].

În figura II.3 este prezentat montajul electric și unitatea de alimentare al microdebitmetrului electrotermic 1 [28].

Divizorul de tensiune format din două rezistențe fixe de câte $3 \cdot 10^{-3} \Omega$ și potențiometrul de 500Ω servesc pentru ajustarea montajului astfel ca la debit nul de gaz tensiunea de ieșire să fie nulă. Această ajustare trebuie făcută după ce aparatul a ajuns la echilibru termic, ceea ce are loc după aproximativ două ore de la conectarea încălzirii.

Reglarea curentului de încălzire se face cu rezistențe variabile de 200Ω și 15Ω .

Este foarte importantă menținerea riguros constantă a curentului de încălzire la valoarea prestabilită, fapt pentru care este recomandată alimentarea microdebitmetrului electrotermic prin intermediul unui stabilizator.

Etalonarea microdebitmetrului electrotermic 1 pentru gaze s-a făcut trasând caracteristicile sale statice, adică determinarea dependenței care există între tensiunea de dezechilibru U și debitul masic q_m de aer ce trece prin debitmetru.

Metoda de etalonare trebuie să asigure posibilitatea măsurării cât mai precise a tensiunii de dezechilibru și a debitului masic de gaz. Metoda adoptată se bazează pe măsurarea directă a tensiunii de dezechilibru la un milivoltmetru și pe

măsurarea indirectă a debitului masic de gaz cu ajutorul unei rezistențe pneumatice laminare.

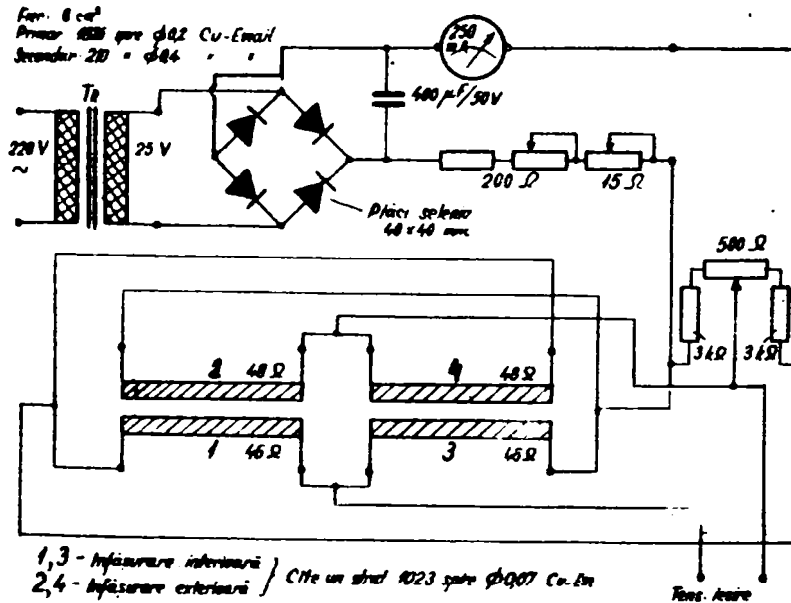


Figura II.3 Montajul electric și unitatea de alimentare a microdebitmetrului electrotermic 1

Pentru calculul debitului masic de gaz q_m se utilizează relația (II.5) [46, 163].

$$\Delta P = R \cdot q_m \quad (\text{II.5})$$

unde:

- ΔP – căderea de presiune, [N/m²];
- q_m – debitul masic de gaz, [mg/s];
- R – valoarea rezistenței pneumatice laminare, [MPI].

Pentru a calcula valoarea debitului masic de gaz q_m este necesar să se cunoască cu precizie valoarea rezistenței pneumatice R .

În general, prin rezistență pneumatică se înțelege orice porțiune dintr-un montaj pneumatic prin care trecerea unui curent de gaz duce la apariția unei căderi de presiune [164]. Rezistența pneumatică laminară are comportare de element proporțional de ordinul zero, având ca variabilă de intrare (i) debitul masic de gaz q_m ce trece prin rezistență și ca variabilă de ieșire (e), căderea de presiune de pe rezistență ΔP [163, 165].

În calitate de rezistențe pneumatice laminare se utilizează tuburi capilare (figura II.1.4) confecționate din sticlă, metale sau aliaje [165].

Tuburile capilare trebuie să îndeplinească următoarele condiții [46]:

- raportul $l/d > 1000$, diametrul d al tubului fiind 0,5 mm;
- căderea de presiune ΔP trebuie să fie mai mică decât presiunea medie P_m din capilară (relația (II.6)).

$$\Delta P = P_1 - P_2 < P_m = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (\text{II.6})$$

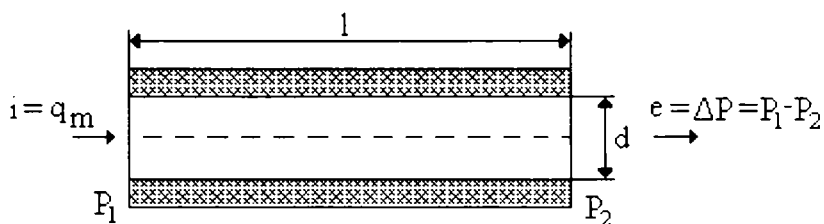


Figura II.4. Tubul capilar

Dacă se respectă condițiile mai sus menționate, caracteristica statică a tubului capilar este liniară, ecuația caracteristicii statice având forma ecuației (II.5). Panta dreptei constituie coeficientul de transfer al rezistenței laminare, care reprezintă în același timp și o expresie a valorii rezistenței pneumatice laminare R [46].

În domeniul căderilor de presiune mici ($\Delta P < P_m$) rezistențelor pneumatice laminare li se poate aplica legea lui Ohm, considerând debitul masic de gaz q_m ca fiind analogul intensității de curent, iar căderea de presiune ΔP analogul tensiunii (relația (II.5)).

Rezistența pneumatică R a tubului capilar, rezultată din legea Hagen-Poiseuille, are expresia (II.7) [166, 167]:

$$R = \frac{128 \cdot \eta \cdot l \cdot R_g \cdot T}{\pi \cdot d^4 \cdot P_m \cdot \mu} \quad (\text{II.7})$$

în care:

- η – vâscozitatea dinamică a gazului, $[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2]$;
- l – lungimea tubului capilar, $[\text{m}]$;
- R_g – constanta generală a gazelor, $[\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{grd})]$;
- T – temperatura absolută a gazului, $[\text{K}]$;
- d – diametrul tubului capilar, $[\text{m}]$;
- P_m – presiunea medie din tubul capilar, $[\text{N}/\text{m}^2]$;
- μ – masa moleculară a gazului, $[\text{kg}/\text{kmol}]$.

Din structura relației (II.7) rezultă că valoarea rezistenței pneumatice a unui tub capilar este influențată de caracteristicile constructive (l , d), de parametrii gazului (μ , η) care circulă prin ștrangulare și de parametrii mediului ambiant (T) în care se află amplasată rezistența.

Măsurarea rezistenței pneumatice R a tubului capilar (determinarea caracteristicii statice) s-a făcut cu ajutorul dispozitivului experimental prezentat în figura II.5, gazul utilizat fiind aerul [46].

Căderea de presiune ΔP de pe rezistența R , indicată de manometrul diferențial M_d , este funcție de debitul masic de aer q_m ce trece prin ea. În prealabil aerul este uscat prin trecerea sa printr-un tub cu CaCl_2 anhidră. Aerul aspirat dislocuiește, în vasul V_1 , volumul de apă care curge prin cădere gravitațională. Acest debit volumic, păstrat constant prin intermediul dispozitivului de reglare montat pe conducta de evacuare, este egal, în regim staționar, cu debitul volumic de aer care îl dislocuiește.

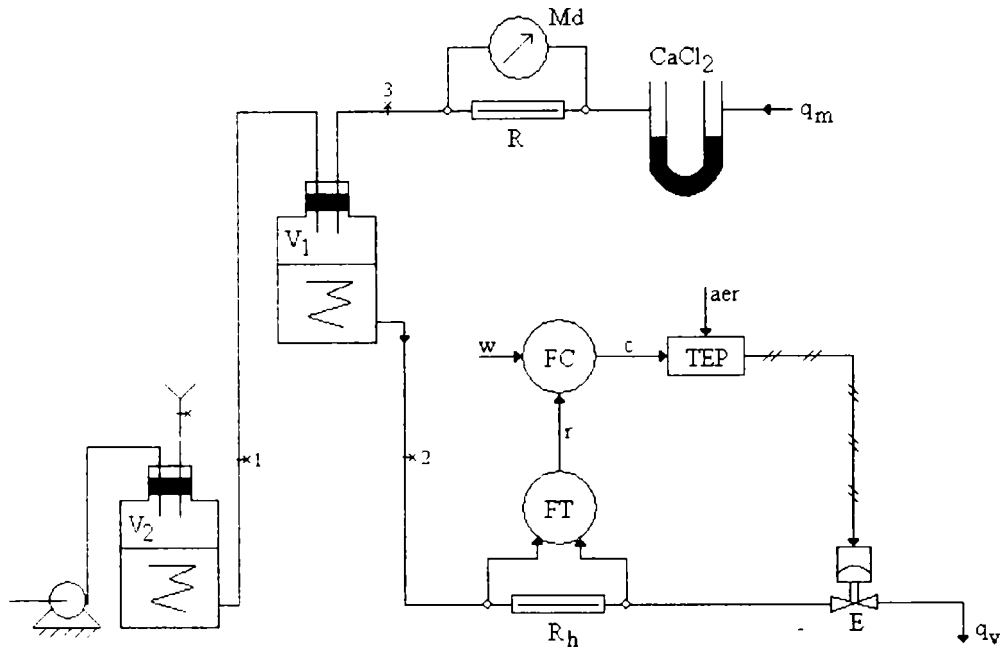


Figura II.5. Instalația experimentală utilizată la determinarea valorii rezistenței pneumatice laminare

Sistemul de reglare automată a debitului de apă este alcătuit dintr-un element sensibil, R_h , (rezistența hidraulică laminară), un traductor industrial de presiune diferențială cu mărime de ieșire electrică FC, un regulator electronic FC (ELC 111, cu comportare P.I.), un traductor electropneumatic TEP, care convertește semnalul de comandă electric al regulatorului în unul pneumatic care acționează elementul de execuție aflat pe conducta de evacuare a debitului de apă.

Debitul masic de aer q_m , care dislocuiește debitul volumic de apă q_v , provoacă căderea de presiune ΔP de pe rezistența R . Pentru diverse mărimi de referință, după atingerea regimului staționar, se citesc valorile căderii de presiune ΔP de pe rezistența R și se determină debitele volumice de apă.

Modul de lucru pentru etalonarea rezistenței pneumatice laminare R :

- După montarea rezistenței R , în circuit se deschid clemele 2 și 3 și se fixează la regulator valoarea prescrisă (de debit) așteptând instalarea regimului staționar. După atingerea regimului staționar se citește valoarea căderii de presiune ΔP de pe rezistența R și se determină debitul volumic de apă scurs din vas.
- Se modifică valoarea prescrisă a mărimii de referință și se repetă determinările de la punctul anterior.
- Se calculează debitele masice pentru aer, corespunzătoare debitelor volumice determinate. Legătura dintre debitul volumic de apă și debitul masic de gaz este dată de relația:

$$q_m = \frac{\rho_0 \cdot T_0 \cdot [P_b - (\Delta P + P_S)]}{P_0 \cdot T} \cdot q_v \quad (\text{II.8})$$

în care:

q_m – debitul masic de gaz, [kg/s];
 q_v – debitul volumic de apă, [m³/s];
 T – temperatura de lucru, [K];
 P_b – presiunea barometrică efectivă, [N/m²];
 ΔP – căderea de presiune pe tubul capilar, [N/m²];
 P_s – presiunea de saturație a apei, la temperatura de lucru, [N/m²];
 ρ_0 – densitatea aerului la temperatura T_0 și presiunea P_0 , [kg/m³];
 $P_0 = 1,01325 \cdot 10^5$ N/m²;
 $T_0 = 273$ K.

- Se reprezintă grafic dependența $\Delta P = f(q_m)$ și se determină din grafic valoarea coeficientului de proporționalitate R , exprimată în MPI, (1 MPI=10⁶ N·s/(m²·kg)) [46]. Totodată, utilizând relația (II.5) se poate obține direct valoarea rezistenței pneumatice laminare R , exprimată în MPI.
- La utilizarea, în alte condiții decât în cele de etalonare, valorii rezistenței R i se aplică relația de corecție (II.9), relație în care cu indicii e au fost notate valorile parametrilor în condițiile efectuării etalonării [46, 168].

$$R = R_e \frac{T \cdot P_e \cdot \eta \cdot \mu_e}{T_e \cdot P \cdot \eta_e \cdot \mu} \quad (\text{II.9})$$

unde:

R_e – valoarea rezistenței pneumatice laminare determinată în condiții cunoscute, [MPI];

T – temperatura de lucru, [K];

T_e – temperatura de lucru în condițiile etalonării rezistenței R_e , [K];

P_e – presiunea la care s-a efectuat etalonarea rezistenței R_e ;

η – vâscozitatea dinamică a gazului, [N·s/m²];

η_e – vâscozitatea dinamică a gazului în condițiile etalonării rezistenței R_e , [N·s/m²];

μ – masa moleculară a gazului, [kg/kmol];

μ_e – masa moleculară a gazului utilizat la etalonarea rezistenței R_e [kg/kmol].

Cu metoda descrisă mai sus s-a determinat valoarea rezistenței pneumatice laminare R a tubului capilar utilizat în cadrul montajului experimental pentru studiul comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 1.

Valoarea determinată pentru rezistența pneumatică laminară R este 1930 MPI, la temperatura de 23 °C și presiunea barometrică de 754 mmHg.

În vederea studiului comportării la transfer a microdebitmetrului electrotermic 1 s-a utilizat instalația experimentală prezentată în figura II.6. Aceasta este compusă din microdebitmetrul electrotermic MDET care este legat în serie cu un tub capilar în calitate de rezistență pneumatică laminară R . Întregul sistem este alimentat cu aer de la un element de prescriere pneumatic EP de joasă suprapresiune.

Elementul de prescriere produce o presiune de ieșire constantă, el stabilizând bine această presiunea de ieșire, indiferent de variațiile presiunii de alimentare P_a .

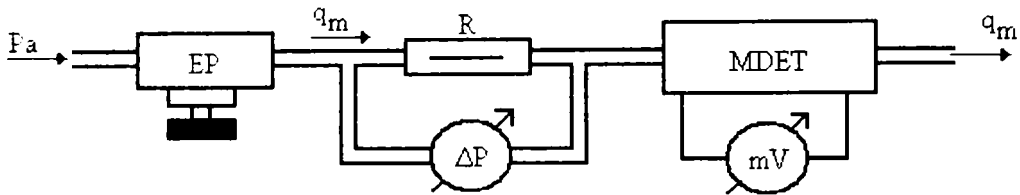


Figura II.6. Instalația experimentală utilizată la studiul funcționării microdebitmetrului electrotermic 1

II.3.2. Microdebitmetrul electrotermic 2

Spre deosebire de microdebitmetrul electrotermic 1, în cazul celui de al doilea microdebitmetru electrotermic studiat, traductorul debitmetric (figura II.7) este alcătuit dintr-un tub metallic (prin care trece gazul al cărui debit se măsoară) pe care se găsesc numai două bobine R_1 și R_2 , care îndeplinesc rolul atât de sursă de încălzire cât și de termorezistențe.

Renunțând la rezistența de încălzire separată și alimentând puntea Wheatstone în așa fel ca cele două termorezistențe să îndeplinească și rolul sursei de încălzire, pe lângă simplificarea constructivă adusă microdebitmetrului electrotermic s-a realizat și o mărire a sensibilității traductorului debitmetric.

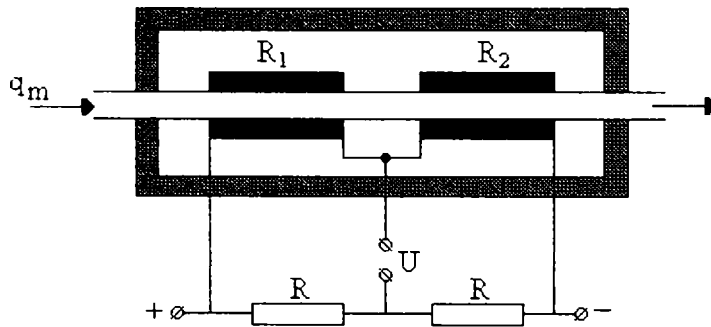


Figura II.7. Schema de principiu a microdebitmetrului electrotermic 2

Funcționarea microdebitmetrului electrotermic 2 este identică cu a microdebitmetrului electrotermic 1, ecuația de funcționare a debitmetrului fiind dată de relația (II.4).

Relația (II.4) se poate deduce cu ajutorul relației (II.10) care redă valoarea diferenței de temperatură $\Delta\theta$ ce apare între cele două bobine R_1 și R_2 (în ipoteza unei distribuții parabolice de temperatură de-a lungul tubului debitmetric) și o relație (II.11) utilizată la calculul tensiunii de dezechilibru U a punții electrice a traductorului debitmetric (în ipoteza că această tensiune este mult mai mică decât tensiunea de alimentare U_a):

$$\Delta\theta = \frac{0,75 \cdot R_e \cdot I^2}{A_1^2} \cdot C_p \cdot q_m \quad (\text{II.10})$$

$$U = 0,5 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \cdot U_a \quad (\text{II.11})$$

Semnificațiile notațiilor din relațiile (II.10) și (II.11) sunt următoarele:

R_e - rezistența echivalentă a punții, [Ω];

I - curentul de alimentare al punții, [A];

A_1 - transmitanța termică a unei bobine până la bloc, [$\text{W}/^\circ\text{C}$];

α - coeficientul de variație al rezistenței electrice echivalente cu temperatura, [$1/^\circ\text{C}$];

C_p - căldura specifică a gazului, [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{grad})$];

q_m - debitul masic de gaz, [kg/s].

Înlocuind expresia (II.10) care redă valoarea lui $\Delta\theta$ în relația (II.11) se obține:

$$U = \frac{1,5 \cdot \alpha \cdot R_e^2 \cdot I^3}{A_1^2} \cdot C_p \cdot q_m \quad (\text{II.12})$$

Dacă toți termenii constanți se înglobează într-o singură constantă B din relația (II.12) se obține relația (II.4).

$$B = \frac{1,5 \cdot \alpha \cdot R_e^2 \cdot I^3}{A_1^2} \quad (\text{II.13})$$

Din relația (II.12) se poate deduce importanța mare pe care o are menținerea riguros constantă a curentului de alimentare I a punții traductorului pentru precizia de măsurare a debitmetrului electrotermic.

În figura II.8 este redată schema electrică a microdebitmetrului electrotermic 2 [28].

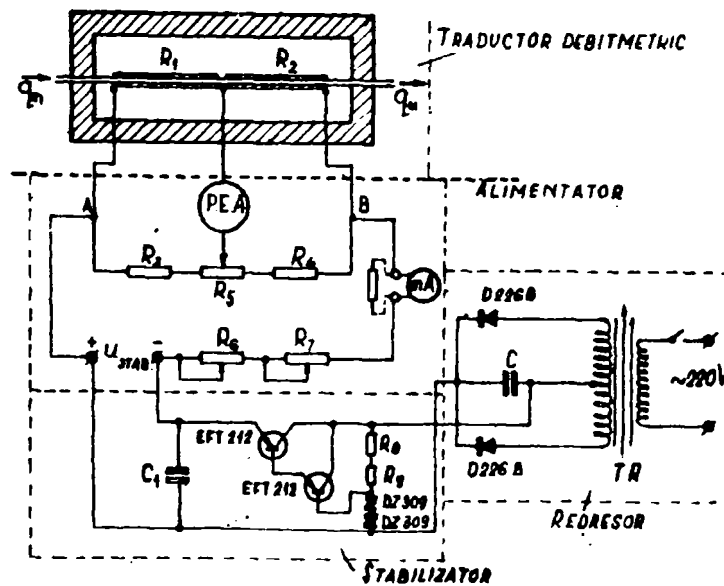


Figura II.8. Schema electrică a microdebitmetrului electrotermic 2

Alimentatorul conține o sursă stabilizată de curent continuu, rezistențele R_3 , R_4 , R_5 , elemente componente ale punții Wheatstone, precum și rezistențele R_6 și R_7 pentru reglajul grosier și fin al curentului de alimentare al punții, controlat prin miliampermetrul mA. Microdebitmetrul electrotermic 2, față de microdebitmetrul electrotermic 1, are îmbunătățiri constructive și în schema alimentatorului.

Și în cazul microdebitmetrului electrotermic 2, studiul comportării la transfer și obținerea cadrului experimental necesar modelării și simulării funcționării acestuia, s-a făcut prin legarea în serie a debitmetrului în montajul experimental prezentat în figura II.6.

II.3.3. Microdebitmetrul electrotermic 3

La elaborarea microdebitmetrului electrotermic 3 s-a urmărit asigurarea unei sensibilități de măsurare ridicată precum și extinderea domeniilor de utilizare, astfel încât pe lângă măsurări de debite și de diferențe de presiuni mici, aparatul să permită totodată și măsurarea sumei și diferenței a două debite mici, necesitate ce apare frecvent în activitatea de cercetare.

Microdebitmetrul electrotermic 3 se deosebește de microdebitmetrele electrotermice prezentate anterior prin faptul că în componența traductorului debitmetric intră două tuburi debitmetriche parcurse consecutiv de gazul al cărui debit se măsoară și toate cele patru rezistențe din puntea Wheatstone (folosită pentru măsurarea diferenței de temperatură $\Delta\theta$ generată de trecerea gazului) sunt active.

În figura II.9 este redat schematic dispunerea rezistențelor microdebitmetrului electrotermic 3 [61].

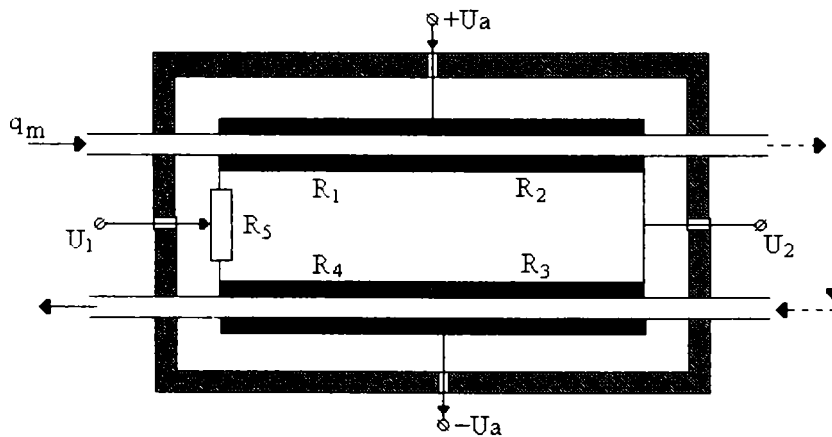


Figura II.9. Schema de principiu a microdebitmetrului electrotermic 3

Prin utilizarea a două tuburi debitmetriche, dispuse paralel unul față de celălalt, și implicit a patru brațe active a punții Wheatstone, se profită nu numai de o mărire a sensibilității ci și de o diminuare a influenței temperaturii mediului ambiant, și totodată aparatul devine apt pentru măsurarea sumei sau diferenței a două debite [26].

În această variantă de funcționare s-a beneficiat din plin de avantajele utilizării a patru brațe active a punții și s-au înlăturat neajunsurile legate de

realizarea practică a traductorului debitmetric prin necesitatea bobinării suprapuse a rezistențelor electrice de pe tubul debitmetric.

Microdebitmetrul electrotermic 3, realizat în baza principiilor de funcționare și a relațiilor de dimensionare corespunzătoare, este alcătuit din următoarele două componente:

- traductorul debitmetric;
- unitatea de alimentare și indicare.

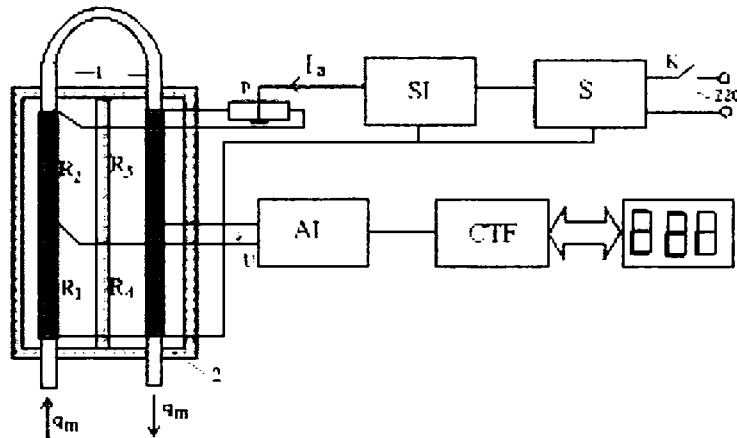


Figura II.10. Microdebitmetrul electrotermic 3 [26]

1 - tub debitmetric; 2 - carcasă protectoare; K - întrerupător; S - sursă stabilizată; SI - sursă curent; AI - amplificator intrare; CTF - convertor tensiune-frecvență

Traductorul debitmetric este format, în esență, din două tuburi debitmetrice și blocul metalic de scurtcircuitare termică.

În calitate de tuburi debitmetrice s-au folosit tuburi de alamă cu diametrul exterior de 3 mm, diametrul interior de 2 mm și lungimea de 290 mm. Desigur, materialul tuburilor debitmetrice nu este în mod obligatoriu alama, ci trebuie ales în concordanță cu proprietățile corozive ale gazelor ce vor circula prin aceste tuburi. Nici diametrul interior nu trebuie să fie în mod obligatoriu 2 mm, putând fi ales și un tub debitmetric cu un diametru interior mai mare, de exemplu 4 mm. În schimb, nu se recomandă folosirea unui tub debitmetric cu un diametru interior mai mic de 2 mm, întrucât prin aceasta se mărește rezistența pneumatică a debitmetrului și se complică problema extinderii domeniului de măsurare.

Capetele tuburilor debitmetrice sunt introduse etanș pe o lungime de 30 mm în tuburi racord. Acestea sunt filetate la un capăt pe o lungime de aproximativ 9 mm și permit intercalarea microdebitmetrului electrotermic pe conducta în care se măsoară debitul de gaz, cu ajutorul unor piulițe olandeze și a ștuțurilor de racord.

Tuburile debitmetrice sunt prevăzute cu câte o înfășurare, într-un singur strat, din fir de cupru emailat. Înfășurarea este prevăzută cu o priză mediană și are lungimea de înfășurare ceva mai mică decât porțiunea tubului debitmetric, situată în interiorul blocului metalic.

Înainte de realizarea înfășurării s-a aplicat tubului debitmetric o peliculă subțire din lac de bachelită întărită în etuvă timp de o oră la temperatura de 140 °C.

Înfășurarea a fost aplicată cu deosebită atenție, spiră cu spiră, având grijă ca cele două tuburi debitmetrice să aibă înfășurări cât mai identice, atât ca lungime de bobinare, cât și ca valoare ohmică. De asemenea s-a avut în vedere ca priza mediană să se situeze cât mai exact la mijlocul înfășurării.

Întrucât sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic este proporțională cu pătratul rezistenței echivalente a punții Wheatstone (conform relației particulare de funcționare (II.62), dedusă în paragraful II.8.1.), se impune utilizarea unei sârme de bobinare cu diametrul cât mai mic. Pe baza acestui considerent s-a utilizat o sârmă de cupru cu diametrul de 0,07 mm, având un coeficient de temperatură $\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3} \text{ grd}^{-1}$.

După aplicarea înfășurării, aceasta s-a acoperit, de asemenea, cu o peliculă foarte subțire din lac de bachelită, după care tuburile debitmetrice au fost ținute în etuvă la 140 °C timp de o oră.

Măsurarea rezistenței electrice a înfășurărilor de pe mai multe tuburi debitmetrice a permis selectarea a două tuburi cu înfășurări apropiate ca valoare ohmică, putându-se asambla un traductor debitmetric în concordanță cu criteriile impuse pentru o corectă funcționare.

Blocul metalic are rolul de a menține capetele tuburilor debitmetrice la aceeași temperatură (scurtcircuitare termică) chiar și la trecerea curentului de gaz prin debitmetru. Pentru a îndeplini această condiție blocul metalic trebuia realizat dintr-un metal având o conductibilitate termică cât mai ridicată, iar secțiunea blocului, perpendiculară pe direcția tuburilor debitmetrice, trebuie astfel dimensionată ca rezistența termică a blocului, pe distanța corespunzătoare lungimii tuburilor debitmetrice să fie practic neglijabilă. Totodată este necesar să se asigure un contact termic cât mai fin între capetele tuburilor debitmetrice și blocul metalic. Această ultimă condiție este însă în contradicție cu necesitatea unei izolări termice cât mai bune a bobinelor de pe tuburile debitmetrice față de blocul metalic, necesitate impusă de atingerea unei sensibilități cât mai ridicate a debitmetrului. Pentru satisfacerea cât mai avansată a acestei condiții, cu păstrarea unui contact termic bun între capetele tuburilor debitmetrice și blocul metalic s-au impus următoarele caracteristici constructive:

- reducerea la minim posibil al grosimii peretelui tuburilor debitmetrice pe toată porțiunea din interiorul blocului metalic;
- realizarea bobinelor debitmetrice cu o singură înfășurare și din sârmă de diametru cât mai mic;
- căptușirea suprafeței interioare a blocului metalic cu material termoizolant.

Primele două condiții au rolul de a reduce la minimum posibil transmiterea căldurii de la bobine la bloc prin conductibilitate termică de-a lungul tuburilor debitmetrice. În schimb, condiția a treia urmărește reducerea transferului de căldură de la bobine la bloc pe calea convecției libere prin intermediul aerului aflat în cavitatea blocului metalic.

Suprafața secțiunii blocului metalic necesară unei scurtcircuitări termice corespunzătoare, s-a calculat plecând de la considerentele prezentate în continuare.

La trecerea curentului de gaz prin tuburile debitmetrice are loc un transport de căldură de la bobina debitmetrică din poziția amonte spre cea din poziția aval. Surplusul de căldură primită de bobina din poziția aval va fi cedat blocului metalic în zona aval a acestuia, de unde trebuie transmis înapoi în zona amonte a blocului metalic, pentru ca între capetele blocului metalic să nu apară o diferență de temperatură. Desigur, pentru ca să aibă loc acest flux termic prin blocul metalic trebuie să existe o oarecare diferență de temperatură între capetele blocului

secțiunea blocului putând fi calculată tocmai, condiționând ca această diferență să nu depășească o anumită limită.

Căldura transportată de curentul de gaz spre un capăt al tubului metalic este dată de relația:

$$Q = C_p \cdot q_m \cdot \Delta\theta \quad (\text{II.14})$$

în care:

C_p – căldura specifică a gazului, [J/(kg·grd)];

q_m – debitul masic de gaz, [kg/s];

$\Delta\theta$ – diferența dintre temperatura medie a celor două bobine de pe tubul debitmetric, [°C];

Q – fluxul termic transportat de curentul de gaz, [W].

Același flux termic trebuie transportat înapoi de către blocul metalic, prin conductibilitate termică, sub acțiunea unei diferențe de temperatură $\Delta\theta_b$, între capetele blocului metalic. Deci:

$$Q = \lambda \cdot F \cdot \frac{\Delta\theta_b}{L_i} \quad (\text{II.15})$$

în care:

λ – conductibilitatea termică a metalului din care este realizat blocul metalic, [W/(m·grd)];

F – suprafața secțiunii blocului, perpendicular pe direcția tuburilor debitmetrice, [m²];

L_i – lungimea porțiunii interioare a tuburilor debitmetrice, [m];

$\Delta\theta_b$ – diferența dintre temperatura capetelor blocului metalic, [°C].

Egalând relațiile (II.14) și (II.15) și condiționând ca $\Delta\theta_b \leq \Delta\theta_{100}$ se obține:

$$F \geq \frac{L_i \cdot C_p \cdot q_m}{\lambda} \cdot 10^2 \quad (\text{II.16})$$

Relația (II.16) permite calculul secțiunii blocului metalic în funcție de natura metalului (λ) și lungimea debitmetrului (L_i).

Masa blocului metalic se poate calcula cu relația (II.17).

$$M = F \cdot L_i \cdot \rho \quad (\text{II.17})$$

unde:

M – masa blocului metalic, [kg];

ρ – densitatea metalului, [kg/m³].

Suprafața secțiunii transversale a blocului este de $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ îndeplinind cu prisosință valoarea minim necesară de $0,169 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ care rezultă din relația (II.16).

A doua componentă constructivă a microdebitmetrului electrotermic 3, unitatea de alimentare și indicare, îndeplinește următoarele funcții:

- alimentarea punții Wheatstone din traductorul debitmetric la o tensiune constantă;
- indicarea valorii tensiunii de dezechilibru U proporțională cu debitul masic q_m ;
- controlul curentului de alimentare al punții Wheatstone.

Montajul electric al microdebitmetrului electrotermic 3 este redat, în ansamblu, în figura II.11.

Schema electrică a unității de alimentare – indicare cuprinde în partea superioară montajul stabilizatorului de tensiune care posedă un factor de stabilizare ridicat fiind totodată protejat față de scurtcircuitări accidentale ale bornelor de ieșire. Reglajul tensiunii de ieșire și implicit al curentului de alimentare al punții se realizează cu rezistența potențiometrică R_5 .

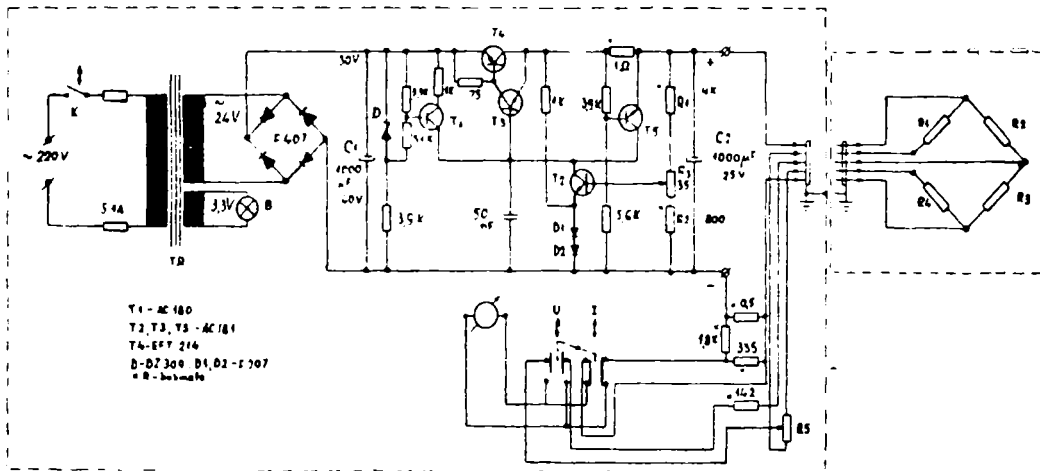


Figura II.11. Schema electrică a microdebitmetrului electrotermic 3

Măsurarea tensiunii de dezechilibru U și a curentului de alimentare se realizează cu ajutorul unității de măsurare – indicare.

Montajul este prevăzut cu borne la care se poate măsura tensiunea de dezechilibru U cu un instrument exterior, ceea ce permite, de asemenea, utilizând o interfață corespunzătoare, preluarea datelor cu ajutorul calculatorului.

Studiul comportării la transfer și obținerea cadrului experimental necesar modelării și simulării funcționării microdebitmetrului electrotermic 3 s-a făcut prin conectarea debitmetrului într-o instalație cu buclă de reglare automată a debitului, prezentată în figura II.12.

Instalația experimentală asigură posibilitatea măsurării suficient de precise a tensiunii de ieșire U și a debitului masic de gaz q_m care trece prin aparat. Această metodă se bazează pe măsurarea directă a tensiunii de ieșire la un milivoltmetru de precizie ridicată și pe măsurarea indirectă a debitului masic de gaz ce trece prin microdebitmetrul electrotermic 3.

Metoda se bazează pe proporționalitatea (egalitatea) existentă între debitul volumic q_v de lichid ce se scurge din vasul V și debitul volumic de gaz care se aspiră prin microdebitmetrul electrotermic 3 (MDET), gazul luând locul lichidului scurs.

Debitul masic de gaz q_m se calculează cu relația (II.8).

Pe durata unei determinări, debitul volumic de lichid q_v , ce se scurge din vasul V , se menține constant prin intermediul unei bucle de reglare automată realizată cu echipamente de automatizare pneumatice de joasă presiune [46].

Aceste elemente lucrează cu presiunea de alimentare de 3000 N/m^2 și cu semnale de ieșire cuprinse în domeniul $500 - 2500 \text{ N/m}^2$ [46].

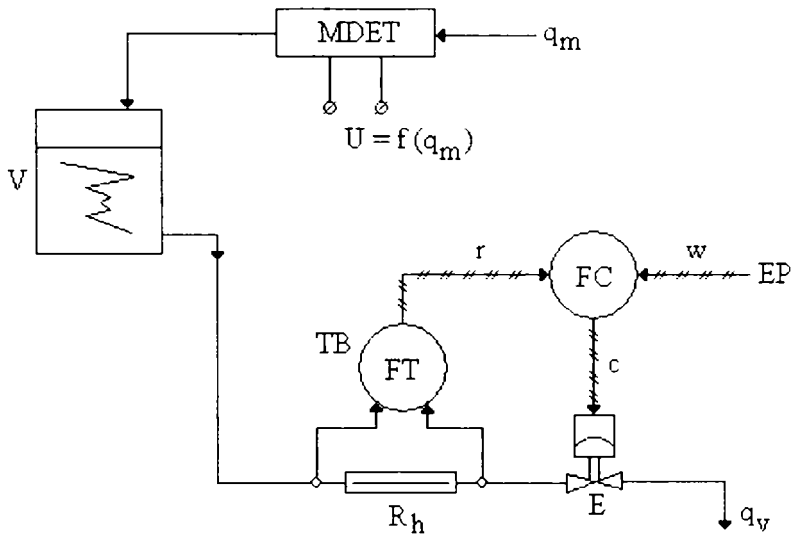


Figura II.12. Schema instalației experimentale utilizate la studiul funcționării microdebitmetrului electrotermic 3

În calitate de element sensibil (ES) s-a utilizat rezistența R_h , care are rolul de a converti debitul de lichid într-o cădere de presiune ΔP (apă).

Mărimea ΔP constituie mărimea de intrare pentru traductorul de bază FT , care are rolul de a converti căderea de presiune ΔP (apă) într-o presiune de aer proporțională.

Presiunea de ieșire a traductorului de bază FT constituie mărimea de reacție r a regulatorului pneumatic FC cu comportare PI . Mărimea de referință w este furnizată de către elementul de prescriere EP pneumatic.

Mărimea de ieșire a regulatorului FC , care este mărimea de comandă c , acționează asupra elementului de execuție E , realizat sub forma unui ventil de reglare pentru debite mici de lichide.

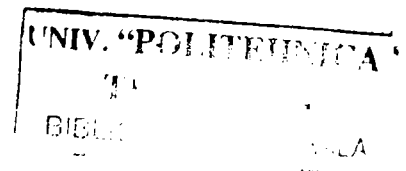
Elementul automatizat la acest circuit de reglare este porțiunea de conductă cuprinsă între rezistența hidraulică R_h (ES) și ventilul de reglare E .

În vederea funcționării în bune condiții, microdebitmetrele electrotermice pentru gaze, se montează în poziție orizontală, intercalat pe conducta de gaz [170]. Racordarea aparatului la conducta de gaz se face de obicei cu tuburi de cauciuc. Este necesar ca legăturile de racordare să fie perfect etanșe.

Aparatul fiind de construcție simetrică, sensul de curgere al gazului nu are importanță în exploatare. Desigur, la inversarea acestuia, tensiunea de ieșire (de dezechilibru) a microdebitmetrului electrotermic își schimbă polaritatea.

În cazul microdebitmetrului electrotermic 3 a fost determinată și distribuția temperaturii de-a lungul tubului debitmetric, atât în absența debitului de gaz, cât și la trecerea acestuia prin debitmetru.

Temperatura a fost măsurată cu ajutorul unor termocuple Fe-Constantan, în unsprezece puncte, așezate la diferite distanțe pe tubul debitmetric. Datele experimentale au fost preluate cu ajutorul calculatorului, prin intermediul unui sistem de achiziție analog numeric.



Dispozitivul experimental este prezentat în figura II.13 [26], iar în figura II.14 este prezentat sistemul de achiziție analog – numeric utilizat [43, 169].

Sistemul de măsurare este alcătuit din interfața analog-numerică ACrj și circuitul de intrare T21, ambele produse de firma Strawberry Tree USA, care pune la dispoziția utilizatorilor și programele minim necesare.

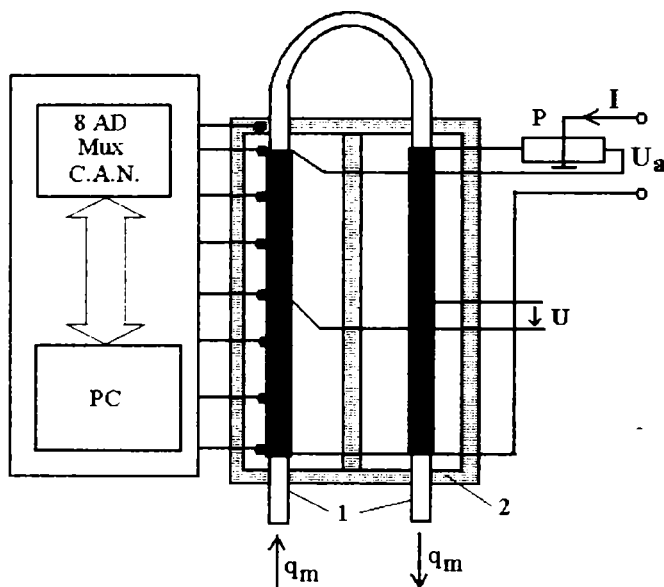


Figura II.13. Dispozitivul experimental utilizat la determinarea distribuției temperaturii de-a lungul tubului debitmetric

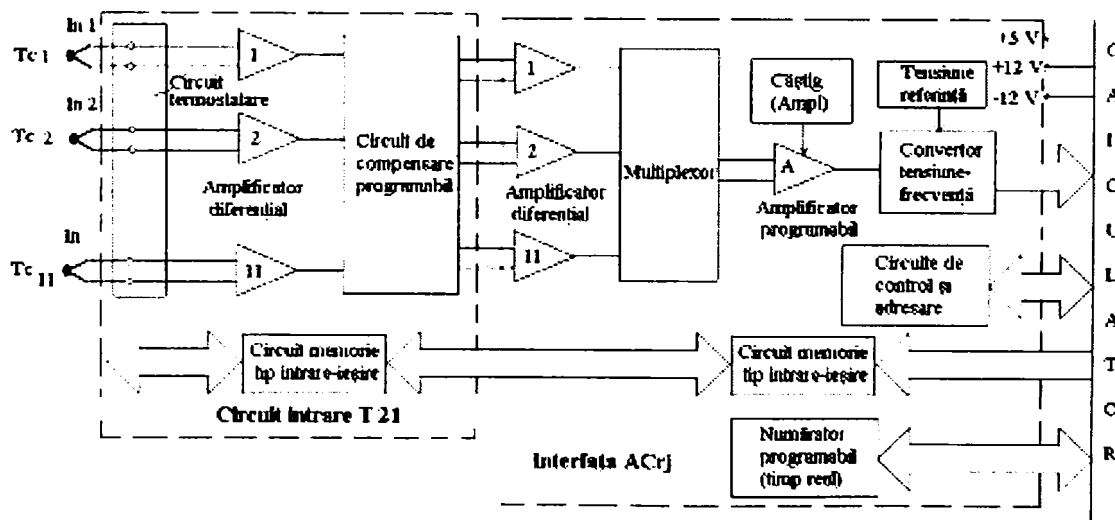


Figura II.14. Schema bloc a sistemului de achiziție analog-numeric utilizat

II.4. Modul de lucru

Modul de lucru pentru studiul comportării la transfer al microdebitmetrelor electrotermic 1 și al microdebitmetrului electrotermic 2 și totodată pentru obținerea și conturarea cadrului experimental necesar determinării modelelor matematice, precum și pentru simularea funcționării acestora, presupune următoarele etape:

1. Se conectează aparatul la rețeaua de alimentare cu curent electric (220 V);
2. Se conectează circuitul de alimentare al punții și se reglează curentul de alimentare al rezistenței de încălzire la valoarea dorită;
3. Se așteaptă circa două ore pentru obținerea unui regim termic stabil în aparat;
4. Se efectuează echilibrarea punții la debit zero;
5. Se intercalează aparatul în montajul din figura II.6;
6. Cu ajutorul elementului de prescriere EP se trece prin sistem aer la diferite debite, modificând ΔP în intervalul 200 – 2000 N/m²;
7. Se măsoară pentru fiecare debit de aer, la un milivoltmetru, tensiunea de dezechilibru U și se citește căderea de presiune ΔP de pe tubul capilar R la un manometru diferențial;
8. Se calculează debitul masic de aer conform relației (II.5), după ce s-a calculat în prealabil valoarea rezistenței pneumatice laminare R ;
9. Se reprezintă grafic dependența dintre tensiunea de dezechilibru U și debitul masic de aer q_m care trece prin tubul debitmetric ($U = f(q_m)$);
10. Pe baza dependenței $U = f(q_m)$ se stabilește forma generală a modelului matematic ce descrie comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic;
11. Se determină coeficienții ecuației matematice ce descrie comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic și se calculează indicatorii de adecvanță ai modelului, prin metodele prezentate în partea I a acestei lucrări;
12. Se testează modelul matematic elaborat, simulând cu ajutorul calculatorului funcționarea aparatului în condițiile cadrului experimental exploatat;
13. Se efectuează validarea simulării calculând indicatorii de adecvanță;
14. Se determină erorile de măsurare pentru prototipul studiat utilizând metodele matematice de calcul al erorilor de măsurare prezentate în partea I a acestei lucrări.

În cazul studiului comportării la transfer al microdebitmetrului electrotermic 3 modul de lucru presupune etapele prezentate mai jos:

1. Se conectează aparatul la rețeaua de alimentare cu curent electric (220 V);
2. Se conectează circuitul de alimentare al punții și se reglează curentul de alimentare al rezistenței de încălzire la valoarea dorită;
3. Se așteaptă circa două ore pentru obținerea unui regim termic stabil în aparat;
4. Se efectuează echilibrarea punții la debit zero;
5. Se intercalează aparatul în montajul din figura II.12;
6. Cu ajutorul elementului de prescriere EP se asigură trecerea a diferite debite de aer prin sistem, prin modificarea valorii prescrișe a mărimii de referință;
7. Se măsoară pentru fiecare debit de aer, la un milivoltmetru, tensiunea de dezechilibru U a microdebitmetrului electrotermic 3, și se măsoară debitul volumic de apă q_v ce părăsește bucla de reglare a debitului de lichid;

8. Se calculează debitele masice de aer corespunzătoare debitelor volumice determinate, conform relației (II.8), relație care este valabilă și în cazul utilizării altor gaze, cu condiția ca densitatea ρ_0 să primească valoarea corespunzătoare gazului al cărui debit se măsoară.

În continuare vor fi parcurse etapele 9. – 14. prezentate la modul de lucru descris anterior, pentru studiul comportării la transfer al microdebitmetrelor electrotermice 1 și 2.

II.5. Studiul comportării la transfer al microdebitmetrelor electrotermice

Studiul comportării la transfer, abordat în acest paragraf, presupune caracterizarea comportării statice și caracterizarea comportării dinamice a celor trei prototipuri de microdebitmetre electrotermice prezentate anterior.

De asemenea, utilizând informațiile obținute la caracterizarea comportării microdebitmetrelor electrotermice se va contura cadrul experimental ce descrie comportarea acestora în diferite condiții de funcționare.

Microdebitmetrele electrotermice pot fi considerate elemente proporționale deoarece se caracterizează prin existența în regim staționar a unei dependențe univoce între variabila de intrare și variabila de ieșire.

Variabila de intrare a microdebitmetrelor electrotermice este debitul masic de gaz q_m , iar variabila de ieșire este tensiunea de dezechilibru U ce ia naștere în puntea Wheatstone.

II.5.1. Studiul comportării statice

În cazul microdebitmetrului electrotermic 1, determinările experimentale în vederea caracterizării comportării statice s-au efectuat măsurând pentru diferite valori ale debitului de aer q_m tensiunea de dezechilibru U , la cinci puteri de încălzire P : 0.85 W (cazul 1), 1.26 W (cazul 2), 1.495 W (cazul 3), 1.71 W (cazul 4), 2.3 W (cazul 5).

În tabelele II.1 – II.5 sunt prezentate rezultatele experimentale obținute în cele cinci cazuri de funcționare studiate – pentru cele cinci puteri de încălzire.

Tabel II.1. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 1–caz 1

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,2	0,35	0,5	0,63	0,7	0,835	0,9	1,02
$U \cdot 10^3$ [V]	1,7	3,1	4,5	5,6	6,3	7,4	8	9,1

Tabel II.2. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 1–caz 2

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,27	0,375	0,51	0,655	0,775	0,9	0,94	1,05
$U \cdot 10^3$ [V]	3,9	5,4	7,4	9,4	11,2	13	13,5	15,1

Tabel II.3. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 1–caz 3

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,105	0,16	0,295	0,445	0,625	0,765	0,925	1,09
$U \cdot 10^3$ [V]	1,9	2,9	5,3	7,9	11,2	13,6	16,5	19,3

Tabel II.4. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 1–caz 4

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,295	0,425	0,57	0,695	0,82	0,945	1,065	1,17
$U \cdot 10^3$ [V]	5,9	8,7	11,8	14,4	17,1	19,6	22,2	24,4

Tabel II.5. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 1–caz 5

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,17	0,25	0,315	0,423	0,5	0,6	0,685	0,7
$U \cdot 10^3$ [V]	5,2	7,7	9,7	13,2	15,5	18,9	21,4	22

În figura II.15 sunt redată caracteristicile statice ale microdebitmetrului electrotermic 1 pentru diferiți curenți de alimentare, respectiv pentru diferite puteri de încălzire.

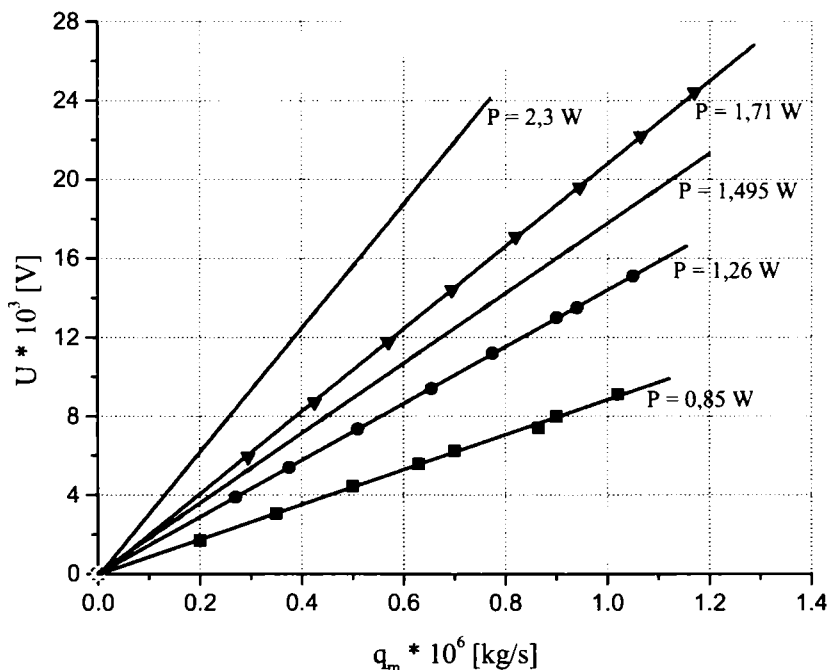


Figura II.15. Comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 1

În figura II.16 este prezentată dependența dintre sensibilitatea aparatului K și puterea de încălzire P, dependență care în limitele domeniului studiat este liniară. Această dependență este descrisă de ecuația (II.18), obținută prin regresie liniară în mediul de calcul Origin 5, pentru care s-au calculat coeficientul de corelație $R = 0,997$ și deviația standard $\sigma = 0,768$.

$$K = -4.935 + 15.531 \cdot P \tag{II.18}$$

Sensibilitatea K a aparatului a fost calculată ca fiind raportul dintre ΔU și Δq_m [140]. În cazul mijloacelor de măsurare ce au caracteristica de conversie liniară, sensibilitatea este chiar panta dreptei [156, 138].

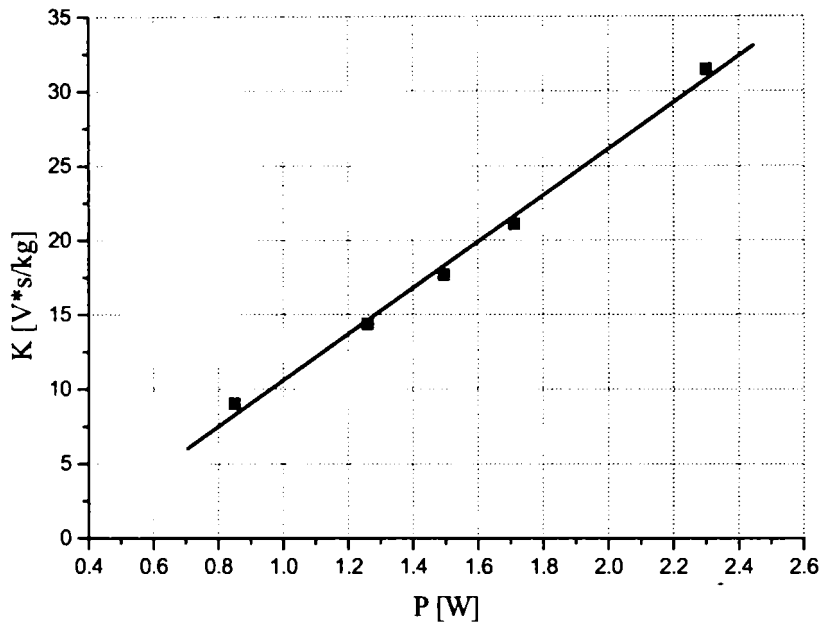


Figura II.16. Dependența dintre sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 1 și puterea de încălzire

Pe baza datelor obținute în urma determinărilor experimentale efectuate, în tabelul II.6 sunt redați parametrii principali ce caracterizează comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 1, precum și sensibilitatea calculată K a aparatului, aceste coordonate reprezentând cadrul experimental exploatat.

Tabel II.6. Parametrii principali ce descriu cadrul experimental exploatat la studiul comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 1

Caz	P [W]	$q_m \cdot 10^6$ [kg/s] Domeniul	$U \cdot 10^3$ [V] Domeniul	K [V·s/kg]
1.	0.85	0.20 – 1.02	1.70 – 9.10	9.024
2.	1.26	0.27 – 1.05	3.90 – 15.1	14.359
3.	1.495	0.10 – 1.09	1.90 – 19.3	17.665
4.	1.71	0.30 – 1.17	5.95 – 24.4	21.086
5.	2.30	0.17 – 0.70	5.20 – 22.0	31.456

Cadrul experimental prezentat în tabelul II.6 poate fi definit ca fiind setul de circumstanțe limitate în domeniul cărora sistemul real va fi observat și înțeles cu scopul de a se executa modelarea matematică și simularea numerică [5, 140].

Determinările experimentale efectuate în vederea caracterizării comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 2 au presupus măsurarea tensiunii de dezechilibru U la diferite valori ale debitului masic de aer q_m , la nouă puteri de încălzire P : 0,69 W (cazul 1), 0,84 W (cazul 2), 1 W (cazul 3), 1,16 W (cazul 4), 1,355 W (cazul 5), 1,55 W (cazul 6), 1,77 W (cazul 7), 2 W (cazul 8) și 2,12 W (cazul 9).

În tabelele II.7 – II.15 sunt prezentate rezultatele experimentale obținute în cele nouă cazuri de funcționare studiate.

Tabel II.7. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 1

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,50	1,03	1,53	1,87	2,22	2,60	2,95	3,23
$U \cdot 10^3$ [V]	2,4	4,8	7	8,5	10,2	11,8	13,2	14,3

Tabel II.8. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 2

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,43	1,00	1,43	1,85	2,25	2,58	2,92	3,20
$U \cdot 10^3$ [V]	2,6	6	8,5	11	13,2	15,1	17	18,8

Tabel II.9. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 3

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,50	0,99	1,46	2,25	2,58	3,00
$U \cdot 10^3$ [V]	3,8	7,5	10,9	16,6	19,2	22,1

Tabel II.10. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 4

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,28	0,58	0,87	1,15	1,40	1,68	1,93	2,60
$U \cdot 10^3$ [V]	2,8	5,4	7,8	10,3	12,8	15	17,7	23,8

Tabel II.11. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 5

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,32	0,60	0,87	1,15	1,42	1,68	1,90	2,20
$U \cdot 10^3$ [V]	3,7	6,7	9,8	12,9	15,8	18,1	20,9	24

Tabel II.12. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 6

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,22	0,59	0,83	1,10	1,38	1,60	1,90
$U \cdot 10^3$ [V]	3	6,6	11,4	14,8	18,8	22	26

Tabel II.13. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 7

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,28	0,55	0,79	1,05	1,24	1,39	1,46	1,60
$U \cdot 10^3$ [V]	4,4	8,8	12,5	16,5	20,5	22,2	23,7	26

Tabel II.14. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 8

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,20	0,28	0,54	0,77	1,02	1,25	1,40
$U \cdot 10^3$ [V]	3,8	5,2	9,8	14,1	19,1	23,2	26

Tabel II.15. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 2–caz 9

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,10	0,22	0,40	0,60	0,79	1,02	1,18	1,28
$U \cdot 10^3$ [V]	2	5	8,1	12	16	20,6	23,8	26

În figura II.17 sunt redată caracteristicile statice ale microdebitmetrului electrotermic 2 pentru cazurile 1 – 4, iar în figura II.18 sunt redată caracteristicile pentru cazurile 5 – 9.

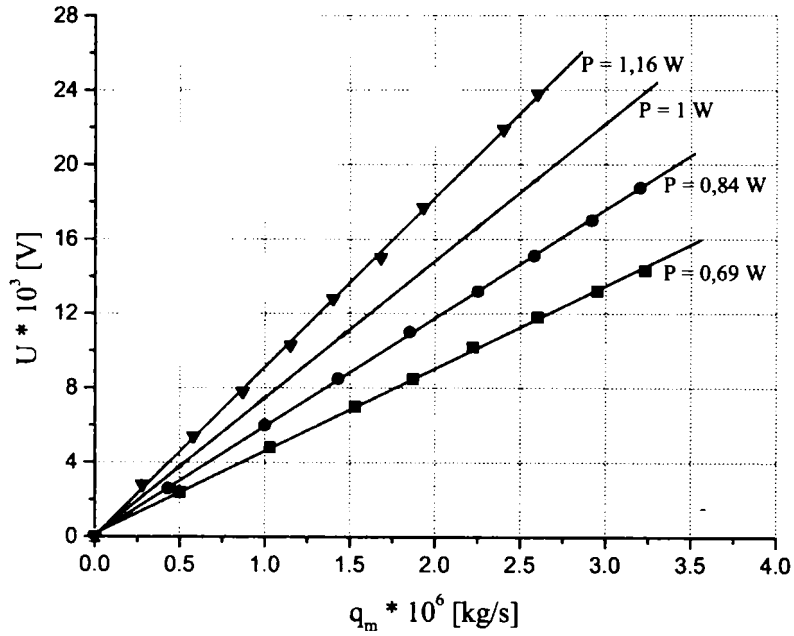


Figura II.17. Comportarea statică a microdebitmetrului 2 în cazurile 1 – 4

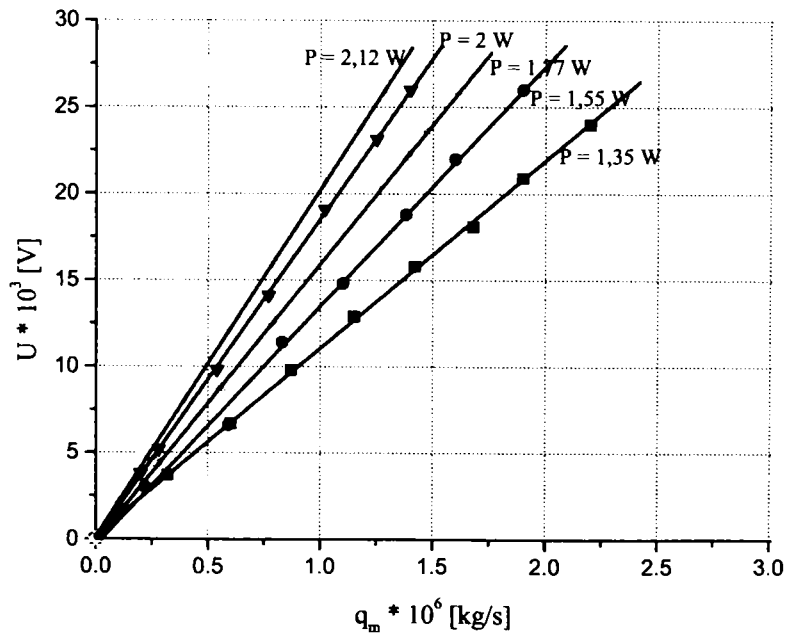


Figura II.18. Comportarea statică a microdebitmetrului 2 în cazurile 5 – 9

În figura II.19 este prezentată dependența dintre sensibilitatea aparatului K și puterea de încălzire P, dependență care în limitele domeniului studiat este liniară. Această dependență este descrisă de ecuația (II.19), pentru care s-au calculat coeficientul de corelație $R = 0,998$ și deviația standard $\sigma = 0,303$, utilizând mediul de calcul Origin 5.

$$K = -3,640 + 11,157 \cdot P \quad (\text{II.19})$$

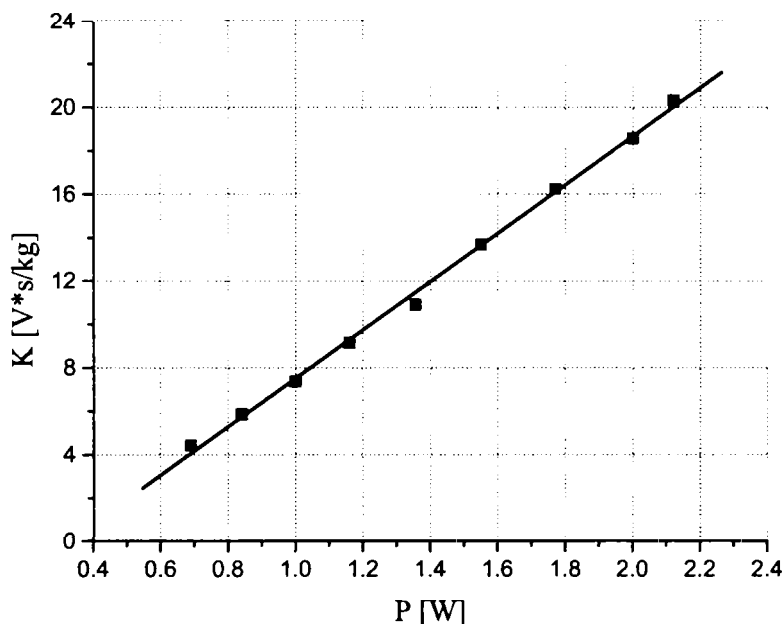


Figura II.19. Dependența dintre sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 2 și puterea de încălzire

În tabelul II.16, pe baza datelor obținute în urma determinărilor experimentale efectuate, a fost conturat cadrul experimental ce caracterizează comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 2.

Tabel II.16. Parametrii principali ce descriu cadrul experimental exploatat la studiul comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 2

Caz	P [W]	$q_m \cdot 10^6$ [kg/s] Domeniul	$U \cdot 10^3$ [V] Domeniul	K [V*s/kg]
1.	0,69	0,50 - 3,23	2,4 - 14,3	4,427
2.	0,84	0,43 - 3,20	2,6 - 18,8	5,859
3.	1	0,50 - 3,00	3,8 - 22,1	7,366
4.	1,16	0,28 - 2,60	2,8 - 23,8	9,153
5.	1,355	0,32 - 2,20	3,7 - 24,0	10,909
6.	1,55	0,22 - 1,90	3,0 - 26,0	13,684
7.	1,77	0,28 - 1,60	4,4 - 26,0	16,25
8.	2	0,20 - 1,40	3,8 - 26,0	18,571
9.	2,21	0,10 - 1,28	2,0 - 26,0	20,312

Înainte de determinarea comportării la transfer a microdebitmetrului electrotermic 3, distribuția temperaturii θ de-a lungul tubului debitmetric, de lungime L , a fost verificată și experimental cu ajutorul montajului prezentat în figura II.13.

Determinările experimentale obținute în absența debitului de gaz, după instalarea regimului termic sunt reprezentate în figura II.20. La trecerea unui debit de gaz q_m , distribuția simetrică a temperaturii se deformează, maximul deplasându-se în direcția curgerii fluidului (figura II.21), conform principiului de funcționare al debitmetrelor termice. Datele experimentale au fost prelucrate utilizând mediul Excel.

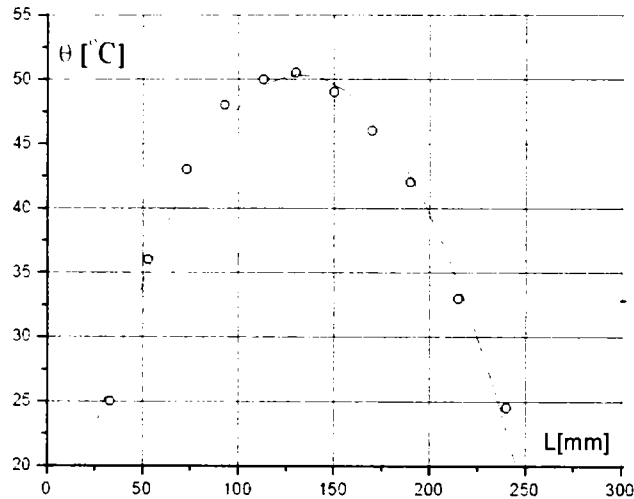


Figura II.20. Distribuția temperaturii în regim staționar de-a lungul tubului debitmetric

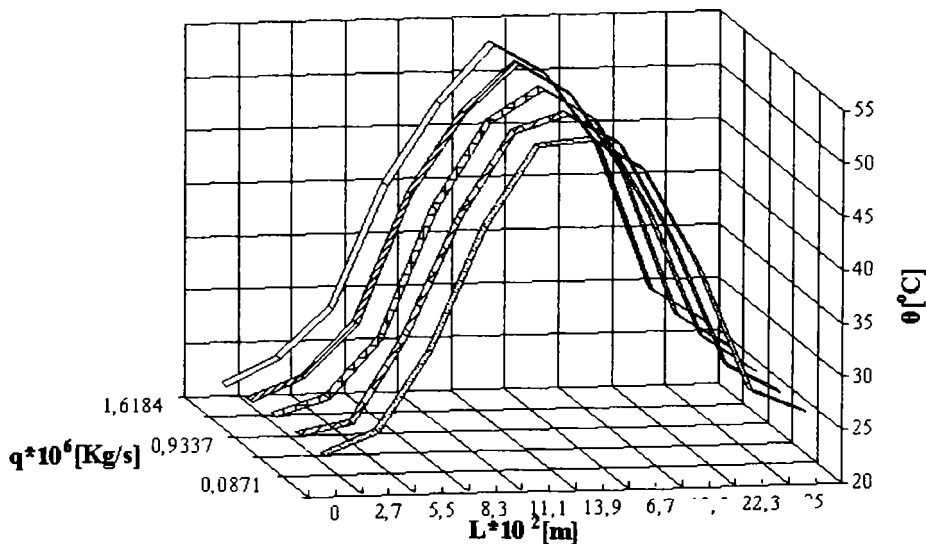


Figura II.21. Distribuția temperaturii în regim dinamic de-a lungul tubului debitmetric

În lipsa debitului de gaz și cu bobinele alimentate, de-a lungul fiecărui tub s-a stabilit, ca și în cazul teoretic prezentat în figura II.1 din paragraful II.2., o distribuție de temperatură simetrică față de mijlocul tubului. Aceasta înseamnă că cele patru bobine sunt la aceeași temperatură medie și montajul în punte este în echilibru.

În aceste condiții, temperatura medie a bobinelor 1 și 4 scade, iar temperatura medie a bobinelor 3 și 2 crește. Deci între bobinele 1, 4 și 3, 2 apare o diferență de temperatură care este o măsură a debitului.

Caracterizarea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 a presupus, la fel ca și în cazurile celorlalte două debitmetre, măsurarea la diferite debite masice q_m de aer a tensiunii de dezechilibru U a punții Wheatstone. Determinările experimentale au fost efectuate pentru zece puteri de încălzire P : 0,76 W (cazul 1), 0,87 W (cazul 2), 0,92 W (cazul 3), 1 W (cazul 4), 1,095 W (cazul 5), 1,185 W (cazul 6), 1,285 W (cazul 7), 1,38 W (cazul 8), 1,498 W (cazul 9), 1,53 W (cazul 10).

În tabelele II.17 – II.26 sunt prezentate rezultatele experimentale obținute în cele zece cazuri de funcționare studiate.

Tabel II.17. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3–caz 1

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,18	0,32	0,40	0,65	1,00	1,30	1,45	1,60
$U \cdot 10^3$ [V]	1,7	2,5	3,4	5	7,5	10	11,2	12,3

Tabel II.18. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3–caz 2

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,20	0,27	0,50	0,80	1,10	1,40	1,50	1,60
$U \cdot 10^3$ [V]	2	2,5	4,3	6,9	9,5	12,2	13	14,2

Tabel II.19. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3–caz 3

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,2	0,3	0,6	0,9	1	1,2	1,5	1,6
$U \cdot 10^3$ [V]	2,3	3,1	6,2	9	10	12	15,1	16,1

Tabel II.20. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3–caz 4

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,20	0,35	0,44	0,60	0,85	1,25	1,45	1,55
$U \cdot 10^3$ [V]	2,5	4,2	5,2	7	9,8	14,5	16,7	17,9

Tabel II.21. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3–caz 5

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,15	0,30	0,50	0,60	0,70	0,95	1,30	1,50
$U \cdot 10^3$ [V]	2,2	4	6,7	8	9,3	12,5	17	19,7

Tabel II.22. Rezultate experimentale–caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3–caz 6

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,20	0,34	0,60	0,80	1,00	1,20	1,30	1,50
$U \cdot 10^3$ [V]	3,1	5,2	9	12	15	18	19,5	22,5

Tabel II.23. Rezultate experimentale-caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3-caz 7

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,15	0,30	0,60	0,90	1,00	1,20	1,40	1,55
$U \cdot 10^3$ [V]	2,5	5	10	15,2	17	20,3	23,5	26

Tabel II.24. Rezultate experimentale-caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3-caz 8

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,15	0,32	0,55	0,80	0,92	1,10	1,30	1,40
$U \cdot 10^3$ [V]	3	6	10,5	15,2	17,5	20,8	24,5	26,5

Tabel II.25. Rezultate experimentale-caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3-caz 9

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,15	0,35	0,50	0,70	1,00	1,15	1,30	1,55
$U \cdot 10^3$ [V]	3,4	7,5	10,5	15	21,2	24,5	27,5	33

Tabel II.26. Rezultate experimentale - caracteristică statică microdebitmetru electrotermic 3 - caz 10

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,10	0,30	0,55	0,80	1,00	1,20	1,40	1,50
$U \cdot 10^3$ [V]	2,5	7	13	19	23,9	28,5	33,4	35,5

În figura II.22 sunt redată caracteristicile statice ale microdebitmetrului electrotermic 3 pentru cazurile 1 - 5, iar în figura II.23 sunt redată caracteristicile pentru cazurile 6 - 10.

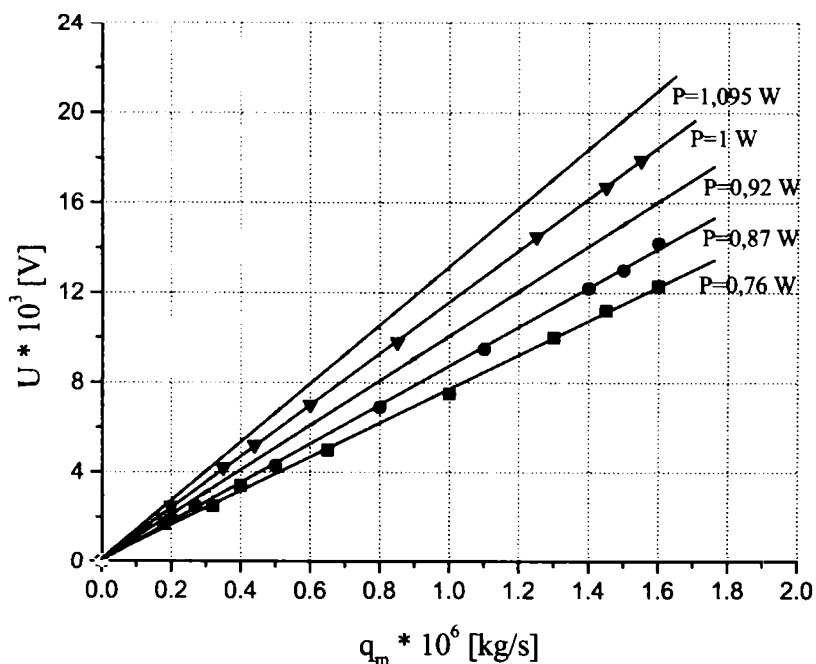


Figura II.22. Comportarea statică a microdebitmetrului 3 în cazurile 1 - 5

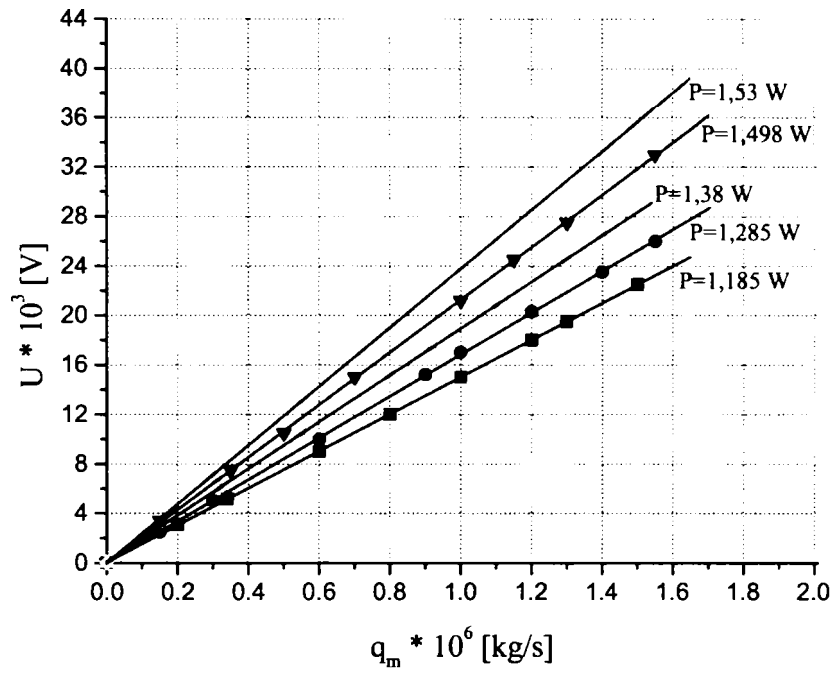


Figura II.23. Comportarea statică a microdebitmetrului 3 în cazurile 6 – 10

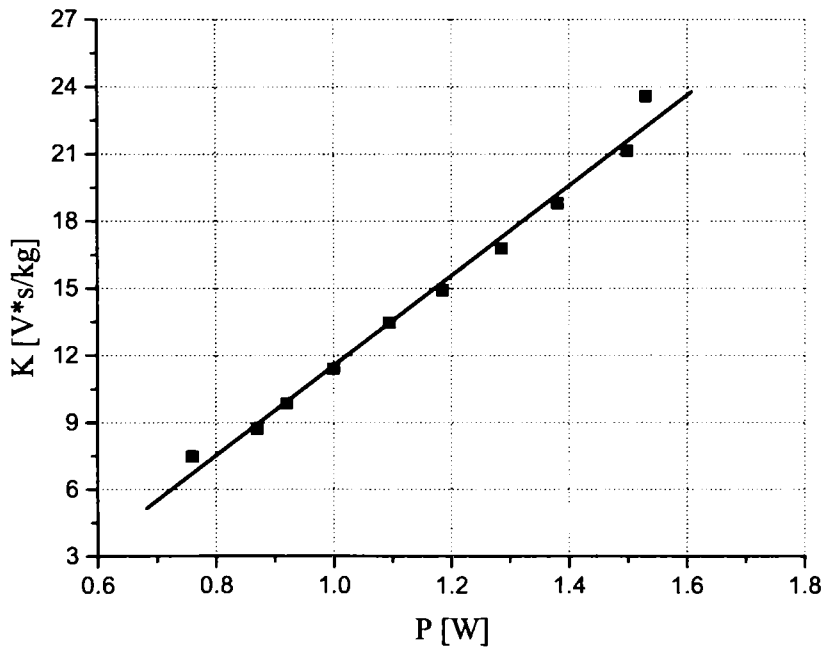


Figura II.24. Dependența dintre sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 și puterea de încălzire

În figura II.24 este prezentată dependența dintre sensibilitatea aparatului K și puterea de încălzire P, dependență care în limitele domeniului studiat este liniară. Această dependență este descrisă de ecuația (II.20), obținută prin metoda celor mai mici pătrate, în urma prelucrării datelor în mediul Origin 5, pentru care s-au calculat coeficientul de corelație $R = 0,994$ și deviația standard $\sigma = 0,630$.

$$K = -8,588 + 20,134 \cdot P \quad (\text{II.20})$$

Pe baza datelor obținute în urma determinărilor experimentale efectuate, în tabelul II.27 sunt redați parametrii principali ce caracterizează comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 3, precum și sensibilitatea calculată K a aparatului, aceste coordonate reprezentând cadrul experimental exploatat.

Tabel II.27. Parametrii principali ce conturează cadrul experimental exploatat la studiul comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3

Caz	P [W]	$q_m \cdot 10^6$ [kg/s] Domeniul	$U \cdot 10^3$ [V] Domeniul	K [V·s/kg]
1.	0,76	0,18 - 1,60	1,7 - 12,3	7,465
2.	0,87	0,20 - 1,60	2,0 - 14,2	8,714
3.	0,92	0,20 - 1,60	2,3 - 16,1	9,857
4.	1	0,20 - 1,55	2,5 - 17,9	11,407
5.	1,095	0,15 - 1,50	2,2 - 19,7	13,462
6.	1,185	0,20 - 1,50	3,1 - 22,5	14,923
7.	1,285	0,15 - 1,55	2,5 - 26,0	16,786
8.	1,38	0,15 - 1,40	3,0 - 26,5	18,8
9.	1,498	0,15 - 1,55	3,4 - 33,0	21,143
10.	1,53	0,10 - 1,50	2,5 - 35,5	23,571

În urma prelucrării datelor experimentale obținute pentru cele trei microdebitmetre electrotermice se observă liniaritatea caracteristicilor statice în domeniul de debit explorat.

Pentru un anumit gaz, sau amestec de gaze, căldura specifică a acestuia fiind constantă, se poate afirma că, comportarea statică a celor trei microdebitmetre electrotermice poate fi redată de ecuația generală de funcționare a acestora, ecuația (II.4) [140]. Această ecuație arată că în regim staționar, pentru o anumită putere de încălzire disipată în rezistențele punții Wheatstone a debitmetrelor, ecuația dependenței dintre tensiunea de dezechilibru U și debitul masic de gaz q_m este de forma:

$$y = a + b \cdot x \quad (\text{II.21})$$

unde:

- y – tensiunea de dezechilibru U, [V];
- x – debitul masic de gaz q_m , [kg/s].

În cadrul determinărilor experimentale s-a constatat creșterea tensiunii de dezechilibru a celor trei microdebitmetre cu creșterea puterii de încălzire. Astfel, se poate afirma că împreună cu aceasta crește și sensibilitatea aparatului [140].

II.5.2. Studiul comportării dinamice

În cadrul studierii comportării dinamice a celor trei microdebitmetre electrotermice, mărimea cea mai semnificativă în raport cu care are sens caracterizarea evoluției sistemului este variabila de ieșire, adică tensiunea de dezechilibru a punții Wheatstone.

S-a considerat un regim staționar constant, starea inițială aleasă fiind cea corespunzătoare regimului de funcționare în care atât variabila de intrare, cât și variabila de ieșire, au valori constante. La un moment dat, considerat ca origine a axei timpului, s-a introdus o modificare a variabilei de intrare. Ca urmare, variabila de ieșire se va modifica în timp, sistemul intrând într-un regim tranzitoriu. Legea de variație a variabilei de ieșire în regim tranzitoriu depinde, alături de structura fizică a sistemului, de legea de modificare a variabilei de intrare. Astfel, se va urmări evoluția variabilei de ieșire în regimul tranzitoriu până la atingerea unei valori constante, corespunzătoare noului regim staționar.

Comportarea dinamică a microdebitmetrelor electrotermice a fost studiată experimental cu metoda clasică de determinare a răspunsului la semnal treaptă.

Studiul comportării dinamice pe baza variației variabilei de intrare sub formă de semnal treaptă este frecvent utilizat datorită simplității obținerii variației acesteia. În acest caz variația variabilei de ieșire reflectă intuitiv proprietățile dinamice ale elementului studiat [61].

Determinările experimentale în vederea caracterizării comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 1 s-au efectuat aplicând diferite semnale treaptă, variind brusc debitul masic q_m de la valoarea de 0 kg/s la $0,25 \cdot 10^{-6}$ kg/s, $0,6 \cdot 10^{-6}$ kg/s, respectiv $0,7 \cdot 10^{-6}$ kg/s, și urmărind variația tensiunea de dezechilibru U în timp (300 s).

Acestea au fost efectuate pentru trei puteri de încălzire P : 0,85 W (cazul 1), 1,26 W (cazul 2) și 1,495 W (cazul 3).

Pentru prelucrarea datelor experimentale în vederea determinării constantelor de timp T ale microdebitmetrului electrotermic s-a utilizat metoda tangentei [89].

În figurile II.25, II.26 și II.27 sunt prezentate caracteristicile de răspuns la semnal treaptă pentru microdebitmetrul electrotermic 1.

În tabelul II.28 sunt prezentate principalele coordonate ce conturează cadrul experimental al caracterizării comportării dinamice pentru microdebitmetrul electrotermic 1.

Semnificațiile notațiilor din tabel:

q_{m0} – valoarea semnalului treaptă, [kg/s];

ΔU – variația totală a mărimii de ieșire, [V];

T – constanta de timp, [s].

Tabel II.28. Cadrul experimental – comportare dinamică – microdebitmetrul electrotermic 1

Cazul	P [W]	$q_{m0} \cdot 10^6$ [kg/s]	$\Delta U \cdot 10^3$ [V]	T [s]
1.	0,85	0,25	2,30	34
		0,70	6,30	36
2.	1,26	0,70	10,05	34
3.	1,495	0,25	4,50	33
		0,60	10,80	34

Media aritmetică a constantelor de timp pentru seturile de determinări experimentale prezentate este de 34,2 s.

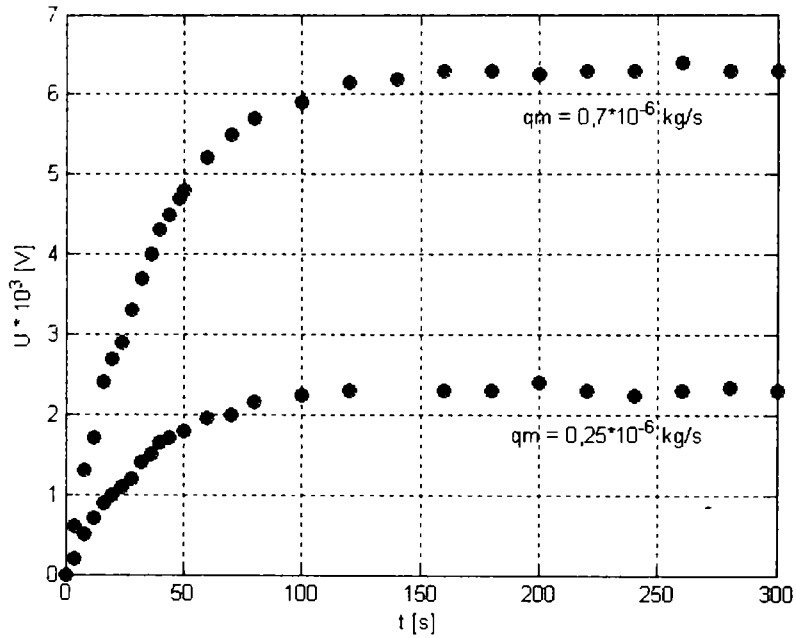


Figura II.25. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 1 - caz 1

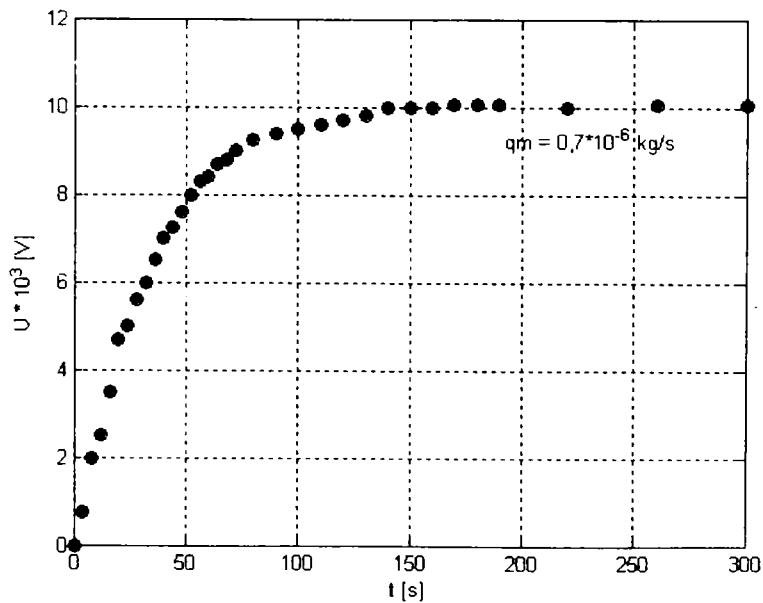


Figura II.26. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 1 - caz 2

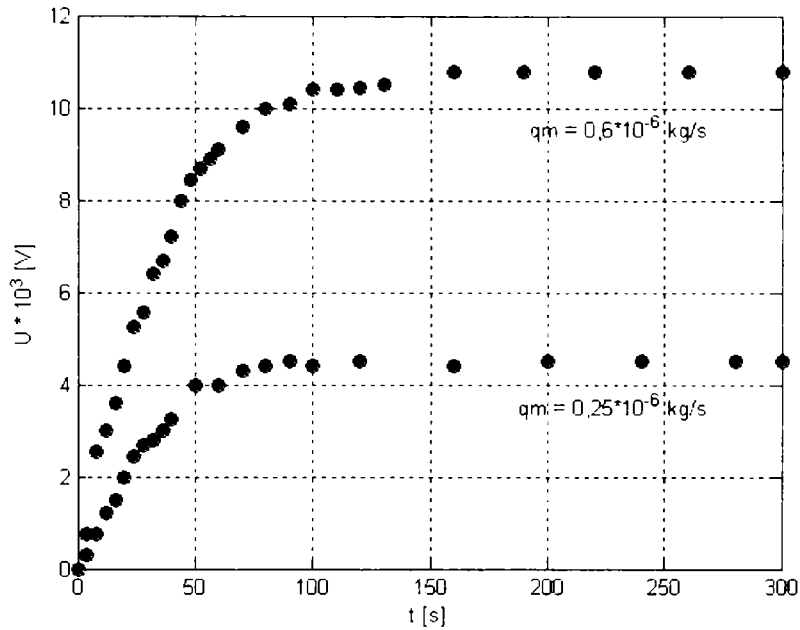


Figura II.27. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 1 – caz 3

În vederea caracterizării comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2, determinările experimentale au presupus aplicarea a diferite semnale treaptă, variind brusc debitul masic q_m de la valoarea de 0 kg/s la $1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$, $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$, respectiv $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$, și urmărind variația tensiunea de dezechilibru U în timp (300 s și 350 s).

Determinările experimentale au fost efectuate pentru șapte puteri de încălzire P : 0,69 W (cazul 1), 0,84 W (cazul 2), 1 W (cazul 3), 1,16 W (cazul 4), 1,355 W (cazul 5), 1,55 W (cazul 6) și 2 W (cazul 7).

În figurile II.28 – II.34 sunt prezentate caracteristicile de răspuns la semnal treaptă pentru microdebitmetrul electrotermic 2.

În tabelul II.29 sunt prezentate principalele coordonate ce conturează cadrul experimental al caracterizării comportării dinamice pentru microdebitmetrul electrotermic 2.

Tabel II.29. Cadrul experimental – comportare dinamică – microdebitmetrul 2

Cazul	P [W]	$q_{m0} \cdot 10^6$ [kg/s]	$\Delta U \cdot 10^3$ [V]	T [s]
1.	0,69	1,8	8,20	35
2.	0,84	1	5,90	34
		2,4	14,00	34,5
3.	1,00	1,8	13,49	34
		2,4	17,90	34,5
4.	1,16	1,8	16,39	33,5
		2,4	21,90	33
5.	1,355	1,8	19,90	33
6.	1,55	1	13,80	33,5
7.	2,00	1	18,50	33

Media aritmetică a constantelor de timp, calculate prin metoda tangentei, pentru seturile de determinări experimentale prezentate este de 33,8 s.

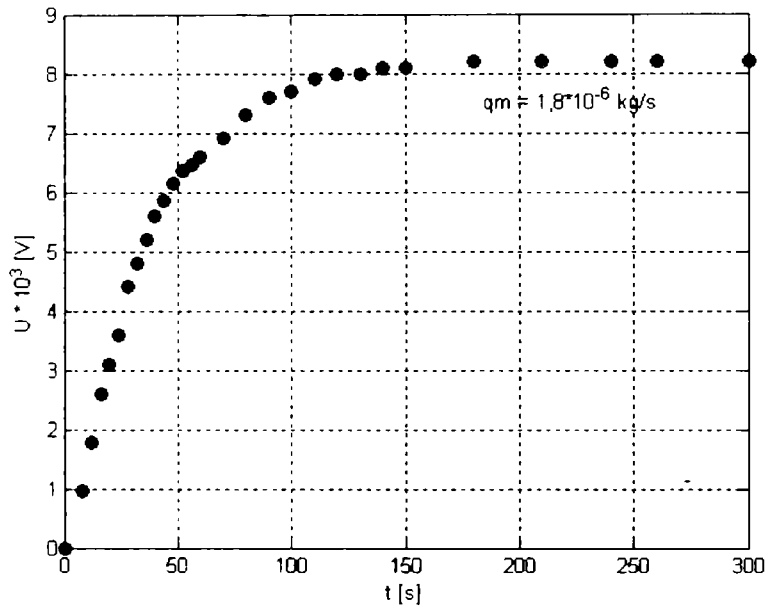


Figura II.28. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 2 - caz 1

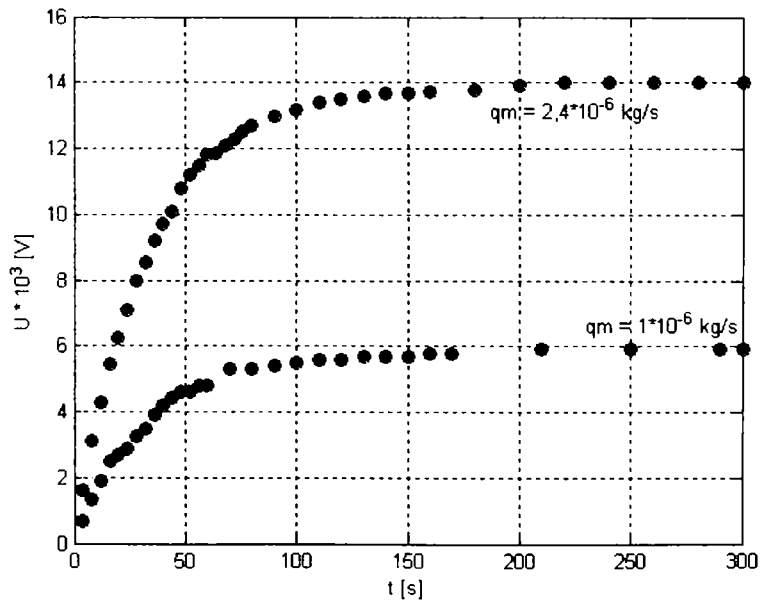


Figura II.29. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 2 - caz 2

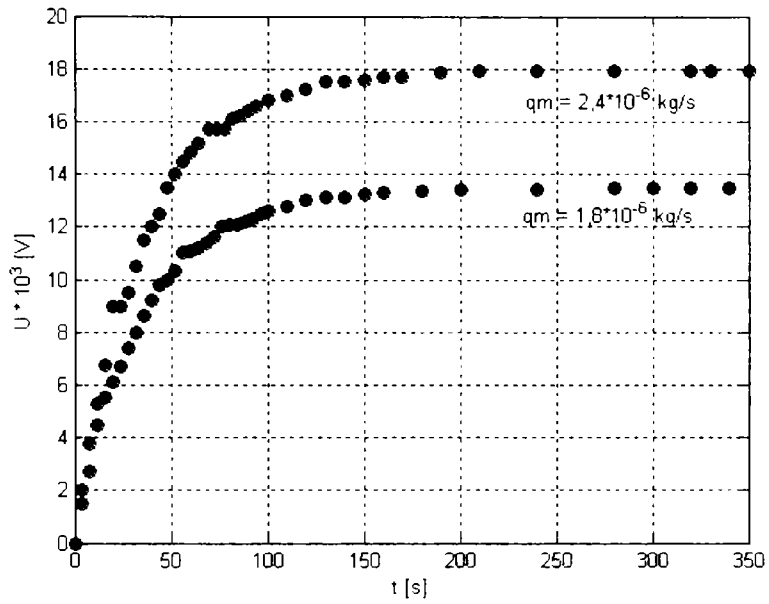


Figura II.30. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 2 – caz 3

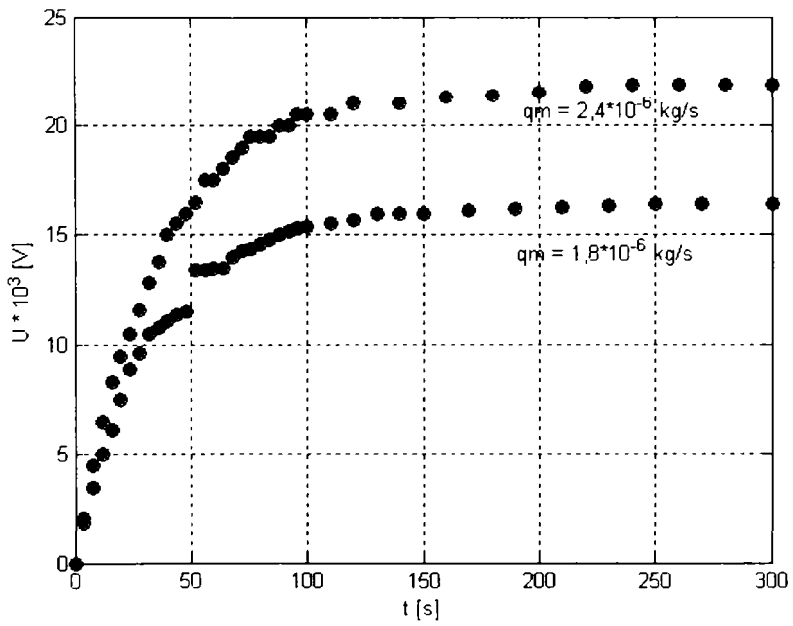


Figura II.31. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 2 – caz 4

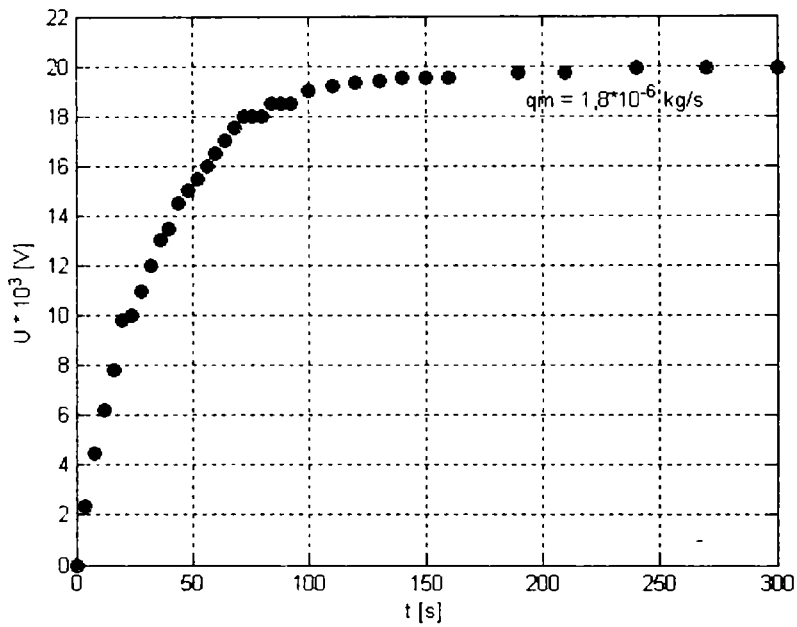


Figura II.32. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 2 - caz 5

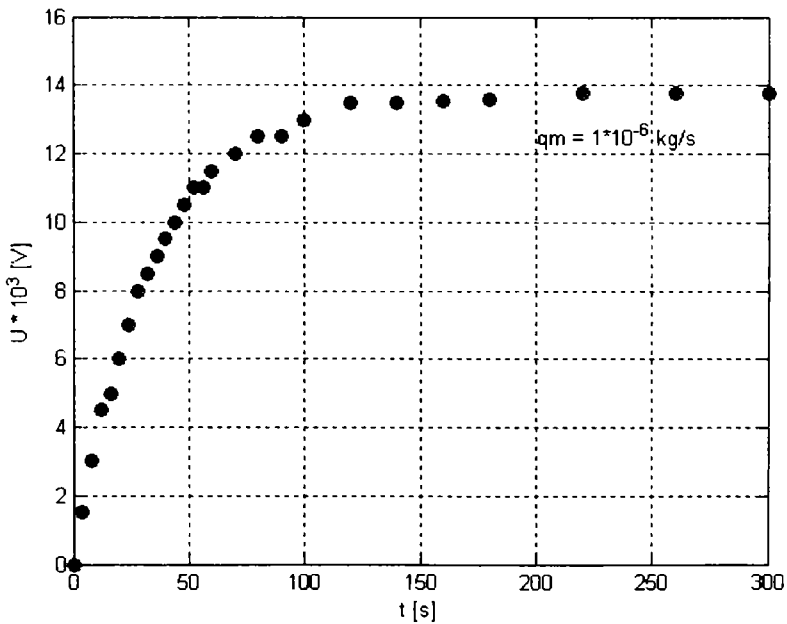


Figura II.33. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 2 - caz 6

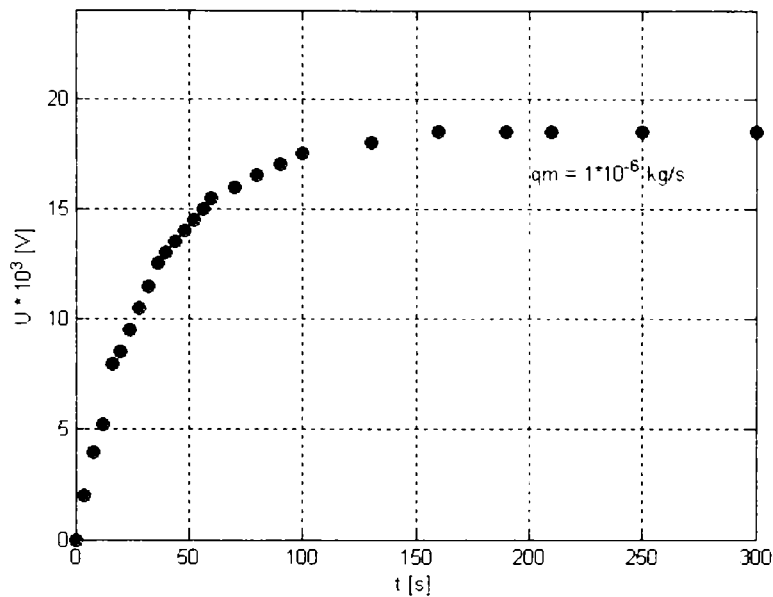


Figura II.34. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 2 - caz 7

Studiul comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3 s-a efectuat aplicând diferite semnale treaptă, variind brusc mărimea de intrare q_m de la valoarea de 0 kg/s la $0,7 \cdot 10^{-6}$ kg/s, respectiv $1,2 \cdot 10^{-6}$ kg/s, și urmărind variația mărimii de ieșire U în timp (300 s).

Determinările experimentale au fost efectuate pentru cinci puteri de încălzire P : 0,76 W (cazul 1), 0,92 W (cazul 2), 1,095 W (cazul 3), 1,285 W (cazul 4) și 1,498 W (cazul 5).

În figurile II.35 – II.39 sunt prezentate caracteristicile de răspuns la semnal treaptă pentru microdebitmetrul electrotermic 3.

În tabelul II.30 sunt prezentate principalele coordonate ce conturează cadrul experimental al caracterizării comportării dinamice pentru microdebitmetrul electrotermic 3.

Tabel II.30. Cadrul experimental - comportare dinamică - microdebitmetrul 3

Cazul	P [W]	$q_{m0} \cdot 10^6$ [kg/s]	$\Delta U \cdot 10^3$ [V]	T [s]
1.	0,76	0,7	5,5	34
		1,2	9,2	35
2.	0,92	0,7	7,1	34,5
		1,2	12	35,5
3.	1,095	0,7	9,3	30
		1,2	15,8	30,5
4.	1,285	0,7	11,8	30
		1,2	20,2	31
5.	1,498	0,7	14,9	30
		1,2	25,4	31

Media aritmetică a constantelor de timp pentru seturile de determinări experimentale prezentate este de 32,15 s. Constantele de timp T au fost calculate utilizând metoda tangentei [89].

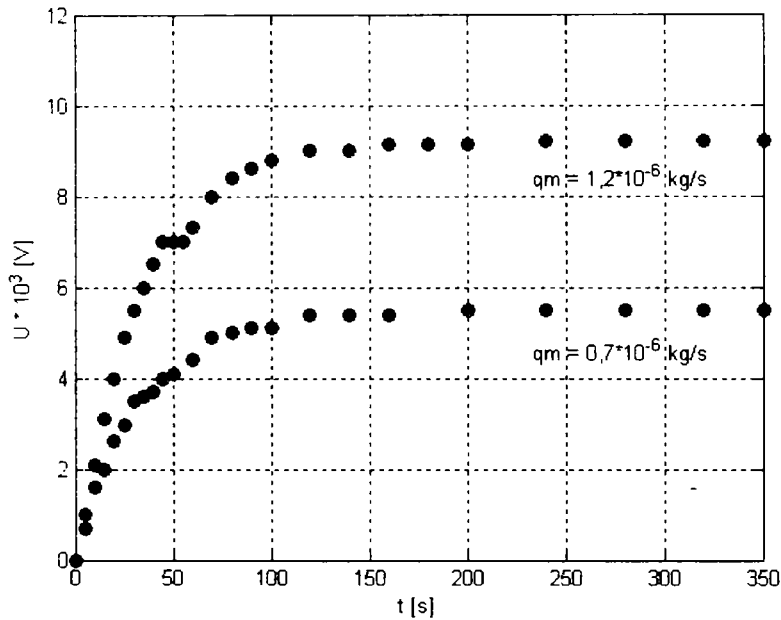


Figura II.35. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 3 - caz 1

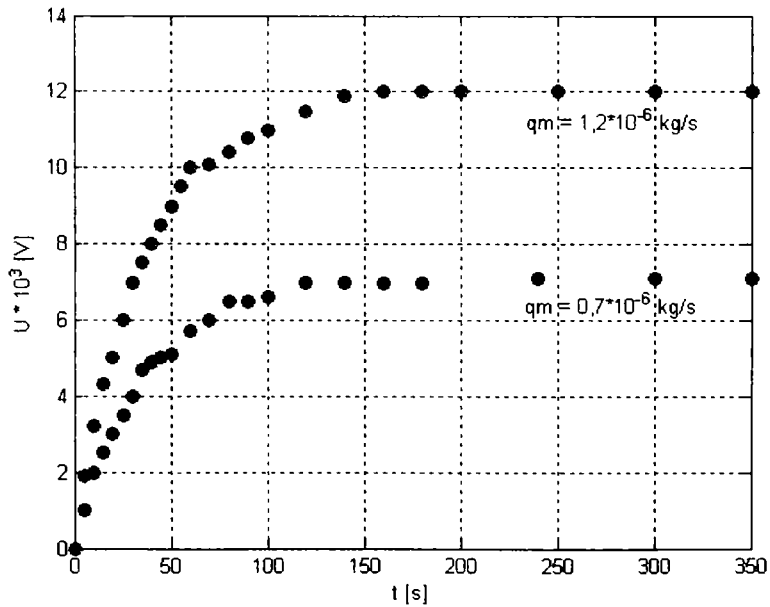


Figura II.36. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 3 - caz 2

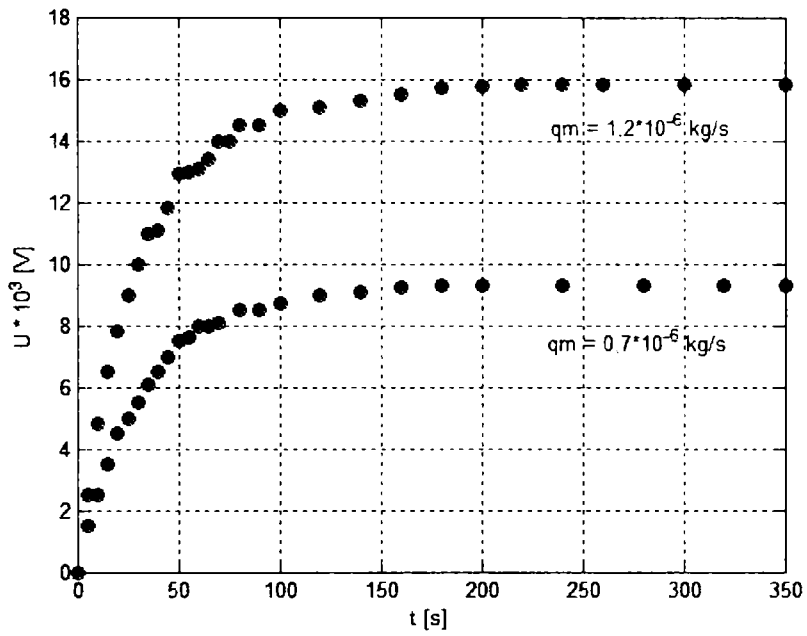


Figura II.37. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 3 – caz 3

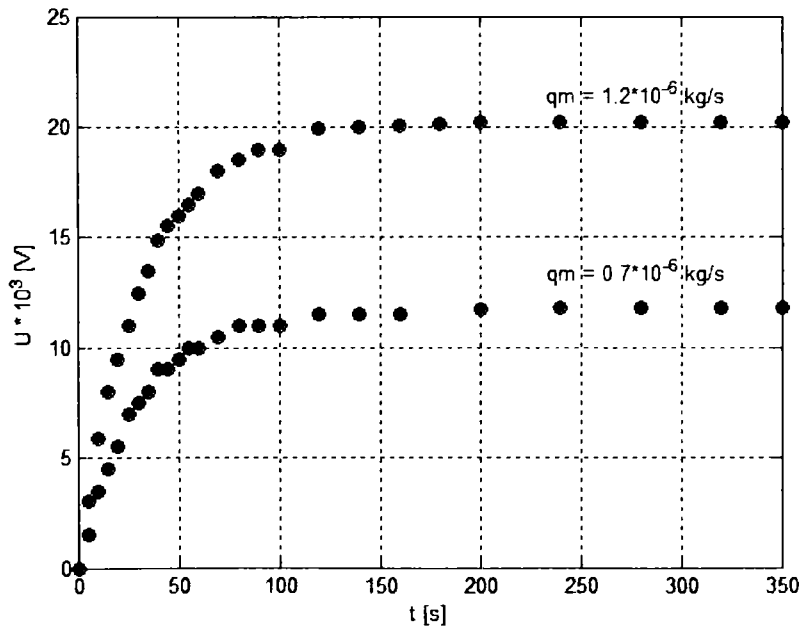


Figura II.38. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 3 – caz 4

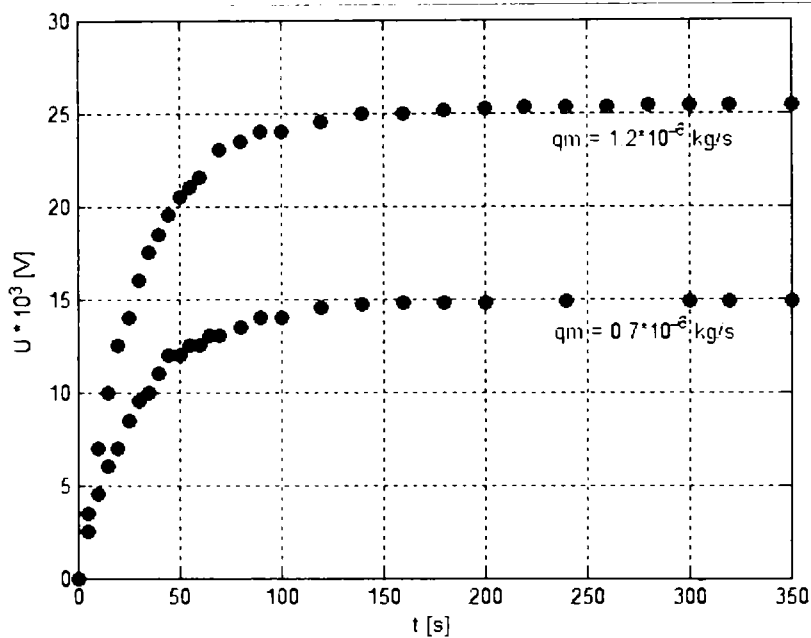


Figura II.39. Caracteristica răspunsului la semnal treaptă a microdebitmetrul electrotermic 3 – caz 5

Se observă că variabila de ieșire în regim tranzitoriu evoluează în timp tinzând spre o valoare constantă. Așadar, sistemul, fiind scos din regimul inițial de o variație în treaptă a variabilei de intrare, tinde către un regim staționar. Astfel, se poate afirma că acesta este stabil.

Caracteristica de răspuns la semnal treaptă pentru cele trei microdebitmetre electrotermice, în cazul tuturor semnalelor treaptă aplicate, este o curbă exponențială, ceea ce corespunde elementelor proporționale de ordinul I.

Comportarea dinamică a celor trei debitmetre reflectă dependența existentă între variațiile variabilei de ieșire și a celei de intrare în regim nestaționar, după o relație de forma:

$$U(t) = f[q_m(t)] \quad (\text{II.22})$$

Ecuția răspunsului la semnal treaptă, conform literaturii de specialitate ([61, 87]), pentru microdebitmetrele electrotermice studiate, se poate scrie:

$$T \cdot U'(t) + U(t) = k \cdot q_m(t) \quad (\text{II.23})$$

în care:

$U(t)$ – variația tensiunii de dezechilibru în timpul regimului tranzitor, [V];

$q_m(t)$ – variația debitului masic în timpul regimului tranzitor, [kg/s];

T – constanta de timp, [s];

k – coeficient de transfer al elementului proporțional de ordinul I.

Coeficientul de transfer este raportul dintre valoarea variabilei de ieșire și valoarea variabilei de intrare, în regim staționar.

Soluția ecuației, adică funcția $U(t)$, care exprimă variația în timp a tensiunii de dezechilibru U provocată de variația în treaptă a debitului masic q_m este de forma [109]:

$$U(t) = k \cdot q_{m0} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (\text{II.24})$$

în care:

q_{m0} – valoarea semnalului treaptă, [kg/s];

t – timpul la un moment dat, [s];

T – constanta de timp, [s].

Atât constanta de timp T , cât și coeficientul de transfer k , depind de puterea de încălzire din rezistențele punții Wheatstone, astfel la creșterea puterii de încălzire, din datele experimentale se observă o ușoară scădere a constantei de timp și o creștere apreciabilă a sensibilității microdebitmetrelor electrotermice. Acest lucru se explică prin existența unei influențe sesizabile pe care o are valoarea cantității de căldură din rezistența de încălzire (care depinde de curentul de alimentare) asupra proceselor complexe de transfer de căldură din tubul debitmetric.

Desigur că atât valoarea constantei de timp T , cât și a sensibilității K , depind de datele constructive ale celor trei microdebitmetre electrotermice, și în primul rând de caracteristicile și dimensiunile tubului debitmetric.

Determinările experimentale efectuate au dus la concluzia că atât în privința comportării dinamice cât și a sensibilității mai ridicate, microdebitmetrul electrotermic 3 este superior celorlalte două microdebitmetre.

II.6. Elaborarea modelelor matematice experimentale ce caracterizează funcționarea microdebitmetrelor electrotermice

Modelul matematic al unui proces este reprezentat de relația dintre variabila de ieșire a procesului și variabilele de intrare [171]. În studiul efectuat, debitul masic de aer q_m reprezintă variabila de intrare a microdebitmetrelor electrotermice, iar tensiunea de dezechilibru U a punții Wheatstone reprezintă variabila de ieșire.

Problema esențială este alegerea formei funcției $U(q_m)$ care descrie cel mai bine dependența dintre cele două variabile. Anterior, s-a admis ecuația dependenței dintre tensiunea de dezechilibru U și debitul masic de gaz q_m ca fiind de forma ecuației (II.21), aceasta reprezentând forma generală a modelului matematic ce descrie comportarea statică a microdebitmetrelor electrotermice.

În tabelul II.31, tabelul II.32 și tabelul II.33 sunt prezentate modelele matematice experimentale ce caracterizează comportarea statică a celor trei microdebitmetre electrotermice, pentru toate cazurile de funcționare (la diferite puteri de încălzire).

Coeficienții modelelor matematice au fost calculați prin metoda celor mai mici pătrate, utilizând mediul de programare Matlab 7.5 [172, 173].

O proprietate foarte importantă a estimațiilor calculate cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate constă în independența acestora față de tipul repartiției rezultatelor sau erorilor de măsurare [138].

Aceste modele matematice sunt pe deplin valide doar dacă reproduc cu fidelitate comportamentul sistemului real pentru cadrul experimental pentru care au

fost definite, utilitatea lor fiind predicția asupra funcționării în condițiile impuse de cadrul experimental. Aplicarea acestora unui cadru experimental extins poate genera erori de predicție, erori care sunt direct proporționale cu extinderea cadrului experimental. Aceasta datorită faptului că aceste modele admit elemente cu valori aleatoare în descrierea matematică, ieșirea modelului nefiind o valoare exactă ci o probabilitate (probabilitate asociată cu numărul de valori observate ale variabilei de ieșire).

Tabel II.31. Ecuțiile matematice ce descriu comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 1

Caz	P [W]	Modelul matematic
1.	0.85	$U = -0,027 \cdot 10^{-3} + 8,912 \cdot 10^3 \cdot q_m$
2.	1.26	$U = 0,007 \cdot 10^{-3} + 14,402 \cdot 10^3 \cdot q_m$
3.	1.495	$U = 0,044 \cdot 10^{-3} + 17,703 \cdot 10^3 \cdot q_m$
4.	1.71	$U = -0,131 \cdot 10^{-3} + 20,911 \cdot 10^3 \cdot q_m$
5.	2.30	$U = -0,131 \cdot 10^{-3} + 31,501 \cdot 10^3 \cdot q_m$

Tabel II.32. Ecuțiile matematice ce descriu comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 2

Caz	P [W]	Modelul matematic
1.	0,69	$U = 0,163 \cdot 10^{-3} + 4,422 \cdot 10^3 \cdot q_m$
2.	0,84	$U = 0,108 \cdot 10^{-3} + 5,810 \cdot 10^3 \cdot q_m$
3.	1	$U = 0,094 \cdot 10^{-3} + 7,420 \cdot 10^3 \cdot q_m$
4.	1,16	$U = 0,027 \cdot 10^{-3} + 9,113 \cdot 10^3 \cdot q_m$
5.	1,355	$U = 0,199 \cdot 10^{-3} + 10,902 \cdot 10^3 \cdot q_m$
6.	1,55	$U = -0,372 \cdot 10^{-3} + 13,911 \cdot 10^3 \cdot q_m$
7.	1,77	$U = -0,194 \cdot 10^{-3} + 16,121 \cdot 10^3 \cdot q_m$
8.	2	$U = -0,028 \cdot 10^{-3} + 18,601 \cdot 10^3 \cdot q_m$
9.	2,21	$U = 0,111 \cdot 10^{-3} + 20,120 \cdot 10^3 \cdot q_m$

Tabel II.33. Ecuțiile matematice ce descriu comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 3

Caz	P [W]	Modelul matematic
1.	0,76	$U = 0,224 \cdot 10^{-3} + 7,503 \cdot 10^3 \cdot q_m$
2.	0,87	$U = 0,102 \cdot 10^{-3} + 8,720 \cdot 10^3 \cdot q_m$
3.	0,92	$U = 0,201 \cdot 10^{-3} + 9,932 \cdot 10^3 \cdot q_m$
4.	1	$U = 0,183 \cdot 10^{-3} + 11,413 \cdot 10^3 \cdot q_m$
5.	1,095	$U = 0,199 \cdot 10^{-3} + 13,001 \cdot 10^3 \cdot q_m$
6.	1,185	$U = 0,093 \cdot 10^{-3} + 14,901 \cdot 10^3 \cdot q_m$
7.	1,285	$U = -0,018 \cdot 10^{-3} + 16,910 \cdot 10^3 \cdot q_m$
8.	1,38	$U = 0,113 \cdot 10^{-3} + 18,812 \cdot 10^3 \cdot q_m$
9.	1,498	$U = 0,104 \cdot 10^{-3} + 21,212 \cdot 10^3 \cdot q_m$
10.	1,53	$U = 0,006 \cdot 10^{-3} + 23,803 \cdot 10^3 \cdot q_m$

În multe cazuri practice legătura dintre doi sau mai mulți parametri care descriu un anumit proces este suficient de strânsă astfel încât variația unui parametru poate fi controlată și exprimată pe baza variației celorlalți parametri [171]. Legăturile funcționale de acest fel se numesc legături stohastice sau probabilistice. Studiul legăturilor de acest fel a condus la dezvoltarea teoriei corelației multiple [174].

În cadrul studiului s-a realizat și evaluarea efectului influenței a doi parametri prin realizarea unei analize de corelație multiplă între tensiunea de dezechilibru U a punții Wheatstone ca variabilă dependentă, respectiv debitul masic de aer q_m care trece prin tubul debitmetric și puterea de încălzire P , ultimele două fiind variabile independente.

Pentru descrierea cât mai exactă a dependenței tensiunii de dezechilibru U de debitul masic de aer q_m și puterea de încălzire P , s-a dorit obținerea unei expresii matematice cât mai simple care să permită exprimarea variabilei de ieșire. Ținând cont de dependențele obținute la caracterizarea comportării statice, s-a propus corelația multiplă liniară. Ulterior, analizând dependențele obținute, s-a constatat că ecuația polinomială de ordinul doi este cea potrivită pentru descrierea comportării celor trei microdebitmetre electrotermice (influența curentului de alimentare și implicat a puterii de încălzire, fiind hotărâtoare în acest sens).

Ecuațiile (II.25) și (II.26) reprezintă forma generală a modelelor matematice ce descriu corelația multiplă liniară, respectiv corelația polinomială de ordinul doi.

$$z = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y \quad (\text{II.25})$$

$$z = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot x \cdot y + a_5 \cdot y^2 \quad (\text{II.26})$$

În ecuațiile (II.25) și (II.26) a_i reprezintă coeficienții ecuației, iar variabilelor x , y și z le corespund următorii parametri:

z – tensiunea de dezechilibru U , [V];

x – puterea de încălzire P , [W];

y – debitul masic q_m , [kg/s].

În cazul corelației multiple liniare, valorile coeficienților a_0 , a_1 și a_2 corespund minimului funcției obiectiv:

$$S = \sum_{j=1}^m (\hat{z}_j - (a_0 + a_1 \cdot x_j + a_2 \cdot y_j)) \quad (\text{II.27})$$

Prin anularea derivatelor parțiale ale funcției S în raport cu coeficienții a_i , a rezultat un sistem de ecuații liniar.

Matricea coeficienților sistemului este:

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m 1 & \sum_{j=1}^m x_j & \sum_{j=1}^m y_j \\ \sum_{j=1}^m x_j & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j^2 \\ \sum_{j=1}^m y_j & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j & \sum_{j=1}^m y_j^2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Vectorul coeficienților liberi ai sistemului este:

$$B = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m \hat{z}_j \\ \sum_{j=1}^m x_j \cdot \hat{z}_j \\ \sum_{j=1}^m y_j \cdot \hat{z}_j \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Valorile coeficienților, în cazul regresiei polinomiale de ordinul doi, corespund minimului funcției obiectiv:

$$S = \sum_{j=1}^m (\hat{z}_j - (a_0 + a_1 \cdot x_j + a_2 \cdot y_j + a_3 \cdot x_j^2 + a_4 \cdot x_j \cdot y_j + a_5 \cdot y_j^2))^2 \quad (\text{II.30})$$

Prin anularea derivatelor parțiale ale funcției S în raport cu coeficienții a_i a rezultat un sistem de ecuații liniar.

Matricea coeficienților sistemului A (II.31) și vectorul coeficienților liberi B sunt:

$$A = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m 1 & \sum_{j=1}^m x_j & \sum_{j=1}^m y_j & \sum_{j=1}^m x_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j & \sum_{j=1}^m y_j^2 \\ \sum_{j=1}^m x_j & \sum_{j=1}^m x_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j^3 & \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j^2 \\ \sum_{j=1}^m y_j & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j & \sum_{j=1}^m y_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j^2 & \sum_{j=1}^m y_j^3 \\ \sum_{j=1}^m x_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j^3 & \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j^4 & \sum_{j=1}^m x_j^3 \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot y_j^2 \\ \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j^3 \cdot y_j & \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot y_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j^3 \\ \sum_{j=1}^m y_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j^2 & \sum_{j=1}^m y_j^3 & \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot y_j^2 & \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j^3 & \sum_{j=1}^m y_j^4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^m \hat{z}_j \\ \sum_{j=1}^m x_j \cdot \hat{z}_j \\ \sum_{j=1}^m y_j \cdot \hat{z}_j \\ \sum_{j=1}^m x_j^2 \cdot \hat{z}_j \\ \sum_{j=1}^m x_j \cdot y_j \cdot \hat{z}_j \\ \sum_{j=1}^m y_j^2 \cdot \hat{z}_j \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

În tabelele II.35 și II.36 sunt prezentați coeficienții ecuației (II.25), respectiv ecuației (II.26), calculați pentru cele trei microdebitmetre electrotermice, cu ajutorul mediului de programare Matlab 7.5.

Trebuie menționat că și aceste modele matematice reprezintă sistemul capabil să reproducă comportamentul la ieșire al sistemului real prin prisma limitărilor impuse de cadrul experimental. Acesta este conturat în tabelul II.34.

Tabel II.34. Limitele cadrului experimental descris de ecuațiile (II.25) și (II.26)

Microdebitmetrul electrotermic	P [W] Domeniul	$q_m \cdot 10^6$ [kg/s] Domeniul	$U \cdot 10^3$ [V] Domeniul
1.	0,85 – 2,30	0 – 1,17	0 – 36,86
2.	0,69 – 2,12	0 – 3,23	0 – 64,95
3.	0,76 – 1,53	0 – 1,60	0 – 35,5

Tabel II.35. Coeficienții ecuației (II.25)

Microdebitmetrul electrotermic	Coeficienții modelelor matematice		
	a_0	a_1	a_2
1.	$-14,62 \cdot 10^{-3}$	$9,14 \cdot 10^{-3}$	$19,97 \cdot 10^3$
2.	$-26,41 \cdot 10^{-3}$	$17,52 \cdot 10^{-3}$	$12,84 \cdot 10^3$
3.	$-17,4 \cdot 10^{-3}$	$15,4 \cdot 10^{-3}$	$14,29 \cdot 10^3$

Tabel II.36. Coeficienții ecuației (II.26)

Microdebitmetrul electrotermic	Coeficienții modelelor matematice					
	$a_0 \cdot 10^3$	$a_1 \cdot 10^3$	$a_2 \cdot 10^{-3}$	$a_3 \cdot 10^3$	$a_4 \cdot 10^{-3}$	$a_5 \cdot 10^{-6}$
1.	3,45	-4,56	-5,61	1,36	15,91	52,66
2.	3,12	-4,72	-3,62	1,59	11,13	3,73
3.	8,49	-15,04	-8,80	6,40	20,31	30,84

Prelucrând datele experimentale obținute în urma exploatării celor trei microdebitmetre electrotermice, cu programul Statistica 6.5, s-au obținut suprafețele prezentate în figura II.40, figura II.41 și figura II.42, suprafețe a căror comportare este descrisă de ecuația (II.26).

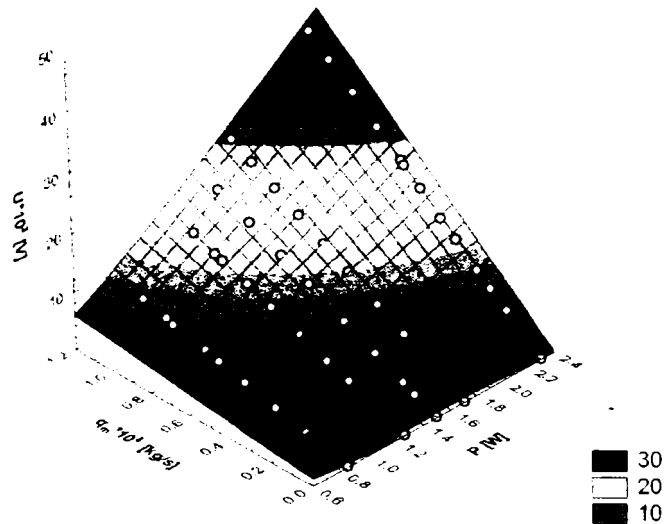


Figura II.40. Dependența tensiunii de dezechilibru funcție de debitul masic și puterea de încălzire în cazul microdebitmetrului electrotermic 1

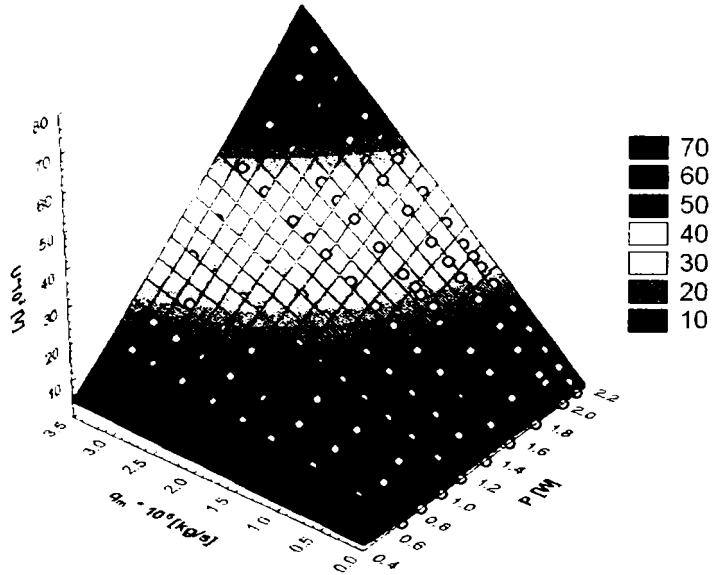


Figura II.41. Dependența tensiunii de dezechilibru funcție de debitul masic și puterea de încălzire în cazul microdebitmetrului electrotermic 2

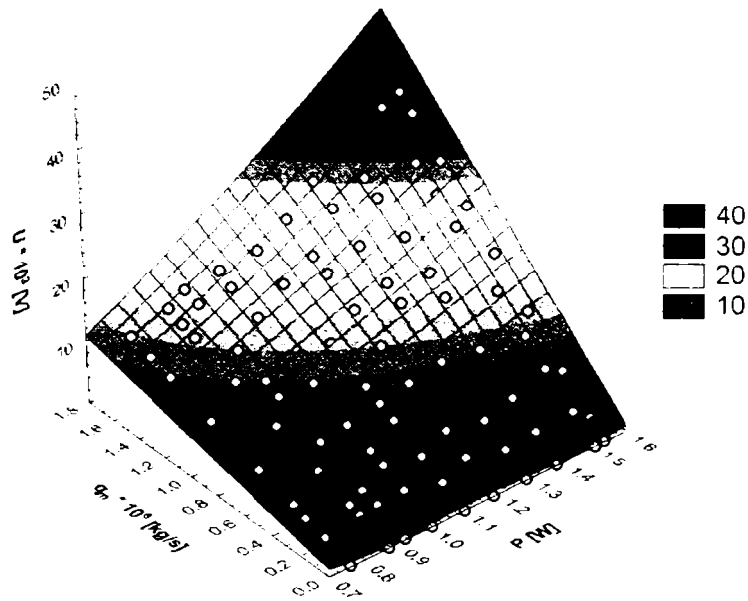


Figura II.42. Dependența tensiunii de dezechilibru funcție de debitul masic și puterea de încălzire în cazul microdebitmetrului electrotermic 3

Modelul concentrat este conceptul cel mai apropiat de cel de model propriu zis. Acesta reprezintă sistemul capabil să reproducă comportamentul la ieșire al sistemului real prin prisma limitărilor impuse de cadrul experimental [5]. Astfel, putem afirma că ecuațiile (II.21) și (II.26) reprezintă forma generală a modelelor concentrate, ce descriu comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic studiat. Pot exista mai multe modele concentrate valide, iar fiecare dintre aceste modele poate fi valid doar într-un cadru experimental determinat și nu în altele.

II.7. Validarea modelelor matematice

Obiectivul validării îl constituie asigurarea faptului că modelul urmărește sistemul real, de fapt constatarea că acele concluzii rezultate din operarea modelului sunt concluzii rezonabile pentru sistemul real.

După calcularea parametrilor modelelor matematice este necesar să se efectueze o comparație între predicțiile modelului și datele furnizate de procesul real. Dacă modelele matematice elaborate sunt adecvate, ele pot fi acceptate cu condiția să nu poată fi simplificate, de pildă prin eliminarea unor termeni sau variabile importante.

Pentru a verifica modelele matematice obținute și prezentate anterior, în cazul corelării a celor trei parametri, se determină experimental valorile parametrilor asociați cu variabilele x , y și z , respectiv a puterii de încălzire P , debitului masic q_m și a tensiunii de dezechilibru U , altele decât cele cu ajutorul cărora s-a construit modelul matematic.

Determinarea valorilor pentru parametrul asociat variabilei z din modelele matematice se face prin introducerea în programul de rezolvare a ecuațiilor matematice a valorilor corespunzătoare pentru parametrii asociați variabilelor x și y . Calculatorul furnizează, pe baza modelelor matematice determinate anterior, valoarea corespunzătoare a parametrului asociat variabilei z .

Pe baza valorilor experimentale obținute pentru parametrii asociați variabilelor x și y , se calculează pentru fiecare din dependențele considerate, valoarea parametrului asociat variabilei z . Aceste date se compară cu cele obținute experimental.

Pentru aceste valori calculate și experimentale s-au determinat indicatorii de adecvare conform metodelor prezentate în partea I a acestei lucrări.

În tabelul II.37, tabelul II.38 și tabelul II.39 sunt prezentați indicatorii de adecvare (dispersia σ^2 , deviația standard σ , coeficientul de corelație R) calculați pentru modelele matematice experimentale ce descriu comportarea statică a celor trei microdebitmetre electrotermice, prezentate în paragraful anterior în tabelele II.31, II.32 și II.33.

Indicatorii de adecvare calculați pentru modelele matematice ce descriu comportarea statică a microdebitmetrelor electrotermice în cazurile de funcționare alese, arată o bună corelare între datele obținute experimental și cele obținute pe baza ecuațiilor matematice ce descriu dependențele dintre parametrii.

Tabel II.37 Indicatorii de adecvare pentru ecuațiile microdebitmetrului electrotermic 1

Caz	Dispersia σ^2	Deviația standard σ	Coeficientul de corelație R
1.	$1,12 \cdot 10^{-8}$	$0,106 \cdot 10^{-3}$	0,999
2.	$0,08 \cdot 10^{-8}$	$0,029 \cdot 10^{-3}$	0,999
3.	$0,25 \cdot 10^{-8}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$	0,999
4.	$0,61 \cdot 10^{-8}$	$0,078 \cdot 10^{-3}$	0,999
5.	$0,90 \cdot 10^{-8}$	$0,095 \cdot 10^{-3}$	0,999

Tabel II.38. Indicatorii de adecvare pentru ecuațiile microdebitmetrului electrotermic 2

Caz	Dispersia σ^2	Deviația standard σ	Coeficientul de corelație R
1.	$1,72 \cdot 10^{-8}$	$0,131 \cdot 10^{-3}$	0,999
2.	$0,69 \cdot 10^{-8}$	$0,083 \cdot 10^{-3}$	0,999
3.	$0,81 \cdot 10^{-8}$	$0,090 \cdot 10^{-3}$	0,999
4.	$3,02 \cdot 10^{-8}$	$0,174 \cdot 10^{-3}$	0,999
5.	$3,88 \cdot 10^{-8}$	$0,197 \cdot 10^{-3}$	0,999
6.	$30,01 \cdot 10^{-8}$	$0,549 \cdot 10^{-3}$	0,998
7.	$60,01 \cdot 10^{-8}$	$0,779 \cdot 10^{-3}$	0,996
8.	$1,99 \cdot 10^{-8}$	$0,141 \cdot 10^{-3}$	0,999
9.	$4,28 \cdot 10^{-8}$	$0,207 \cdot 10^{-3}$	0,999

Tabel II.39. Indicatorii de adecvanță pentru ecuațiile microdebitmetrului electrotermic 3

Caz	Dispersia σ^2	Deviația standard σ	Coefficientul de corelație R
1.	$2,31 \cdot 10^{-8}$	$0,152 \cdot 10^{-3}$	0,999
2.	$2,50 \cdot 10^{-8}$	$0,158 \cdot 10^{-3}$	0,999
3.	$0,94 \cdot 10^{-8}$	$0,097 \cdot 10^{-3}$	0,999
4.	$0,23 \cdot 10^{-8}$	$0,048 \cdot 10^{-3}$	0,999
5.	$0,30 \cdot 10^{-8}$	$0,055 \cdot 10^{-3}$	0,999
6.	$0,10 \cdot 10^{-8}$	$0,031 \cdot 10^{-3}$	0,999
7.	$1,10 \cdot 10^{-8}$	$0,105 \cdot 10^{-3}$	0,999
8.	$0,62 \cdot 10^{-8}$	$0,079 \cdot 10^{-3}$	0,999
9.	$1,42 \cdot 10^{-8}$	$0,119 \cdot 10^{-3}$	0,999
10.	$1,56 \cdot 10^{-8}$	$0,125 \cdot 10^{-3}$	0,999

În tabelele II.40 și II.41 sunt prezentați indicatorii de adecvanță corespunzători modelelor matematice ce descriu corelația multiplă liniară (ecuația (II.25)), respectiv corelația polinomială de ordinul doi (ecuația (II.26)).

Tabel II.40. Indicatorii de adecvanță pentru ecuația (II.25)

Microdebitmetrul electrotermic	Dispersia σ^2	Deviația standard σ	Coefficientul de corelație R	Indicatorul preciziei modelului R^2
1	$7,60 \cdot 10^{-6}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$	0,951	0,905
2	$0,29 \cdot 10^{-6}$	$5,39 \cdot 10^{-3}$	0,939	0,882
3	$7,94 \cdot 10^{-6}$	$2,81 \cdot 10^{-3}$	0,948	0,899

Tabel II.41. Indicatorii de adecvanță pentru ecuația (II.26)

Microdebitmetrul electrotermic	Dispersia σ^2	Deviația standard σ	Coefficientul de corelație R	Indicatorul preciziei modelului R^2
1	$0,07 \cdot 10^{-6}$	$0,26 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,999
2	$0,23 \cdot 10^{-6}$	$0,48 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,999
3	$0,22 \cdot 10^{-6}$	$0,47 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,997

Analizând dependențele obținute în figurile II.40, II.41 și II.42, se poate afirma că ecuația (II.26) descrie cu suficientă precizie comportarea celor trei microdebitmetre electrotermice, în condițiile de funcționare specificate în tabelul II.34 – tabel ce conturează cadrul experimental pentru care au fost determinate modelele matematice. Precizia modelelor matematice elaborate este confirmată și de indicatorii de adecvanță ai acestora.

Corelațiile prezentate în figurile II.43 – II.48 evidențiază, de asemenea, precizia modelelor matematice generate, prin dispunerea aproape simetrică (pentru ecuația (II.25)), respectiv simetrică (pentru ecuația (II.26)), a rezultatelor experimentale cu cele obținute pe baza modelului matematic.

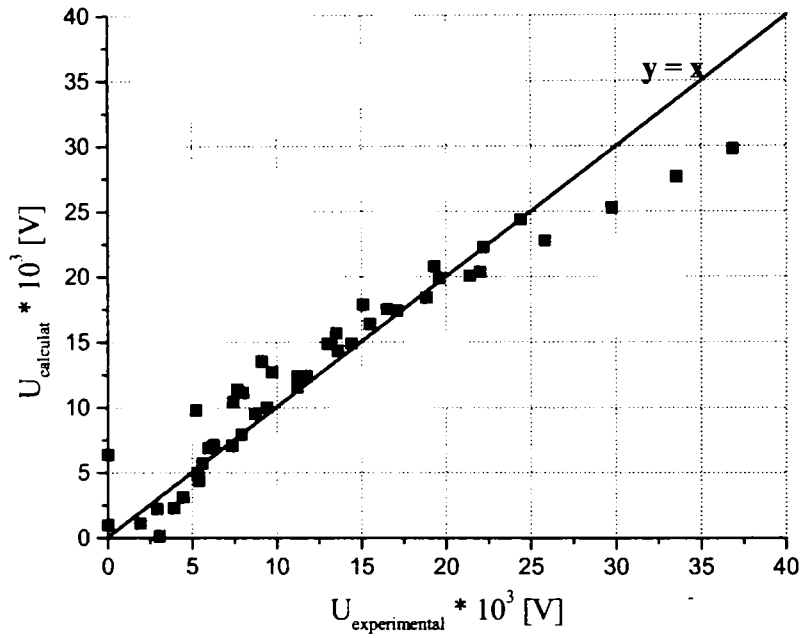


Figura II.43. Corelarea dintre rezultatele experimentale și cele obținute pe baza ecuației (II.1.25) – pentru microdebtmetrul electrotermic 1

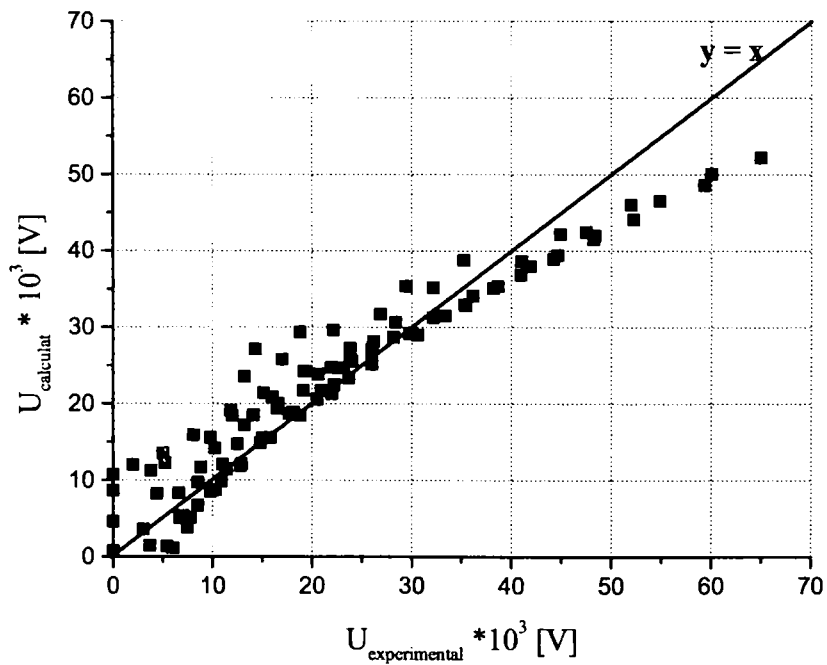


Figura II.44. Corelarea dintre rezultatele experimentale și cele obținute pe baza ecuației (II.2.5) – pentru microdebtmetrul electrotermic 2

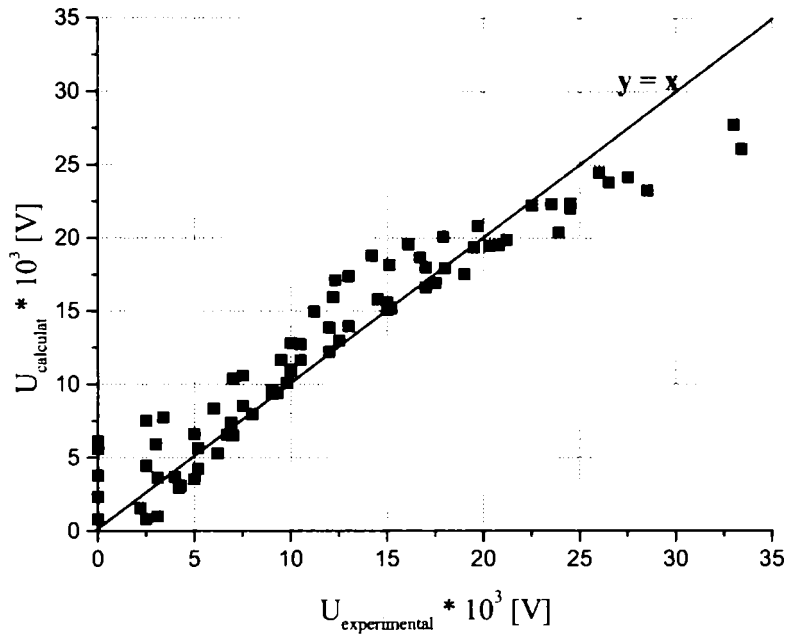


Figura II.45. Corelarea dintre rezultatele experimentale și cele obținute pe baza ecuației (II.26) – pentru microdebitmetrul electrotermic 3

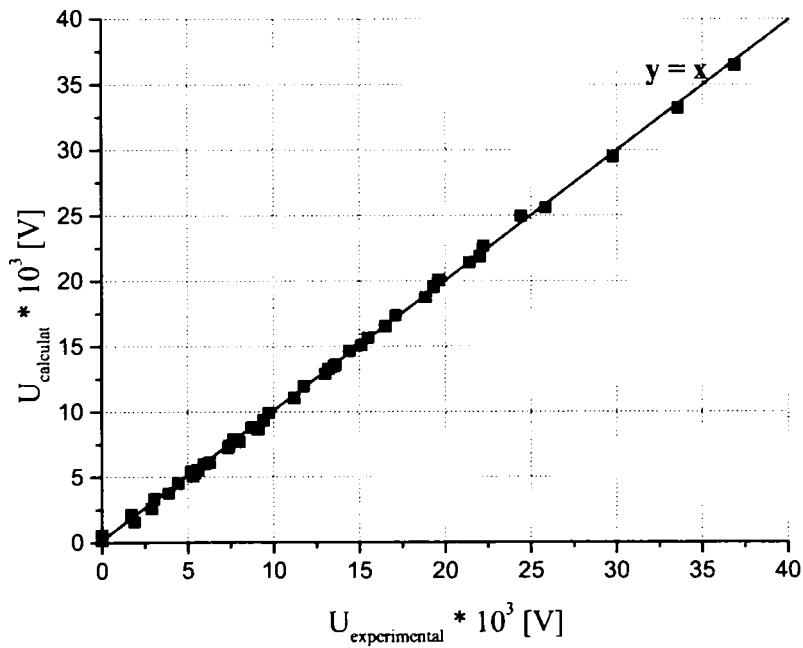


Figura II.46. Corelarea dintre rezultatele experimentale și cele obținute pe baza ecuației (II.26) – pentru microdebitmetrul electrotermic 1

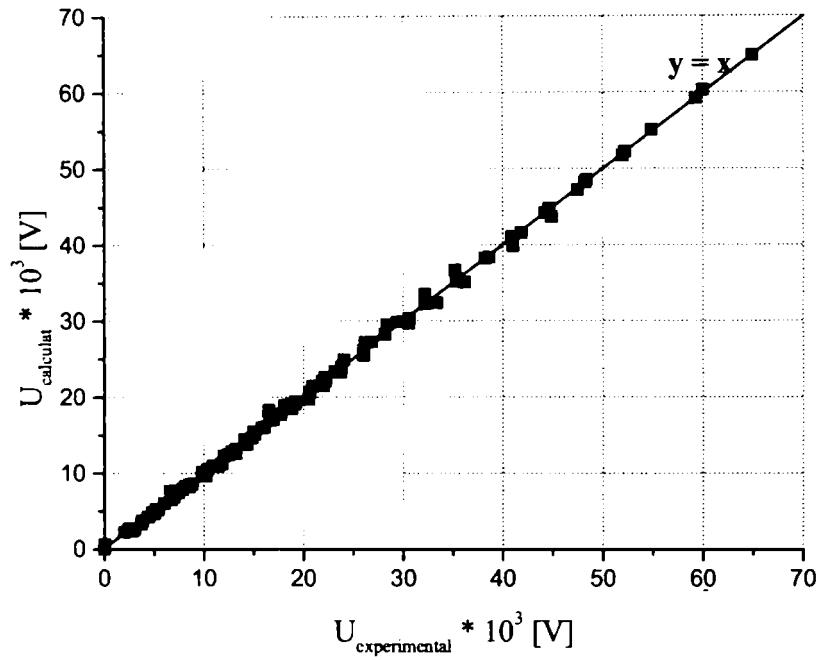


Figura II.47. Corelarea dintre rezultatele experimentale și cele obținute pe baza ecuației (II.26) – pentru microdebtmetrul electrotermic 2

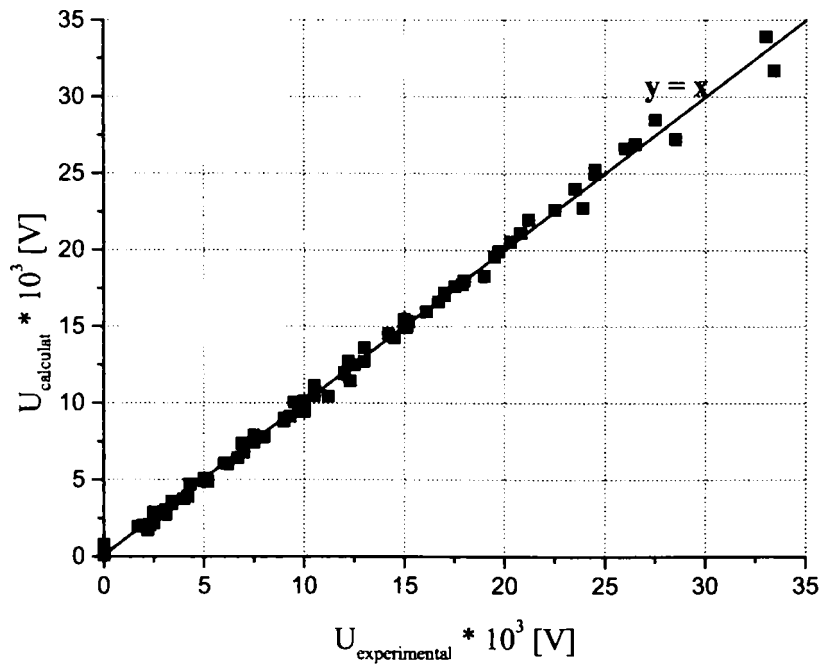


Figura II.48. Corelarea dintre rezultatele experimentale și cele obținute pe baza ecuației (II.26) – pentru microdebtmetrul electrotermic 3

II.8. Determinarea performanțelor microdebitmetrului electrotermic pentru gaze și studii asupra posibilității de îmbunătățire a acestora

În continuare se vor studia performanțele microdebitmetrului electrotermic 3, în funcție de parametrii săi constructivi și funcționali, cu scopul de a stabili relațiile cantitative pentru exploatarea optimală a acestuia.

Pentru aceasta este necesară stabilirea ecuației particulare de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3 și calculul parametrilor constructivi ce intervin în această ecuație.

Ulterior, utilizând ecuația particulară de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3 se va studia sensibilitatea acestuia prin analiza factorilor (parametrii constructivi și funcționali) ce influențează performanțele de funcționare și se va încerca simularea comportării debitmetrului în diferite condiții de exploatare.

Totodată, în acest paragraf vor fi prezentate posibilitatea de măsurare cu ajutorul microdebitmetrului electrotermic 3 a sumei și diferenței a două debite de gaze și posibilitatea de extindere a domeniului de măsurare al acestuia cu ajutorul șunturilor pneumatice.

II.8.1. Stabilirea ecuației particulare de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3

După cum s-a arătat, debitmetrele electrotermice pentru gaze produc o tensiune de dezechilibru a punții Wheatstone proporțională cu produsul dintre căldura specifică a gazului și debitul masic de gaz ce trece prin tubul debitmetric [26, 140]:

$$U = B \cdot C_p \cdot q_m \quad (\text{II.3})$$

Factorul de proporționalitate B , care exprimă sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic, depinde de parametrii constructivi și funcționali ai acestuia. În vederea concretizării acestei dependențe, în cazul microdebitmetrului electrotermic 3, redat principial în figura II.49, trebuie stabilite relații care exprimă dependența rezistenței electrice a brațelor punții Wheatstone de puterea electrică disipată în fiecare braț, precum și dependența temperaturii medii θ_m a brațelor și a temperaturii maxime θ_{\max} la mijlocul tubului debitmetric (la debit zero), de asemenea de puterea electrică disipată în fiecare braț (figura II.50).

În absența curentului de gaz cele patru brațe ale punții Wheatstone se gasesc la aceeași temperatură medie θ_m și implicit au aceeași rezistență electrică R , dată de relația (II.33).

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot \theta_m) \quad (\text{II.33})$$

în care:

R_0 – rezistența fiecărui braț la 0 °C, [Ω];

α – coeficientul de temperatură al metalului din care sunt confecționate termorezistențele R_1, R_2, R_3, R_4 , [$1/^\circ\text{C}$];

θ_m – temperatura medie a brațelor, [$^\circ\text{C}$].

Temperatura medie depinde de puterea electrică disipată în fiecare braț și de temperatura mediului ambiant, în conformitate cu relația (II.34).

$$RI^2 = A(\theta_m - \theta_a) \quad (\text{II.34})$$

în care:

R – rezistența unui braț, [Ω];

I – intensitatea curentului ce trece prin rezistență, [A];

A – transmitanța termică globală, între bobină și mediul ambiant, [W/grd];

θ_a – temperatura mediului ambiant, [$^{\circ}\text{C}$].

Relația (II.34) exprimă egalitatea dintre puterea electrică disipată în rezistență și fluxul de energie termic transmis de la rezistență la mediul ambiant.

Eliminând între relațiile (II.33) și (II.34) mărimea θ_m , se obține:

$$R = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_0 \cdot I^2} \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_m) \quad (\text{II.35})$$

relație care exprimă dependența rezistenței electrice a brațelor punții de temperatura mediului ambiant precum și de intensitatea curentului ce trece prin fiecare rezistență.

Notând raportul $\frac{A}{A - \alpha \cdot R_0 \cdot I^2}$ prin C, relația (II.35) devine:

$$R = C \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_m) \quad (\text{II.36})$$

Coefficientul C, de valoare supraunitară și fără dimensiuni, exprimă creșterea rezistenței electrice datorită încălzirii acesteia la trecerea curentului electric.

Temperatura maximă θ_{\max} de la mijlocul fiecăruia din cele două tuburi debitmetrice se poate calcula admitând, conform datelor din literatură [41], o distribuție parabolică a temperaturii tuburilor (figura II.50, curba a).

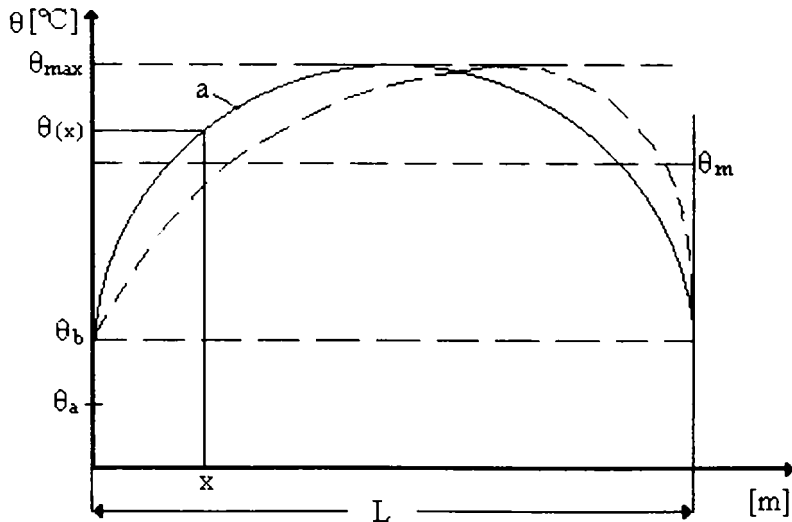


Figura II.50. Distribuția temperaturii de-a lungul tubului debitmetric

Notând prin $\theta(x)$ temperatura tubului la o distanță x, măsurată de la începutul unei bobine, se poate scrie:

$$\theta(x) = ax^2 + bx + c \quad (\text{II.37})$$

În continuare este prezentată determinarea constantelor a , b și c .

Termenul liber c este desigur egal cu temperatura tubului la începutul bobinei ($x = 0$).

$$c = \theta(0)$$

Admițând că bobinarea s-a făcut pe toată lungimea tubului din interiorul blocului metalic, se poate considera că temperatura la începutul bobinei este egală cu temperatura blocului metalic θ_b :

$$\theta(0) = \theta_b$$

Deci:

$$c = \theta_b \quad (\text{II.38})$$

Având în vedere că maximum se găsește la mijlocul tubului ($x = 1/2$), se poate scrie:

$$\frac{d\theta}{dx} = 0 \quad \text{pentru } x = \frac{1}{2}$$

adică:

$$2a \cdot \frac{1}{2} + b = 0 \quad (\text{II.39})$$

și ca atare:

$$a = -b/L \quad (\text{II.40})$$

Pentru determinarea mărimilor a și b mai este necesară o relație care se obține egalând suprafața dreptunghiului având lungimea L și înălțimea $(\theta_m - \theta_b)$ (figura II.50) cu suprafața delimitată de curba distribuției parabolice a temperaturii și dreapta corespunzătoare temperaturii θ_b :

$$1 \cdot (\theta_m - \theta_b) = \int_0^1 (ax^2 + bx + c) dx \quad (\text{II.41})$$

Combinând relațiile (II.40) și (II.41) se obțin următoarele expresii pentru constantele a și b :

$$a = \frac{-6(\theta_m - \theta_b)}{L^2} \quad (\text{II.42})$$

$$b = \frac{6(\theta_m - \theta_b)}{L} \quad (\text{II.43})$$

Cu ajutorul expresiilor găsite pentru a , b și c , relația (II.37) duce la următoarea legătură între θ_{\max} , θ_m și θ_b :

$$\theta_{\max} - \theta_b = 1,5(\theta_m - \theta_b) \quad (\text{II.44})$$

Diferența dintre temperatura medie θ_m și temperatura blocului metalic θ_b este proporțională cu puterea electrică disipată într-un braț al punții:

$$R \cdot I^2 = A_1(\theta_m - \theta_b) \quad (\text{II.45})$$

În această relație, spre deosebire de relația (II.34), mărimea A_1 reprezintă transmitanța termică de la bobină la blocul metalic și nu la mediul ambiant.

Legătura dintre transmitanța globală A și transmitanța parțială A_1 de la bobină la bloc, se poate obține din următoarele relații:

$$4A \cdot (\theta_m - \theta_a) = k \cdot S \cdot (\theta_b - \theta_a) \quad (\text{II.46})$$

$$A \cdot (\theta_m - \theta_a) = A_1 \cdot (\theta_m - \theta_b) \quad (\text{II.47})$$

în care:

k – coeficientul parțial de transfer de căldură de la blocul metalic la mediul ambiant, $[W/(m^2 \cdot \text{grad})]$;

S – suprafața exterioară a blocului metalic, $[m^2]$.

Relația (II.46) arată că, cantitatea de căldură transmisă de cele patru bobine prin blocul metalic la mediul ambiant este egală cu cantitatea de căldură cedată de blocul metalic mediului ambiant.

Relația (II.47) rezultă din combinarea relațiilor (II.43) și (II.45).

Cu ajutorul relațiilor (II.46) și (II.47) se obține următoarea expresie pentru

A_1 :

$$A_1 = \frac{k \cdot S \cdot A}{k \cdot S - 4A} \quad (\text{II.48})$$

În relația (II.48) mărimile A și S pot fi determinate experimental, iar k se poate calcula pe baza legilor transferului de căldură.

Prin intermediul relațiilor (II.48) și (II.45), expresia (II.44) poate fi adusă la forma:

$$\theta_{\max} - \theta_b = 1,5 \cdot \frac{k \cdot S - 4A}{k \cdot S \cdot A} \quad (\text{II.49})$$

La trecerea curentului de gaz prin tubul debitmetric distribuția simetrică a temperaturii se deformează, maximul deplasându-se în direcția curgerii. Ca atare temperatura medie la care se află brațele R_1 și R_3 scade, iar cea a rezistențelor R_2 și R_4 crește.

Puntea Wheatstone, echilibrată cu ajutorul potențiometrului R_5 în absența curentului de gaz se va dezechilibra. În conformitate cu notațiile din figura II.49, tensiunea de dezzechilibru U , egală cu diferența dintre U_1 și U_2 , rezultă din relația (II.50).

$$\frac{U_1 - U_2}{U_a} = \frac{R_4 + v \cdot R_5}{R_1 + R_4 + R_5} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (\text{II.50})$$

unde: $v = \frac{L_1}{L_2}$, relație în care L_1 este distanța cursorului potențiometric de borna

rezistenței R_5 legată de R_4 , iar L_2 este lungimea totală a rezistenței R_5 .

Dacă bobinarea rezistențelor R_1 , R_2 , R_3 și R_4 pe cele două tuburi debitmetrice s-a făcut cu deosebită grijă, astfel ca să aibă dimensiuni geometrice și rezistențe cât mai apropiate, rezistența de echilibrare R_5 poate fi aleasă suficient de mică ca valoarea ei să fie neglijabilă față de suma $R_1 + R_4$ și implicit termenul vR_5 neglijabil față de R_4 .

Ca atare relația (II.50) poate fi înlocuită cu expresia (II.51).

$$\frac{U_1 - U_2}{U_a} \cong \frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \quad (\text{II.51})$$

Notând cu θ_{m1} temperatura medie a rezistențelor R_1 și R_3 , și cu θ_{m2} temperatura medie a rezistențelor R_2 și R_4 , la trecerea gazului prin debitmetru și

presupunând că la 0 °C cele patru brațe au aceeași rezistență R_0 , relația (II.51) devine:

$$\frac{U_1 - U_2}{U_a} \cong \frac{R_0(1 + \alpha \cdot \theta_{m2})}{R_0(1 + \alpha \cdot \theta_{m1}) + R_0(1 + \alpha \cdot \theta_{m2})} - \frac{R_0(1 + \alpha \cdot \theta_{m1})}{R_0(1 + \alpha \cdot \theta_{m2}) + R_0(1 + \alpha \cdot \theta_{m1})}$$

$$\frac{U_1 - U_2}{U_a} \cong \frac{\alpha(\theta_{m2} - \theta_{m1})}{2 + \alpha(\theta_{m1} + \theta_{m2})} \quad (\text{II.52})$$

Notând cu $\Delta\theta$ diferența $\theta_{m2} - \theta_{m1}$, dintre temperaturile medii a două rezistențe aflate pe același tub, în condițiile trecerii gazului și considerând că:

$$\frac{\theta_{m1} + \theta_{m2}}{2} = \theta_m \quad (\text{II.53})$$

în care θ_m este temperatura medie a brațelor în absența curentului de gaz, relația (II.51) se poate scrie sub forma (II.54).

$$\frac{U_1 - U_2}{U_a} \cong \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta\theta}{1 + \alpha \cdot \theta_m} \quad (\text{II.54})$$

Având în vedere că diferența dintre U_1 și U_2 reprezintă tensiunea de dezechilibru U a punții Wheatstone și înlocuind U_a prin produsul dintre R și I , R fiind rezistența echivalentă a punții, egală practic cu rezistența unui braț, relația (II.54) devine:

$$U \cong \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta\theta}{1 + \alpha \cdot \theta_m} \cdot R \cdot I \quad (\text{II.55})$$

Înlocuind pe R cu expresia (II.33) se obține:

$$U = 0,5 \cdot \alpha \cdot \Delta\theta \cdot R_0 \cdot I \quad (\text{II.56})$$

Dependența $U = f(q_m)$ se obține din relația (II.56) pe baza legăturii $\Delta\theta = f(q_m)$, care poate fi dedusă prin modul prezentat mai jos.

Curentul de gaz, parcurgând un tub debitmetric, se încălzește de-a lungul primei jumătăți a tubului de la temperatura θ_b a blocului metalic până la θ_{max} , căldura preluată de curentul de gaz micșorând temperatura medie a rezistenței din această zonă de la θ_m la θ_{m1} . De-a lungul celei de a doua jumătăți a tubului debitmetric curentul de gaz se răcește până la temperatura θ_b , cedând căldură și măbind temperatura medie a rezistenței de la θ_m la θ_{m2} . Ca atare, în condițiile trecerii curentului de gaz prin debitmetru, relația (II.45) se poate scrie sub forma relației (II.57), respectiv (II.58):

$$A_1(\theta_{m1} - \theta_b) = R \cdot I^2 - C_p \cdot q_m (\theta_{max} - \theta_b) \quad (\text{II.57})$$

$$A_1(\theta_{m2} - \theta_b) = R \cdot I^2 + C_p \cdot q_m (\theta_{max} - \theta_b) \quad (\text{II.58})$$

în care:

C_p – căldura specifică a gazului la presiune constantă, [J/kg·°C].

Relația (II.57) arată că la trecerea gazului prin debitmetru, căldura cedată în unitatea de timp blocului metalic de rezistența din jumătatea de intrare a tubului este egală cu puterea electrică disipată în acea rezistență minus căldura preluată de curentul de gaz, iar relația (II.58) arată că rezistența din jumătatea de ieșire a tubului trebuie să transmită blocului metalic puterea disipată în rezistență plus căldura cedată de curentul de gaz care se răcește.

Scăzând relația (II.57) din (II.58) se obține:

$$A_1(\theta_{m2} - \theta_{m1}) = 2Cp \cdot q_m (\theta_{\max} - \theta_b) \quad (\text{II.59})$$

Deci:

$$\Delta\theta = \frac{2Cp \cdot q_m (\theta_{\max} - \theta_b)}{A_1} \quad (\text{II.60})$$

Folosind relațiile (II.48), (II.49) și (II.35) se obține relația (II.61):

$$\Delta\theta = 3Cp \cdot q_m \left(\frac{k \cdot S - 4A}{k \cdot S \cdot A} \right)^2 \cdot \frac{A}{A - \alpha \cdot R_0 \cdot I^2} \cdot R_0 (1 + \alpha \cdot \theta_a) \cdot I^2 \quad (\text{II.61})$$

În această relație I este curentul ce trece printr-o rezistență, adică jumătate din curentul de alimentare I al punții, iar R_0 reprezintă rezistența echivalentă a punții la 0 °C, aproximativ egală cu rezistența unui braț la 0 °C.

Înlocuind expresia lui $\Delta\theta$ în relația (II.56) se obține forma finală pentru ecuația de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3:

$$U = \frac{3}{8} \left(1 - \frac{4A}{k \cdot S} \right)^2 \cdot \frac{\alpha \cdot R_0^2 \cdot I^3 (1 + \alpha \cdot \theta_a)}{A (A - 0,25 \cdot \alpha \cdot R_0 \cdot I^2)} \cdot Cp \cdot q_m \quad (\text{II.62})$$

Comparând relațiile (II.62) și (II.3) se constată că factorul de proporționalitate B dintre tensiunea de dezechilibru U și produsul $Cp \cdot q_m$ are următoarea expresie:

$$B = \frac{3}{8} \left(1 - \frac{4A}{k \cdot S} \right)^2 \cdot \frac{\alpha \cdot R_0^2 \cdot I^3 (1 + \alpha \cdot \theta_a)}{A (A - 0,25 \cdot \alpha \cdot R_0 \cdot I^2)} \quad (\text{II.63})$$

Se poate admite că relația (II.62) reprezintă modelul de bază ce constituie imaginea prin care poate fi perceput sistemul real. Acest model este pe deplin valid doar dacă reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale, problemă ce va fi abordată ulterior în această lucrare (paragraful II.9.1).

II.8.1.1. Calculul parametrilor constructivi ce intervin în soluționarea ecuației particulare de funcționare

Relațiile deduse în paragraful precedent (II.8.1.) permit stabilirea parametrilor constructivi ai microdebitmetrului electrotermic astfel ca acesta să prezinte o anumită sensibilitate și precizie de măsurare.

Sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 este exprimată cantitativ de valoarea coeficientului B din relația (II.3), care depinde de parametrii constructivi și funcționali ai debitmetrului în felul redat de relația (II.63).

Precizia de măsurare și reproductibilitatea măsurărilor depinde de constanta în timp a coeficientului B, de stabilitatea punctului zero ($U = 0$ V dacă $q_m = 0$ kg/s), precum și de clasa de precizie a instrumentelor cu care se măsoară tensiunea de dezechilibru U și curentul de alimentare I.

Dependența coeficientului B de parametrii debitmetrului a fost analizată în paragraful II.8.2 indicându-se și măsurile ce trebuie luate pentru menținerea constantă a lui B (sursa stabilizată pentru alimentarea punții Wheatstone,

termostatarea blocului metalic în cazul unor fluctuații mari ale temperaturii mediului ambiant).

În cele ce urmează sunt prezentate criteriile pentru dimensionarea componentelor microdebitmetrului electrotermic 3 astfel ca să prezinte o cât mai ridicată stabilitate a punctului zero în raport cu fluctuațiile principalilor factori perturbatori: temperatura mediului ambiant și intensitatea curentului de alimentare a punții de măsurare.

La deducerea relației pentru tensiunea de dezechilibru U ca funcție de debitul masic de gaz q_m s-a admis că cele patru brațe ale punții Wheatstone sunt identice din punct de vedere electric și geometric. Dacă această condiție ar putea fi îndeplinită întru totul, echilibrul punții Wheatstone ar fi independent de temperatura mediului ambiant și de intensitatea curentului de alimentare. Cum însă cele patru termorezistențe nu pot fi realizate perfect identice, mai ales în privința rezistenței, s-a ales următoarea regulă de montare a tuburilor debitmetrice în blocul metalic: tuburile s-au fixat în blocul metalic astfel ca în pozițiile R_1 și R_4 (figura II.49) să ajungă termorezistențele cu valoare mai mică din perechea de termorezistențe aflate pe tub. Prin aceasta se reduce la minim posibil diferența $R_1R_3 - R_2R_4$, care la puntea perfect echilibrată este egală cu zero.

S-a considerat că: $R_2 > R_1$ și $R_3 > R_4$.

De asemenea s-a considerat că $R_2 > R_3$, adică la montarea tuburilor acestea au fost astfel dispuse ca în poziția R_2 să se găsească termorezistența de valoare mai mare dintre cele patru termorezistențe.

Valorile celor patru termorezistențe sunt de asemenea necesare și pentru calculul rezistenței potențiometrice R_5 (figura II.49).

La calculul valorii optime pentru rezistența potențiometrică R_5 trebuie să se țină cont că această rezistență are de îndeplinit următoarele două funcții:

- echilibrarea punții Wheatstone în situația când prin debitmetru nu circula gaz;
- asigurarea egalității dintre puterea disipată în ramurile R_1+R_4 și R_2+R_3 ale punții Wheatstone (figura II.49).

Îndeplinirea celei de a doua condiții urmărește o cât mai egală încărcare termică a celor patru termorezistențe în vederea unei comportări cât mai identice a celor două tuburi debitmetrice, necesară în special la măsurarea sumei și diferenței a două debite.

Îndeplinirea celei de a doua condiții este exprimată de relația (II.64).

$$(R_1 + R_4)I_1^2 = (R_2 + R_3)I_2^2 \quad (\text{II.64})$$

În această relație I_1 și I_2 sunt curenții care circulă prin ramura R_1+R_4 și respectiv R_2+R_3 (figura II.49).

Combinând relația (II.64) cu relația:

$$(R_1 + R_4 + R_5)I_1 = (R_2 + R_3)I_2 \quad (\text{II.65})$$

care exprimă egalitatea tensiunii pe cele două ramuri ale punții se obține:

$$R_5 = (R_2 + R_3) \cdot \sqrt{\frac{R_1 + R_4}{R_2 + R_3}} - (R_1 + R_4) \quad (\text{II.66})$$

În această relație R_1 , R_2 , R_3 și R_4 reprezintă rezistențele celor patru brațe în condițiile alimentării punții cu curent:

$$I = I_1 + I_2 \quad (\text{II.67})$$

Ca atare valorile rezistențelor din membrul drept al relației (II.66) trebuie exprimate cu ajutorul relației (II.35):

$$R_1 = C_1 \cdot R_{01} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_a) \quad (\text{II.68})$$

$$R_2 = C_2 \cdot R_{02} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_a) \quad (\text{II.69})$$

$$R_3 = C_3 \cdot R_{03} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_a) \quad (\text{II.70})$$

$$R_4 = C_4 \cdot R_{04} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_a) \quad (\text{II.71})$$

în care mărimile C_1 , C_2 , C_3 și C_4 sunt date de relațiile:

$$C_1 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{01} \cdot I_1^2} \quad (\text{II.72})$$

$$C_2 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{02} \cdot I_2^2} \quad (\text{II.73})$$

$$C_3 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{03} \cdot I_3^2} \quad (\text{II.74})$$

$$C_4 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{04} \cdot I_4^2} \quad (\text{II.75})$$

R_{01} , R_{02} , R_{03} și R_{04} reprezintă rezistențele la temperatura de 0 °C a celor patru brațe ale punții. Aceste valori se calculează din măsurătorile efectuate în vederea montării tuburilor debitmetrice în blocul metalic cu respectarea condițiilor $R_2 > R_1$ și $R_3 > R_4$, cunoscând temperatura la care s-au realizat aceste măsurători și coeficientul de temperatură α al sârmei de bobinaj.

Introducând relațiile (II.68) - (II.71) în ecuația (II.66) se obține relația (II.76):

$$R_5 = \left[(C_2 R_{02} + C_3 R_{03}) \cdot \sqrt{\frac{C_1 R_{01} + C_4 R_{04}}{C_2 R_{02} + C_3 R_{03}}} - (C_1 R_{01} + C_4 R_{04}) \right] \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_a)$$

Din relația (II.76) rezultă că rezistența de echilibrare R_5 trebuie să aibă același coeficient de temperatură α ca și rezistențele de pe tuburile debitmetrice. În caz contrar nu se asigură egalitatea puterilor disipate în cele două ramuri ale punții, la orice temperatură a mediului ambiant.

În relația (II.76) expresia din paranteza dreaptă reprezintă valoarea pe care trebuie să o aibă rezistența de echilibrare la 0 °C.

$$R_{05} = (C_2 R_{02} + C_3 R_{03}) \cdot \sqrt{\frac{C_1 R_{01} + C_4 R_{04}}{C_2 R_{02} + C_3 R_{03}}} - (C_1 R_{01} + C_4 R_{04}) \quad (\text{II.77})$$

În felul acesta, relația (II.76) devine:

$$R_5 = R_{05} (1 + \alpha \cdot \theta_a) \quad (\text{II.78})$$

Din structura (II.76) rezultă că valoarea optimă a rezistențelor de echilibru depinde de intensitatea curentului cu care se alimentează puntea, întrucât mărimile C_1 , C_2 , C_3 și C_4 depind de curenții I_1 și I_2 care trec prin cele două ramuri ale punții.

Ca atare calculul valorii rezistenței de echilibrare R_5 trebuie făcut pentru curentul de alimentare al punții cu care este alimentat debitmetrul.

După stabilirea valorii pentru R_5 se verifică dacă această valoare permite echilibrarea punții Wheatstone. Pentru aceasta se scriu relațiile care exprimă echilibrul punții:

$$[R_1 + (1 - v)R_5]I_1 = R_2 I_2 \quad (\text{II.79})$$

$$(R_4 + v \cdot R_5)I_1 = R_3 I_2 \quad (\text{II.80})$$

În aceste relații, u are aceeași semnificație ca și în relația (II.50), adică reprezintă fracțiunea din R_5 care se găsește între cursorul potențiomtric și R_4 (figura II.49). Combinând relațiile (II.79) și (II.80) se obține:

$$v = \frac{R_3(R_1 + R_5) - R_2 R_4}{R_5(R_2 + R_3)} \quad (\text{II.81})$$

Cu ajutorul relațiilor (II.68) - (II.71) și (II.78), relația (II.81) poate fi adusă la forma:

$$v = \frac{C_3 R_{03}(C_1 R_{01} + R_{05}) - C_2 R_{02} \cdot C_4 R_{04}}{R_{05}(C_2 R_{02} + C_3 R_{03})} \quad (\text{II.82})$$

Din relația (II.82) rezultă concluzia importantă că mărimea u și implicit echilibrul montajului nu depind de temperatura mediului ambiant. Această calitate rezultă din faptul că rezistența potențiomtrică R_5 are același coeficient de temperatură ca și bobinele de pe tuburile debitmetrice. În schimb, echilibrul punții depinde de valoarea curentului de alimentare I , întrucât după cum s-a arătat C_1 , C_2 , C_3 și C_4 sunt funcție de I_1 , respectiv I_2 .

Din relația (II.81), respectiv (II.82) trebuie să rezulte o valoare pentru u care să satisfacă condiția:

$$0 < v < 1 \quad (\text{II.83})$$

Valoarea lui u nu trebuie să fie foarte aproape de limita intervalului deschis (0, 1). Mărimea u rezultă 0,5 numai dacă $R_2 R_4 = R_1 R_3$, adică dacă puntea este oricum în echilibru și R_5 este necesar numai pentru egalarea puterilor disipate în $R_1 + R_4$ și $R_2 + R_3$.

Dacă u nu satisface condiția (II.83) atunci se poate corecta nesimetria brațelor R_2 și R_3 printr-o rezistență adițională R_6 , plasată între R_2 și R_3 și anume de partea lui R_3 , întrucât $R_3 < R_2$. Valoarea rezistenței adiționale R_6 se alege egală cu diferența $R_2 - R_3$.

$$R_6 = R_2 - R_3 \quad (\text{II.84})$$

În care R_2 și R_3 sunt rezistențele celor două brațe în condiții de funcționare, adică au valorile date de relațiile (II.68) - (II.71) și (II.72) - (II.75).

Pentru ca echilibrul punții Wheatstone să nu depindă de temperatura mediului ambiant, rezistența R_6 , la fel ca și rezistența R_5 , trebuie confecționată din sârmă, având același coeficient de temperatură α ca și bobinele R_1 , R_2 , R_3 și R_4 . Ca atare, valoarea rezistenței R_6 poate fi exprimată prin relația:

$$R_6 = R_{06}(1 + \alpha \cdot \theta_a) \quad (\text{II.85})$$

În care rezistența la 0 °C rezultă din ecuația:

$$R_{06} = C_2 R_{02} - C_3 R_{03} \quad (\text{II.86})$$

Se constată că și valoarea rezistenței adiționale R_6 trebuie calculată în funcție de curentul cu care va fi alimentată puntea la utilizarea debitmetrului.

În condițiile folosirii unei rezistențe adiționale R_6 , valorile pentru R_5 , respectiv R_{05} și u trebuie recalculat folosind următoarele relații:

$$R_5 = 2R_2 \cdot \sqrt{\frac{R_1 + R_4}{R_2 + R_3}} - (R_1 + R_4) \quad (\text{II.87})$$

$$R_{05} = 2C_2 R_{02} \cdot \sqrt{\frac{C_1 R_{01} + C_4 R_{04}}{C_2 R_{02} + C_3 R_{03}}} - (C_1 R_{01} + C_4 R_{04}) \quad (\text{II.88})$$

$$v = \frac{R_1 - R_4 + R_5}{2R_5} \quad (\text{II.89})$$

$$v = \frac{C_1 R_{01} - C_4 R_{04} + R_{05}}{2R_{05}} \quad (\text{II.90})$$

Din cele expuse rezultă că pentru dimensionarea optimă a punții Wheatstone sunt necesare următoarele date inițiale, determinate experimental: R_{01} , R_{02} , R_{03} , R_{04} și transmitanța termică A .

Rezistențele bobinelor la 0°C se obțin din relația:

$$R_{0i} = \frac{R_i}{1 + \alpha \cdot \theta_a} \quad (\text{II.91})$$

în care R_i ($i = 1, 2, 3, 4$) reprezintă rezistența a câte unui braț din puntea Wheatstone, măsurate cu precizie, temperatura mediului ambiant având în timpul măsurării valoarea θ_a .

Transmitanța termică globală A , de la bobina debitmetrului, prin blocul metalic, la mediul ambiant, s-a determinat experimental, după montarea tuburilor debitmetrice în blocul metalic, folosind montajul redat în figura II.51.

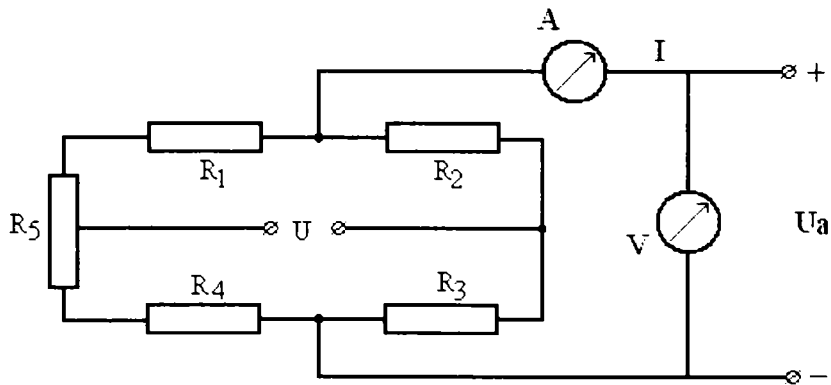


Figura II.51. Montajul folosit la determinarea experimentală a transmitanței termice A

Rezistențele R_1 , R_2 , R_3 și R_4 din montaj sunt cele patru bobine din figura II.49, iar în calitate de R_5 se folosește o rezistență fixă provizorie. Valoarea pentru R_5 se calculează cu relația (II.66), în care pentru R_1 , R_2 , R_3 și R_4 se introduc rezistențele bobinelor debitmetrului, măsurate la temperatura mediului ambiant.

Determinarea transmitanței termice A cu ajutorul montajului experimental din figura II.51 se realizează în baza relației (II.34). Pentru aceasta se procedează în felul următor:

- Se alege tensiunea de alimentare U_a astfel ca puterea disipată în punte să fie de aproximativ 2 W (în cazul studiilor preliminare efectuate s-a ajuns la concluzia că puterea de 2 W este cea mai recomandabilă, asigurând debitmetrului o sensibilitate de aproximativ 25 mV·s/mg, fără o solicitare termică exagerată a bobinelor debitmetrului, confecționate din cupru).
- După atingerea regimului termic staționar (de aproximativ 2 – 3 ore) se citește tensiunea de alimentare a punții U_a , curentul I și temperatura mediului ambiant θ_a . Se calculează rezistența echivalentă a punții Wheatstone folosind relația:

$$R_e = \frac{U_a - r_i \cdot I}{I} \quad (II.92)$$

în care r_i reprezintă rezistența interioară a ampermetrului.

- Se calculează temperatura medie a bobinelor de pe cele două tuburi debitmetrice folosind relația:

$$\theta_m = \frac{R_e - R_{0e}}{\alpha \cdot R_{0e}} \quad (II.93)$$

în care R_{0e} reprezintă rezistența echivalentă a punții Wheatstone la 0 °C, calculată după relația (II.94).

$$R_{0e} = \frac{(R_{01} + R_{04} + R_{05})(R_{02} + R_{03})}{R_{01} + R_{02} + R_{03} + R_{04} + R_{05}} \quad (II.94)$$

- Se calculează transmitanța termică A cu ajutorul relației (II.34) adusă la forma:

$$A = \frac{(U_a - r_i \cdot I)I - 0,25 \cdot R_5 \cdot I^2}{4(\theta_m - \theta_a)} \quad (II.95)$$

Primul termen al numărătorului reprezintă puterea disipată în puntea Wheatstone, iar al doilea termen exprimă puterea disipată în rezistența R_5 . Ca atare, numărătorul relației (II.95) este format din puterea disipată în cele patru bobine de pe cele două tuburi debitmetrice ale microdebitmetrului electrotermic 3. Întrucât mărimea A reprezintă transmitanța unei singure bobine, adică raportul dintre puterea disipată într-o bobină și diferența dintre temperatura medie a bobinei și temperatura mediului ambiant, valoarea lui A se obține raportând numai un sfert din puterea totală la diferența $\theta_m - \theta_a$.

În continuare este prezentat modul de calcul al parametrilor C_1 , C_2 , C_3 și C_4 .

Din relațiile (II.72) – (II.75) rezultă că parametrii C_i depind de R_{0i} și de intensitatea curentului ce trece prin bobină.

Expresiile pentru I_1 și I_2 se obțin pe baza relațiilor (II.64) și (II.67):

$$I_1 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{C_2 R_{01} + C_4 R_{04}}{C_2 R_{02} + C_3 R_{03}}}} \cdot I \quad (II.96)$$

$$I_2 = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{C_2 R_{01} + C_4 R_{03}}{C_1 R_{01} + C_4 R_{04}}}} \cdot I \quad (II.97)$$

Pentru simplificarea relațiilor (II.96) și (II.97) se introduc notațiile:

$$a = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{C_1 R_{01} + C_4 R_{04}}{C_2 R_{02} + C_3 R_{03}}}} \cdot I \quad (\text{II.98})$$

$$b = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{C_2 R_{02} + C_3 R_{03}}{C_1 R_{01} + C_4 R_{04}}}} \cdot I \quad (\text{II.99})$$

Valorile lui a și lui b trebuie să satisfacă condiția:

$$a + b = 1 \quad (\text{II.100})$$

Cu ajutorul mărimilor a și b , expresiile pentru I_1 și I_2 devin:

$$I_1 = a \cdot I \quad (\text{II.101})$$

$$I_2 = b \cdot I \quad (\text{II.102})$$

Pe baza expresiilor deduse pentru I_1 și I_2 , relațiile (II.72) – (II.75) pot fi aduse la forma:

$$C_1 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{01} (a \cdot I)^2} \quad (\text{II.103})$$

$$C_2 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{02} (b \cdot I)^2} \quad (\text{II.104})$$

$$C_3 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{03} (b \cdot I)^2} \quad (\text{II.105})$$

$$C_4 = \frac{A}{A - \alpha \cdot R_{04} (a \cdot I)^2} \quad (\text{II.106})$$

Din relațiile (II.103) – (II.106) rezultă că parametrii C_1 , C_2 , C_3 și C_4 pot fi calculați numai prin aproximări succesive, întrucât mărimile a și b care intră în expresiile acestor parametrii, la rândul lor depind în conformitate cu relațiile (II.98) și (II.99) de C_1 , C_2 , C_3 și C_4 . Ca atare, metodologia determinării parametrilor C_1 , C_2 , C_3 și C_4 este următoarea:

Se calculează o primă aproximare pentru parametrii C_i , introducând în relațiile (II.103) – (II.106) pentru a și b valoarea de 0,5, iar pentru I valoarea curentului de alimentare al punții, cu care va funcționa debitmetrul.

Cu valorile astfel găsite pentru parametrii C_i , se folosesc relațiile (II.98) și (II.99) pentru a obține noi valori, mai bune pentru mărimile a și b , notate a_1 și b_1 .

Cu valorile a_1 și b_1 , introduse în relațiile (II.103) – (II.106) se obțin valori îmbunătățite pentru parametrii C_i .

Noile valori pentru C_i se introduc în relațiile (II.98) și (II.99) obținând o nouă aproximare, mai bună, pentru a și b , care se notează cu a_2 și b_2 .

Se repetă operațiile de la ultimele două puncte până când valorile parametrilor C_i , precum și a mărimilor a și b devin practic constante. Aceste valori ale parametrilor C_i se utilizează apoi pentru calculul rezistenței R_5 , și eventual a rezistenței adiacente R_6 .

Anterior s-a admis că $I_1 = I_2 = I/2$. La dimensionarea optimă a punții Wheatstone, astfel ca migrația punctului de zero să fie redusă la minim, nu se mai poate recurge la această aproximare, ci trebuie avut în vedere că I_1 nu este egal cu I_2 datorită diferențelor inevitabile care există între R_1 , R_2 , R_3 și R_4 .

În urma calculelor efectuate cu ajutorul relațiilor descrise la acest paragraf au fost calculate valorile cantitative ale parametrilor ce influențează funcționarea microdebitmetrului electrotermic 3.

Cele patru brațe ale punții Wheatstone au următoarele valori, la o temperatură de 22,5 °C: $R_1 = 57,99 \Omega$; $R_2 = 58,24 \Omega$; $R_3 = 58,15 \Omega$; $R_4 = 57,65 \Omega$.

Cunoscând coeficientul de temperatură α , s-a calculat rezistența brațelor la 0 °C: $R_{01} = 53,29 \Omega$; $R_{02} = 53,52 \Omega$; $R_{03} = 53,44 \Omega$; $R_{04} = 52,98 \Omega$.

În vederea calculării valorii rezistenței de echilibrare R_5 , s-a determinat experimental transmitanța termică A , după procedeul descris anterior.

În calitate de rezistența de echilibrare R_5 s-a folosit o rezistență provizorie (fixă) de aproximativ 0,42 Ω (la 22,5 °C) și ca atare, rezistența echivalentă a punții Wheatstone, la 0 °C, calculată cu relația (II.94), are valoarea: $R_{0e} = 53,40 \Omega$.

Alimentând puntea cu un curent de 180 mA, în regim termic staționar, s-a măsurat pe punte o tensiune de 11,58 V, temperatura mediului ambiant fiind de 23,5 °C. Tensiunea și curentul au fost măsurate cu un volt-ampmetru de clasă 0,2 cu rezistența interioară a ampermetrului $r_i = 0,2 \Omega$ la măsurarea curentului. Astfel, relația (II.92) pentru rezistența echivalentă a punții, în condițiile efective de lucru, duce la valoarea: $R_e = 64,133 \Omega$.

Temperatura medie θ_m a brațelor punții Wheatstone, calculată cu relația (II.93) are valoarea: $\theta_m = 51,275 \text{ }^\circ\text{C}$.

Introducând valorile numerice ale parametrilor în relația (II.95), s-a obținut valoarea de 0,0187 W/grd pentru transmitanța termică A .

În continuare se va considera valoarea de 0,019 W/grd pentru transmitanța termică A .

Calculul mărimilor C_1 , C_2 , C_3 și C_4 , cu relațiile (II.103) – (II.106) și (II.98), (II.99), utilizând metoda aproximărilor succesive după trei cicluri a condus la următoarele valori: $C_1 = 1,0981$; $C_2 = 1,0979$; $C_3 = 1,0977$; $C_4 = 1,0975$.

Se constată că $a_3 = a_2 = 0,50081$ și implicit $b_3 = b_2 = 0,49919$. Ca atare nu a mai fost necesară continuarea aproximărilor, putându-se utiliza pentru a , b , C_1 , C_2 , C_3 și C_4 valorile rezultate din aproximarea a treia.

În continuare s-a aplicat relația (II.77) pentru calculul mărimii R_{05} , obținându-se valoarea: $R_{05} = 0,38 \Omega$. Astfel, pentru R_5 s-a obținut o valoare de 0,413 Ω .

Mai rămâne de verificat, cu relația (II.82), dacă valoarea găsită pentru R_5 permite echilibrarea punții.

Utilizând relația (II.82), rezulta $\nu = 0,865$.

Se constată că ν satisface condiția exprimată de relația (II.83) și ca atare nu mai este necesară o rezistență adițională R_6 .

II.8.2. Analiza de sensibilitate a microdebitmetrului electrotermic 3

Considerând că ecuația particulară de funcționare dedusă reprezintă modelul de bază care constituie imaginea prin care poate fi perceput sistemul real, înainte de a utiliza modelul sistemului în diverse scopuri este necesar să se studieze

dependența performanțelor acestuia în raport cu diverse modificări, variații, ce pot interveni privind valorile parametrilor.

Lipsa de concordanță dintre valorile reale ale parametrilor și cele luate în considerare în model poate fi cauzată de [175]:

- existența toleranțelor admise la fabricarea elementelor componente ale sistemului;
- imprecizia măsurărilor efectuate pe sistem;
- influența factorilor perturbatori externi asupra elementelor sistemului;
- uzura și procesul de îmbătrânire a materialelor care intră în componența elementelor.

Dacă performanțele modelului sau traiectoria stării în timp variază semnificativ la abateri relativ mici, ale unui parametru de la valoarea sa nominală, se poate spune că modelul, deci și sistemul corespunzător, este sensibil în raport cu acest parametru.

Conceptul de sensibilitate a fost definit ca fiind raportul (II.107) când se cunoaște dependența $x = x(w)$, x fiind variabila dependentă de parametrul w [175].

$$U_w^x = \frac{\partial x}{\partial w} \quad (II.107)$$

Analizând structura relațiilor (II.62) și (II.63) se constată că sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 depinde de parametrii săi constructivi și funcționali, după cum urmează:

- direct proporțional cu pătratul rezistenței echivalente R_0 a punții Wheatstone;
- direct proporțional cu coeficientul de temperatură α al termorezistențelor R_1 , R_2 , R_3 și R_4 ;
- invers proporțional cu pătratul transmitanței termice globale A , de la o înfășurare de pe tubul debitmetric la mediul ambiant;
- direct proporțional cu puterea a treia a curentului de alimentare I al punții Wheatstone;
- direct proporțional cu temperatura mediului ambiant θ_a .

Termenul $\left(1 - \frac{4A}{k \cdot S}\right)^2$ exprimă scăderea sensibilității debitmetrului datorită

faptului că blocul metalic nu se găsește la temperatura mediului ambiant θ_a ci la temperatură mai ridicată θ_b .

Concretizarea expresiei factorului de proporționalitate B prin relația (II.63) este de o importanță practică deosebită deoarece identifică parametrii constructivi și funcționali de care depinde sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic și totodată redă cantitativ influența acestor parametri asupra sensibilității. Ca atare, relațiile (II.62) și (II.63) stau la baza dimensionării și exploatării optime ale microdebitmetrului electrotermic 3.

Influența parametrilor constructivi

Pentru ca microdebitmetrul electrotermic 3 să beneficieze de o sensibilitate ridicată trebuie asigurate câteva condiții. Printre acestea se numără micșorarea cât mai avansată a transmitanței termice globale A de la o termorezistență la mediul

ambiant. Această micșorare a lui A nu trebuie însă realizată prin izolarea termică a blocului metalic față de mediul ambiant, întrucât prin aceasta ar scădea și valoarea coeficientului de transfer termic k , creșterea sensibilității prin micșorarea lui A fiind

astfel în mare parte anihilată prin micșorarea termenului $\left(1 - \frac{4A}{k \cdot S}\right)^2$. Micșorarea lui

A trebuie așadar realizată printr-o izolare termică cât mai bună a termorezistențelor R_1, R_2, R_3 și R_4 față de blocul metalic, adică prin micșorarea transmitanței parțiale A_1 . Ca atare se recomandă căptușirea suprafeței interioare a blocului metalic cu material termoizolant.

Totodată se recomandă frânarea transmiterii căldurii de la termorezistență la blocul metalic prin conductibilitate termică de-a lungul tuburilor debitmetrice. Pentru aceasta este indicat ca cele două tuburi debitmetrice paralele să aibă pereții cât mai subțiri, iar termorezistențele să fie realizate dintr-o singură înfășurare și cu sârmă de diametru cât mai mic. Confecționarea termorezistențelor de sârmă cu diametrul cât mai mic se impune și în vederea realizării acestora cu rezistența cât mai mare, întrucât sensibilitatea este proporțională cu pătratul rezistenței echivalente a punții.

Întrucât sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic este proporțională cu coeficientul de temperatură α al metalului din care sunt realizate termorezistențele, cel mai indicat metal ar fi nichelul. Cum însă sârma emailată de nichel, cu diametrul sub 0,1 mm nu este accesibilă în mod curent, pentru realizarea termorezistențelor se recomandă utilizarea sârmei de cupru de puritate cât mai ridicată. Realizarea rezistențelor din sârmă de platină de impune numai dacă microdebitmetrul electrotermic trebuie să lucreze la temperaturi mai ridicate.

Influența parametrilor funcționali

În continuare va fi discutată influența următorilor parametri funcționali:

- intensitatea curentului de alimentare;
- temperatura mediului ambiant;
- natura gazului vehiculat prin tubul microdebitmetrului;
- presiunea gazului.

Sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 fiind proporțională cu puterea a treia a intensității curentului de alimentare a punții, este indicat a fixa curentul de alimentare la o valoare cât mai ridicată, adică a se lucra la puteri de încălzire mai ridicate, lucru evidențiat și prin caracteristicile statice determinate experimental, prezentate în paragraful II.5.1.

Din corelările prezentate în paragraful II.5.1. se observă că la același debit de gaz, de exemplu pentru $q_m = 1,7 \cdot 10^{-6}$ kg/s, modificarea cu 1 A a curentului de alimentare produce o modificare a tensiunii de dezechilibru de 0,0005 V ceea ce reprezintă 1,81 % din semnalul de ieșire al aparatului.

Valoarea curentului de alimentare este totuși limitată de temperatura maximă la care poate fi expus metalul termorezistenței, fără alterarea caracteristicilor sale. Pentru cupru, temperatura maximă admisibilă este de 120 °C, dar se recomandă a nu se depăși 100 °C.

Utilizând relațiile (II.45), (II.48) și (II.49) se poate arăta că valoarea maximă admisibilă a curentului de alimentare este dată de relația (II.108):

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{8 \cdot k \cdot S \cdot A (\theta_{\max} - \theta_a)}{R_0 [(k \cdot S - 4A) \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_a) + 2k \cdot S (1 + \alpha \cdot \theta_{\max})]}} \quad (\text{II.108})$$

în care:

- I_{\max} - valoarea maximă admisibilă a curentului de alimentare, [A];
 R_0 - rezistența echivalentă a punții la 0 °C, [Ω];
 θ_{\max} - temperatura maximă la care se pot expune termorezistențele, [°C];
 θ_a - temperatura mediului ambiant, [°C];
 S - suprafața exterioară a blocului metalic, [m^2];
 k - coeficient parțial de transfer de căldură de la bloc la mediul ambiant, [W/($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)];
 A - transmitanța termică de la o termorezistență la mediul ambiant, [W/°C];
 α - coeficient de temperatură al metalului din care sunt confecționate termorezistențele, [1/°C].

Având în vedere că sensibilitatea debitmetrului este puternic influențată de fluctuațiile curentului de alimentare, se impune alimentarea debitmetrului de la o sursă stabilizată de calitate cât mai ridicată.

Conform relației (II.107), influența curentului de alimentare asupra tensiunii de dezechilibru a punții traductorului debitmetric este descrisă prin derivata parțială a tensiunii de dezechilibru U în raport cu intensitatea curentului I :

$$\frac{\partial U}{\partial I} = \frac{U}{I} \cdot \left(\frac{2A}{A - 0.25 \cdot \alpha \cdot R_0 \cdot I^2} + 1 \right) \quad (\text{II.109})$$

Din relația (II.63) rezultă că sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 este influențată și de temperatura mediului ambiant și anume, în cazul termorezistențelor de cupru ($\alpha = 3,92 \cdot 10^{-3}$), sensibilitatea crește cu aproximativ 0,36 % la creșterea temperaturii cu 1 °C. Ca atare, în limita unor variații mici de temperatură ale mediului ambiant, sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic poate fi considerată constantă, nefiind necesară o termostatare a blocului metalic.

În figura II.52 sunt prezentate caracteristicile statice ale microdebitmetrului electrotermic 3, determinate experimental pentru două temperaturi ale mediului ambiant (17 °C și 27 °C), iar în tabelele II.42 și II.43 sunt prezentate datele experimentale care vor fi utilizate ulterior la compararea cu rezultatul simulării funcționării microdebitmetrului electrotermic 3 cu ajutorul ecuației particulare de funcționare.

Tabel II.42. Date experimentale obținute la temperatura mediului ambiant de 17 °C

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,45	0,62	0,80	1,00	1,18	1,40	1,50
$U \cdot 10^3$ [V]	8,5	11,9	15,2	19	22,5	26,5	28,5

Tabel II.43. Date experimentale obținute la temperatura mediului ambiant de 27 °C

$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,40	0,58	0,75	1,00	1,20	1,38	1,55
$U \cdot 10^3$ [V]	7,8	11,5	14,7	19,7	23,6	27	30,5

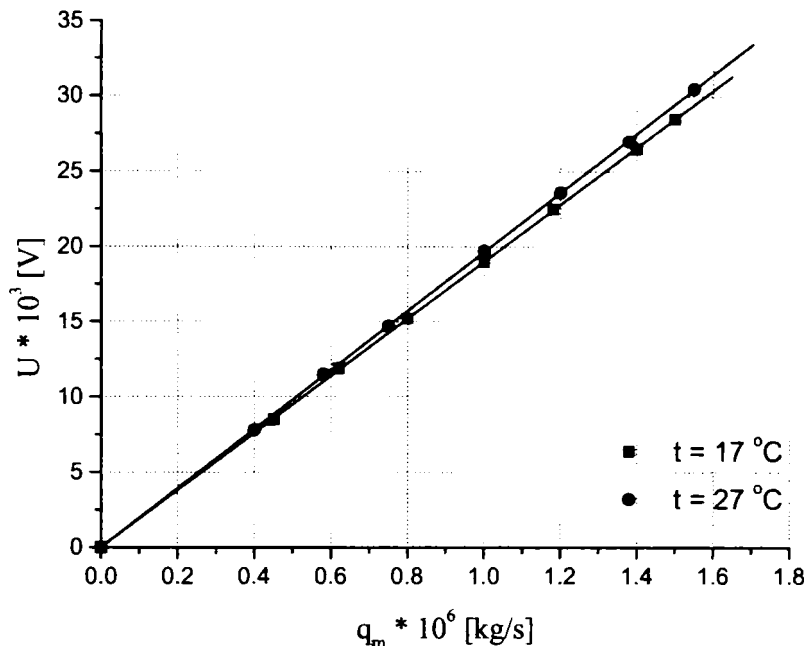


Figura II.52. Comportarea statică la diferite temperaturi ale mediului ambiant

Conform relației (II.107), influența temperaturii mediului ambiant asupra tensiunii de dezechilibru a punții traductorului debitmetric este descrisă prin derivata parțială a tensiunii de dezechilibru U în raport cu temperatura mediului ambiant θ_a :

$$\frac{\partial U}{\partial \theta_a} = \frac{3}{8} \left(1 - \frac{4A}{K \cdot S} \right)^2 \cdot \frac{\alpha^2 \cdot R_0^2 \cdot I^3}{A(A - 0.25 \cdot \alpha \cdot R_0 \cdot I^2)} \cdot C_p \cdot q_m \quad (\text{II.110})$$

În conformitate cu relațiile (II.3) și (II.4) sensibilitatea K a aparatului depinde direct proporțional de căldura specifică a gazului sau al amestecului de gaze al cărui debit se măsoară, lucru ce reiese și din ecuația particulară de funcționare (relația (II.62)) dedusă pentru microdebitmetrul electrotermic 3, ce arată că indicațiile debitmetrului depind de natura gazului numai prin căldura specifică C_p a acestuia. Ca atare, etalonarea debitmetrului este suficient să fie făcută numai pentru un singur gaz (în cazul de față s-a folosit aerul).

Pentru a deduce relația de dependență între tensiunile de dezechilibru ale aparatului pentru două gaze diferite (de exemplu, aer și un alt gaz), trebuie scrisă relația (II.3) pentru cele două cazuri:

$$U_{\text{aer}} = B \cdot C_{p_{\text{aer}}} \cdot q_{m_{\text{aer}}} \quad (\text{II.111})$$

$$U_{\text{gaz}} = B \cdot C_{p_{\text{gaz}}} \cdot q_{m_{\text{gaz}}} \quad (\text{II.112})$$

Dacă cele două debite masice sunt egale, $q_{m_{\text{aer}}} = q_{m_{\text{gaz}}}$ se obține:

$$U_{\text{gaz}} = \frac{1 + \theta_{\text{a gaz}} \cdot \alpha}{1 + \theta_{\text{a aer}} \cdot \alpha} \cdot \frac{C_{p_{\text{gaz}}}}{C_{p_{\text{aer}}}} \cdot U_{\text{aer}} \quad (\text{II.113})$$

În relația (II.113) termenul $\frac{1 + \theta_{\text{a gaz}} \cdot \alpha}{1 + \theta_{\text{a aer}} \cdot \alpha}$ provine din relația (II.63) ce

definește constanta B, iar θ_a reprezintă temperatura ambiantă la care se efectuează determinările pentru gaz, respectiv pentru aer.

Din structura relației (II.113) se desprinde aceeași concluzie, că pentru exploatarea aparatului este suficient ca etalonarea microdebitmetrului electrotermic să se efectueze numai pentru un anumit gaz de referință. Astfel, valoarea debitului unui alt gaz se obține înmulțind indicația debitmetrului, conform etalonării făcute pentru gazul de referință (de exemplu, aer), cu raportul dintre căldura specifică a gazului măsurat ($C_{p_{\text{gaz}}}$) și căldura specifică a gazului etalon ($C_{p_{\text{aer}}}$) și cu un coeficient fracționar în care intervine temperatura ambiantă efectivă de lucru și temperatura la care s-a efectuat etalonarea cu aer.

De asemenea, explicitând termenul $C_{p_{\text{gaz}}}$ din relația (II.113), conform relației (II.114), se poate afirma că microdebitmetrul electrotermic 3 ar putea fi utilizat și la determinarea căldurii specifice a gazelor sau a amestecurilor de gaze.

$$C_{p_{\text{gaz}}} = \frac{1 + \theta_{\text{aer}} \cdot \alpha}{1 + \theta_{\text{gaz}} \cdot \alpha} \cdot \frac{U_{\text{gaz}}}{U_{\text{aer}}} \cdot C_{p_{\text{aer}}} \quad (\text{II.114})$$

În figura II.53 sunt prezentate caracteristicile statice ale microdebitmetrului electrotermic 3, determinate experimental pentru aer ($C_{p_{\text{aer}}} = 1,01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}$) și încă trei gaze (dioxid de carbon ($C_{p_{\text{CO}_2}} = 0,895 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}$), oxigen ($C_{p_{\text{O}_2}} = 0,93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}$) și azot ($C_{p_{\text{N}_2}} = 1,0415 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{grd}^{-1}$)), iar în tabelele II.44 – II.47 sunt prezentate date experimentale care vor fi utilizate ulterior la compararea cu rezultatul simulării funcționării microdebitmetrului electrotermic 3 cu ajutorul ecuației particulare de funcționare.

Tabel II.44. Date experimentale obținute pentru aer

$q_m \cdot 10^6 \text{ [kg/s]}$	0,33	0,40	0,49	0,67	0,78	0,94	1,10	1,30	1,50
$U \cdot 10^3 \text{ [V]}$	7,9	9,5	11,5	15,5	18	21,5	25	29,9	34,5

Tabel II.45. Date experimentale obținute pentru oxigen

$q_m \cdot 10^6 \text{ [kg/s]}$	0,10	0,20	0,38	3,55	0,70	0,84	0,97	1,10	1,19	1,50
$U \cdot 10^3 \text{ [V]}$	2,5	4	8	11,5	15	17,5	20,5	23,5	25	31,5

Tabel II.46. Date experimentale obținute pentru dioxid de carbon

$q_m \cdot 10^6 \text{ [kg/s]}$	0,20	0,32	0,50	0,63	0,75	0,88	1,10	1,24	1,49
$U \cdot 10^3 \text{ [V]}$	6	7,5	10	13	15,5	18	22,5	25	30

Tabel II.47. Date experimentale obținute pentru azot

$q_m \cdot 10^6 \text{ [kg/s]}$	0,1	0,31	0,42	0,56	0,66	0,73	0,85	1,08	1,20	1,45
$U \cdot 10^3 \text{ [V]}$	2,5	7,5	10	13,5	15,5	17,5	21	25,5	28,5	34

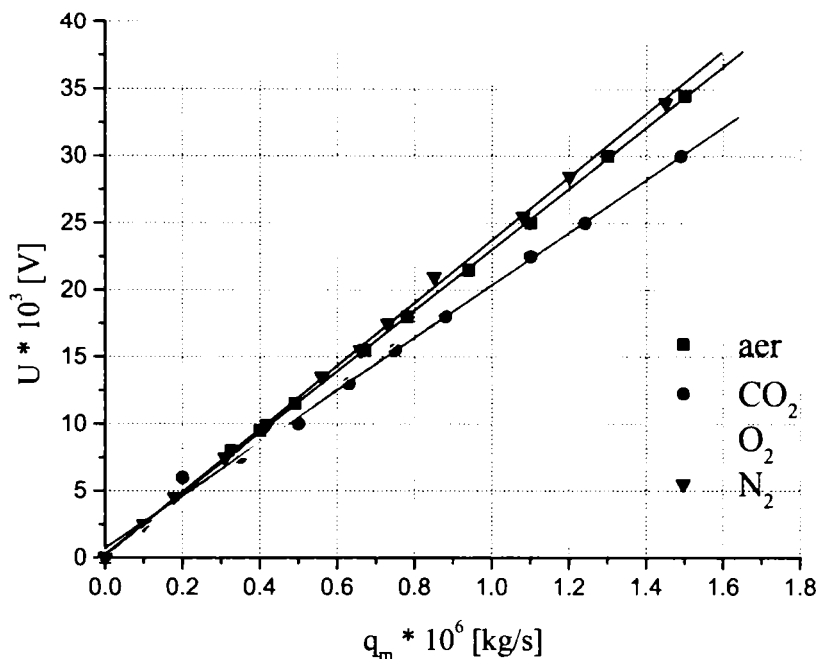


Figura II.53. Comportarea statică la măsurarea debitului masic a diferite gaze

Din dependențele prezentate în figura II.53 se poate observa că dependența ce descrie comportarea statică pentru aer se situează între dependența ce descrie comportarea statică pentru azot și dependența ce descrie comportarea statică pentru oxigen, situându-se în apropierea dependenței pentru azot. Știind că, compoziția aerului este de 78,084 % N_2 , 20,947 % O_2 și 0,033 % CO_2 , se confirmă acest fapt, și astfel se poate afirma că microdebitmetrul electrotermic 3 ar putea fi utilizat și la determinarea cantitativă a compoziției amestecurilor de gaze, cu condiția să fie cunoscute în prealabil compoziția calitativă și dependențele ce descriu comportarea statică a aparatului în cazul vehiculării gazelor ce compun amestecul analizat.

Conform relației (II.107), influența căldurii specifice a gazului asupra tensiunii de dezechilibru a punții traductorului debitmetric este descrisă prin derivata parțială a tensiunii de dezechilibru U în raport cu căldura specifică C_p :

$$\frac{\partial U}{\partial C_p} = \frac{3}{8} \left(1 - \frac{4A}{K \cdot S} \right)^2 \cdot \frac{\alpha \cdot R_0^2 \cdot I^3 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta_a)}{A(A - 0.25 \cdot \alpha \cdot R_0 \cdot I^2)} \cdot q_m \quad (II.115)$$

Indicațiile debitmetrului fiind proporționale cu debitul masic al gazului, rezultă că fluctuațiile de presiune nu influențează indicația decât în măsura în care aceste fluctuații afectează căldura specifică, știind că, căldura specifică a gazelor reale crește odată cu presiunea, efectul fiind cu atât mai pronunțat cu cât temperatura este mai scăzută, adică cu cât gazul este mai îndepărtat de condițiile ideale. Ca atare, influența variațiilor de presiune trebuie luată în considerare numai la măsurarea debitului unor gaze care la temperatura și presiunea de lucru sunt apropiate de starea de vapori saturați.

II.8.3. Măsurarea sumei și diferenței a două debite mici de gaze

Prin structura sa, microdebitmetrul electrotermic 3 permite și măsurarea sumei, precum și a diferenței a două debite mici de gaze. Pentru astfel de măsurări cele două fluxuri de gaze se transmit prin câte un tub debitmetric și anume în cazul sumei cele două fluxuri se trimit în senzori opuse prin tuburi, iar în cazul diferenței sensul de curgere trebuie să fie același în ambele tuburi debitmetric.

Ecuatiile de funcționare ale microdebitmetrului electrotermic, în cazul măsurării sumei, respectiv diferenței a două debite, se obțin scriind relația (II.62) pentru fiecare tub debitmetric în parte. Desigur, în acest caz, doar două brațe ale punții Wheatstone sunt active și ca atare tensiunea de dezechilibru U generată de un singur tub debitmetric este numai jumătate din valoarea exprimată de relația (II.62).

Notând cu U_1 tensiunea de dezechilibru generată de tubul debitmetric pe care se găsesc rezistențele R_1 și R_2 (figura II.49) și cu U_2 tensiunea generată de tubul debitmetric paralel pe care se găsesc termorezistențele R_3 și R_4 , cele două tensiuni de dezechilibru vor avea expresiile:

$$U_1 = \frac{3}{16} \left(1 - \frac{4A}{k \cdot S}\right)^2 \cdot \frac{\alpha \cdot R_0^2 \cdot I^3 (1 + \alpha \cdot \theta_a)}{A(A - 0,25\alpha \cdot R_0 \cdot I^2)} \cdot Cp_1 \cdot q_{m1} \quad (\text{II.116})$$

$$U_2 = \frac{3}{16} \left(1 - \frac{4A}{k \cdot S}\right)^2 \cdot \frac{\alpha \cdot R_0^2 \cdot I^3 (1 + \alpha \cdot \theta_a)}{A(A - 0,25\alpha \cdot R_0 \cdot I^2)} \cdot Cp_2 \cdot q_{m2} \quad (\text{II.117})$$

în care Cp_1 și q_{m1} reprezintă căldura specifică și debitul masic al gazului care trece prin tubul superior (figura II.49), iar Cp_2 și q_{m2} reprezintă căldura specifică și debitul masic al gazului care trece prin tubul inferior.

La măsurarea sumei, sensul de curgere prin cele două tuburi se alege astfel ca cele două tensiuni de dezechilibru să aibă aceeași polaritate, adică să se adune:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{B}{2} (Cp_1 \cdot q_{m1} + Cp_2 \cdot q_{m2}) \quad (\text{II.118})$$

Desigur, mărimea B are expresia dată de relația (II.63).

În cazul particular, când cele două fluxuri de gaze sunt de aceeași natură ($Cp_1 = Cp_2 = Cp$), relația (II.118) devine relația (II.119).

$$U = \frac{B}{2} Cp (q_{m1} + q_{m2}) \quad (\text{II.119})$$

Măsurarea diferenței a două debite mici de gaze se realizează la adoptarea unor senzori de curgere prin cele două tuburi care duc la polarități diferite a celor două tensiuni de dezechilibru:

$$U = U_1 - U_2 = \frac{B}{2} (Cp_1 \cdot q_{m1} - Cp_2 \cdot q_{m2}) \quad (\text{II.120})$$

Dacă cele două fluxuri de gaze sunt de aceeași natură ($Cp_1 = Cp_2 = Cp$) se poate scrie relația (II.121).

$$U = \frac{B}{2} C_p (q_{m1} - q_{m2}) \quad (\text{II.121})$$

Din relațiile (II.119) și (II.121) rezultă că măsurarea sumei, respectiv a diferenței a două debite este posibilă numai dacă cele două curenți de gaz sunt de aceeași natură. Totodată se constată că la măsurarea sumei, respectiv a diferenței dintre două debite, sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic este doar jumătate din cea de la măsurarea debitului.

Dacă cele două fluxuri de gaze sunt de natură diferită, indicația microdebitmetrului electrotermic este proporțională cu suma, respectiv diferența produselor $C_p \cdot q_m$. Dacă însă sunt cunoscute valorile căldurilor specifice C_{p1} și C_{p2} , indicația microdebitmetrului electrotermic poate fi de asemenea o măsură pentru suma, respectiv diferența celor două debite.

În figurile II.54 și II.55 sunt prezentate schemele instalațiilor pentru măsurarea sumei, respectiv diferenței a două debite. Drept surse de presiune se folosesc elementele de prescriere EP_1 pentru tubul debitmetric 1 și EP_2 pentru tubul debitmetric 2. Căderile de presiune ΔP_1 și ΔP_2 pe rezistențele pneumatice R_1 și R_2 se măsoară cu manometrele diferențiale Md_1 și Md_2 .

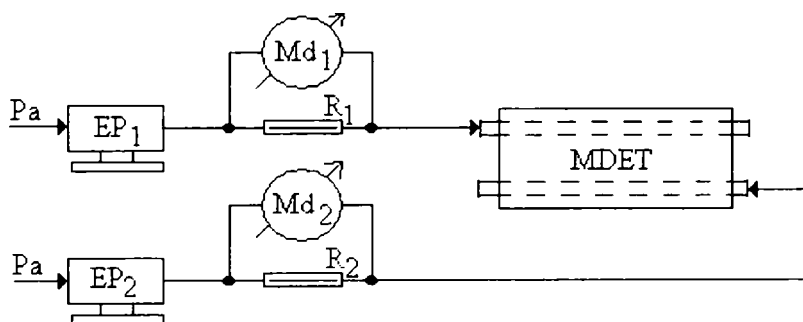


Figura II.54. Schema montajului utilizat la măsurarea sumei de debite

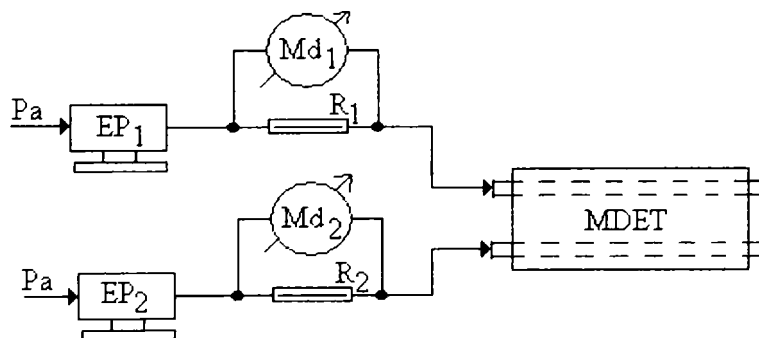


Figura II.55. Schema montajului utilizat la măsurarea diferenței de debite

În vederea aprecierii performanțelor debitmetrului ca și aparat de măsurare a sumei și diferenței de debite, este important să se traseze caracteristica de etalonare a microdebitmetrului electrotermic atunci când gazul trece prin câte un singur tub debitmetric. Determinarea acestor caracteristici de etalonare s-a făcut intercalând debitmetrul în montajul experimental prezentat în figura II.6 (paragraful II.3.1.).

În figurile II.56 și II.57 sunt prezentate dependențele obținute pentru etalonarea fiecărui tub debitmetric.

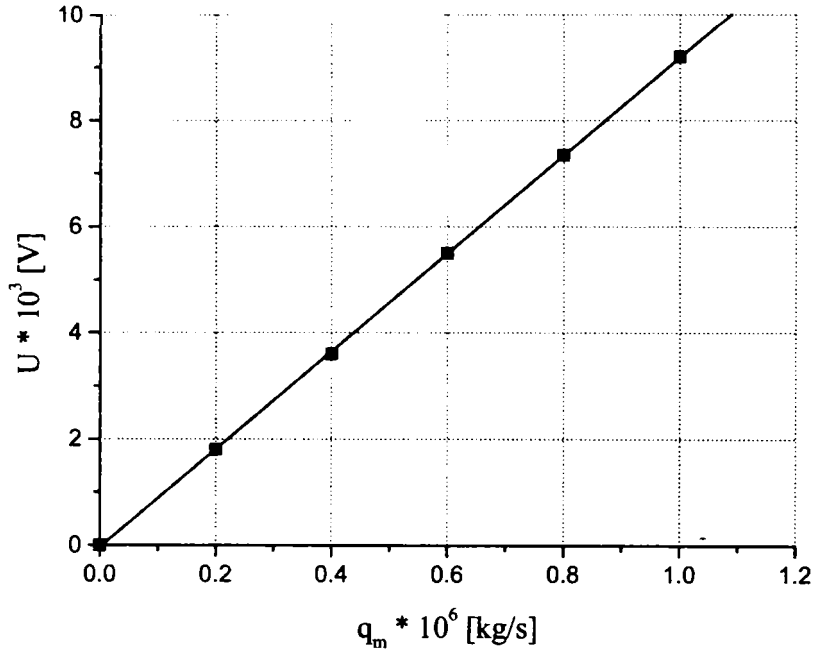


Figura II.56. Caracteristica statică a tubului debitmetric 1

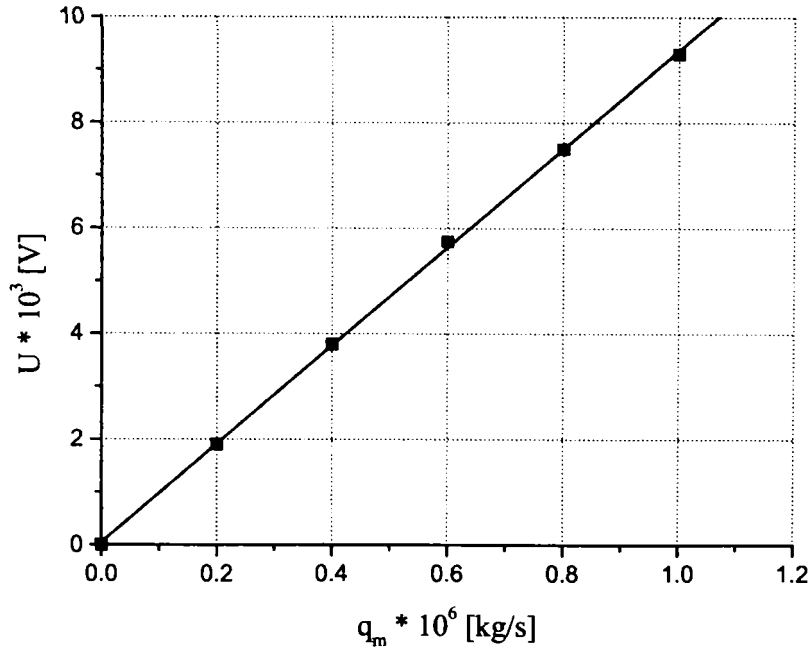


Figura II.57. Caracteristica statică a tubului debitmetric 2

Diferența dintre valorile pantelor celor două drepte este mică (s-a determinat valoarea 9,2 pentru tubul debitmetric 1, respectiv valoarea 9,3 pentru tubul debitmetric 2) ceea ce indică faptul că cele două tuburi ale microdebitmetrului electrotermic se comportă foarte puțin diferit între ele (este important ca rezistențele brațelor punții Wheatstone să fie cât mai apropiate ca valoare).

Pentru determinarea sumei a două debite, cu ajutorul elementelor de prescriere, pe baza relației (II.5), prezentată în paragraful II.3.1., s-au stabilit prin cele două tuburi debite cuprinse în intervalul $0 - 1 \cdot 10^{-6}$ kg/s (suma lor fiind între $0 - 2 \cdot 10^{-6}$ kg/s), s-a așteptat instalarea regimului staționar și s-a citit la fiecare determinare tensiunea de dezechilibru a punții Wheatstone.

În figurile II.58 și II.59 sunt prezentate dependențele $U = f(q_m)$ obținute în următoarele situații:

- s-a menținut constant debitul prin tubul debitmetric 1 la valoarea de $0,5 \cdot 10^{-6}$ kg/s, debitul prin tubul debitmetric 2 fiind modificat în domeniul $0 - 1 \cdot 10^{-6}$ kg/s;
- s-a menținut constant debitul prin tubul debitmetric 2 la valoarea de $0,5 \cdot 10^{-6}$ kg/s, debitul prin tubul debitmetric 1 fiind modificat în domeniul $0 - 1 \cdot 10^{-6}$ kg/s.

După cum se constată din pantele celor două dependențe, acestea sunt suficient de apropiate ca valoare între ele (9,3 în prima situație, respectiv 9,25 în situația a doua), și totodată sunt suficient de apropiate de pantele caracteristicilor statice determinate pentru fiecare tub în parte. Acest lucru confirmă atât identitatea tuburilor debitmetrice, cât și faptul că tensiunea de ieșire are o dependență liniară față de suma celor două debite.

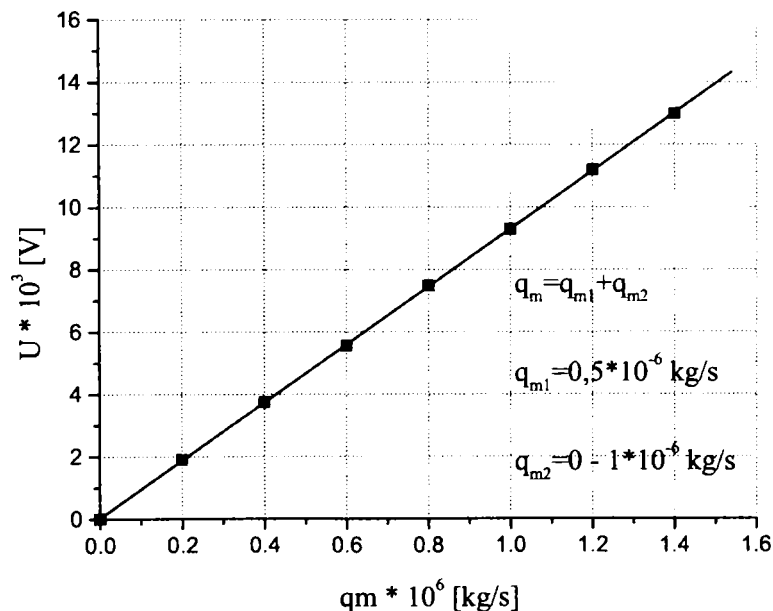


Figura II.58. Dependența $U = f(q_m)$ pentru situația 1 la măsurarea sumei a două debite

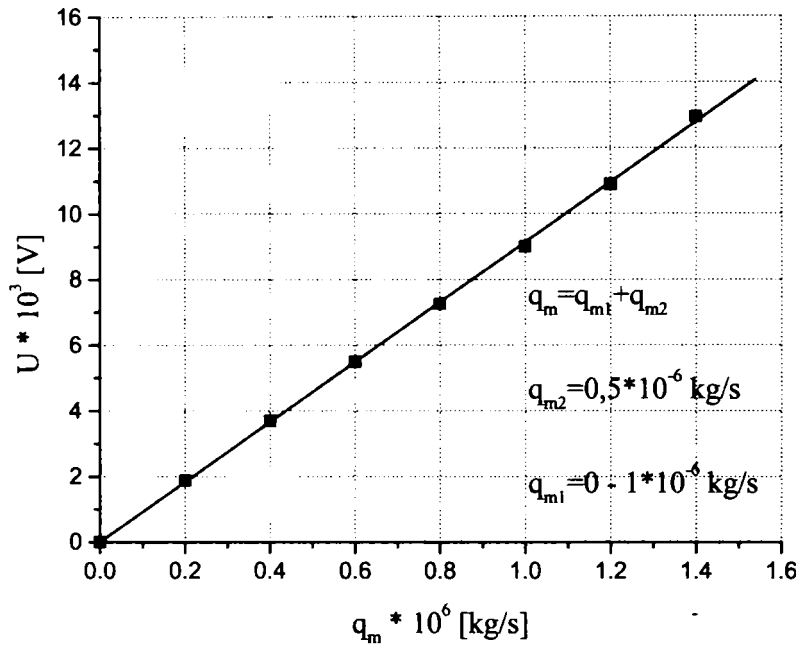


Figura II.59. Dependența $U = f(q_m)$ pentru situația 2 la măsurarea sumei a două debite

În situația determinării diferenței a două debite, tensiunea de ieșire va fi funcție de diferența $q_m = q_{m1} - q_{m2}$ în care q_{m1} și q_{m2} sunt debitele ce trec prin cele două brațe ale debitmetrului. Pentru a nu se ajunge la tensiuni negative, debitul q_{m1} trebuie să fie în permanență mai mare decât debitul q_{m2} .

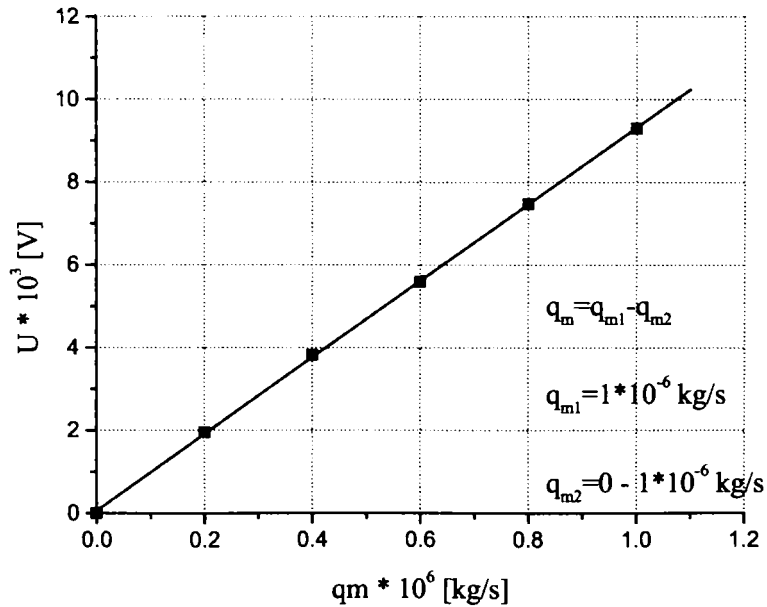


Figura II.60. Dependența $U = f(q_m)$ în situația măsurării diferenței a două debite

Reprezentând grafic dependența dintre tensiunea de ieșire și diferența dintre cele două debite (figura II.60), se obține o dreaptă cu o pantă puțin diferită ca valoare (s-a obținut valoarea de 9,3) de cea obținută la măsurarea sumei, respectiv de la trasarea caracteristicilor statice pentru cele două tuburi debitmetrice.

Conform celor prezentate, se poate concluziona, că tensiunea de dezechilibru a punții microdebitmetrului electrotermic este suma tensiunilor ce apar la trecerea pe rând a celor două debite, în cazul măsurării sumei, respectiv este diferența tensiunilor ce apar la trecerea succesivă a celor două debite, fiecare prin câte un singur tub debitmetric.

II.8.4 Extinderea domeniului de măsurare

Domeniul de măsurare al microdebitmetrului electrotermic 3 începe practic la zero și este limitat în sus de următoarea condiție impusă de principiul de funcționare al aparatului: la parcurgerea tubului debitmetric fluxul de gaz trebuie să aibă timp suficient pentru a ajunge pe toată lungimea tubului în echilibru termic cu temperatura locală a peretelui tubului. Conform datelor din literatură [176] această condiție este satisfăcută până la valori ale produsului $C_p \cdot q_m$ în jur de $1,5 \cdot 10^{-3}$ W/grad. Această valoare corespunzătoare, în cazul aerului, unui debit masic de aproximativ $1,7 \cdot 10^{-6}$ kg/s.

În varianta constructivă de bază, microdebitmetrul electrotermic 3 funcționează cu cele două tuburi debitmetrice conectate în serie în privința fluxului gazului de măsurat.

Aparatul este realizat să funcționeze pe porțiunea riguros liniară a caracteristicii de debit, în domeniul $0 - 1,6 \cdot 10^{-6}$ kg/s aer, cu semnalul de ieșire $0 - 0,04$ V.

În toate încercările privind extinderea domeniului de măsurare, s-a preconizat menținerea tuturor parametrilor variantei de bază, ceea ce asigură o bună reproductibilitate atât a determinărilor experimentale cât și a performanțelor în exploatare.

Pentru cazurile în care este necesară numai dublarea domeniului de debit, există două posibilități:

- utilizarea unui singur tub debitmetric (al doilea menținut liber);
- conectarea în paralel a celor două tuburi debitmetrice.

Prima variantă a fost exclusă deoarece nu respectă caracteristicile de bază ale microdebitmetrului electrotermic 3 din punct de vedere al debitului de gaz ce trece prin tubul debitmetric.

Varianta a doua este perfect utilizabilă, același semnal de ieșire maxim obținându-se pentru debitul de $2 \cdot 10^{-6}$ kg/s (câte un debit de $1 \cdot 10^{-6}$ kg/s prin fiecare tub). Întrădevăr, testările experimentale arată dublarea sensibilității când se conectează ambele tuburi debitmetrice. Nu s-au determinat caracteristicile de debit pentru această variantă deoarece s-a preconizat adaptarea aparatului pentru mai multe domenii de măsurare. Totodată, față de varianta de bază s-ar fi impus ori trimiterea celor două fluxuri de gaz paralele în direcții opuse, ori modificarea unor conexiuni electrice în interiorul aparatului.

În vederea realizării mai multor domenii de măsurare axate pe varianta de bază s-a adoptat metoda șuntării pneumatice, adică a conectării în paralel a microdebitmetrului electrotermic cu un tub calibrat (șunt pneumatic) astfel

dimensionat încât la debitul maxim de măsurat prin microdebitmetrul electrotermic să treacă $1 \cdot 10^{-6}$ kg/s [26].

Schema de principiu a metodei șuntului pneumatic este prezentată în figura II.61 [26].

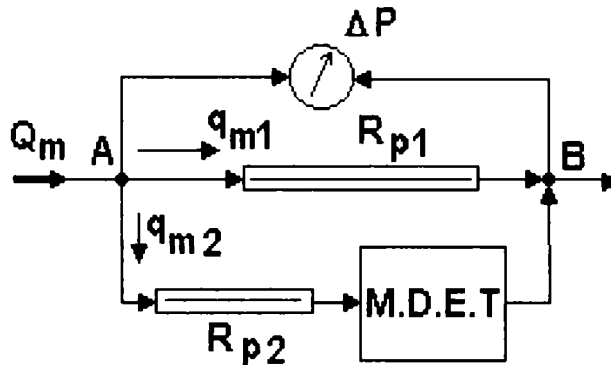


Figura II.61. Dispozitivul experimental utilizat la studiul extinderii domeniului de măsurare prin metoda șunturilor pneumatice

În punctul A, debitul masic total de gaz Q_m se desparte în două fluxuri paralele. Prin tubul calibrat cu rezistența pneumatică R_{p1} trece debitul q_{m1} , iar prin microdebitmetrul electrotermic MDET cu rezistența pneumatică R_{p2} conectată amonte, trece debitul q_{m2} . Căderea de presiune ΔP pe cele două căi paralele este aceeași.

Scriind ecuația bilanțului de materiale și a legii lui Poiseuille pentru cele două căi, avem:

$$Q_m = q_{m1} + q_{m2} \quad (\text{II.122})$$

$$\Delta P = R_{p1} \cdot q_{m1} = R_{p2} \cdot q_{m2} \quad (\text{II.123})$$

Eliminând debitul q_{m1} din relațiile (II.122) și (II.123), rezultă:

$$R_{p1}(Q_m - q_{m2}) = R_{p2} \cdot q_{m2} \quad (\text{II.124})$$

respectiv:

$$Q_m = \left(\frac{R_{p2}}{R_{p1}} + 1 \right) \cdot q_{m2} = K_x \cdot q_{m2} \quad (\text{II.125})$$

Se observă că factorul de multiplicare K_x este funcție numai de raportul rezistențelor pneumatice R_{p2}/R_{p1} .

La calculele de dimensionare a șuntării pneumatice se va folosi unitatea de măsură pentru rezistențe laminare, Plarul [167]. Drept unitate de măsură s-a considerat rezistența pneumatică a unui tub capilar pe care ia naștere o cădere de presiune de 1 N/m^2 când este parcurs de un debit masic de aer de 1 kg/s și s-a acordat denumirea de Plar (Pneumatic Laminar Resistance), respectiv simbolul Pl.

Pe baza relației (II.5) se poate scrie:

$$R_p = \frac{\Delta P}{q_m} \quad (\text{II.126})$$

respectiv:

$$1 \text{ Pl} = \frac{1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}} \quad (\text{II.127})$$

sau

$$1 \text{ MP}l = \frac{1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{1 \frac{\text{mg}}{\text{s}}} \quad (\text{II.128})$$

Pentru tuburi cu secțiune circulară, expresia rezistenței pneumatice laminare are forma relației (II.129).

$$R_p = \frac{128 \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot d^4 \cdot \rho_m} \quad (\text{II.129})$$

în care:

- η – vâscozitatea dinamică a gazului, $[\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2]$;
- L – lungimea tubului, $[\text{m}]$;
- d – diametrul interior al tubului, $[\text{m}]$;
- ρ_m – densitatea medie a gazului în tub, $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Relația (II.129) se poate transpune în diagrama ușor de trasat pentru orice gaz, reprezentând dependența $R_p = f(L)$ și având ca parametru variabil diametrul d .

Diagrama prezentată în figura II.62 a fost calculată pentru aer la temperatura de 20°C și presiune atmosferică. Ea cuprinde reprezentarea dependențelor $R_p = f(L)$ pentru valorile lungimilor și diametrelor care s-au utilizat la dimensionarea șuntării pneumatice.

În principiu se va proceda în felul următor:

- se alege valoarea factorului de multiplicare K_x ;
- cunoscând dimensiunile tuburilor debitmetrice (lungimea L și diametrul d), din figura II.62 se determină rezistența pneumatică R_{p_2} a microdebitmetrului MDET;
- se calculează rezistența pneumatică necesară a șuntului pneumatic cu relația rezultată din ecuația (II.125):

$$R_{p_1} = \frac{R_{p_2}}{K_x - 1} \quad (\text{II.130})$$

- utilizând diagrama din figura II.62 se determină dimensiunile șuntului pneumatic.

În tabelul II.48 sunt prezentate ecuațiile matematice ale dependențelor $R_p = f(L)$ prezentate în figura II.62. Coeficienții acestor ecuații au fost determinați în mediul de programare Matlab 7.5, utilizând metoda celor mai mici pătrate.

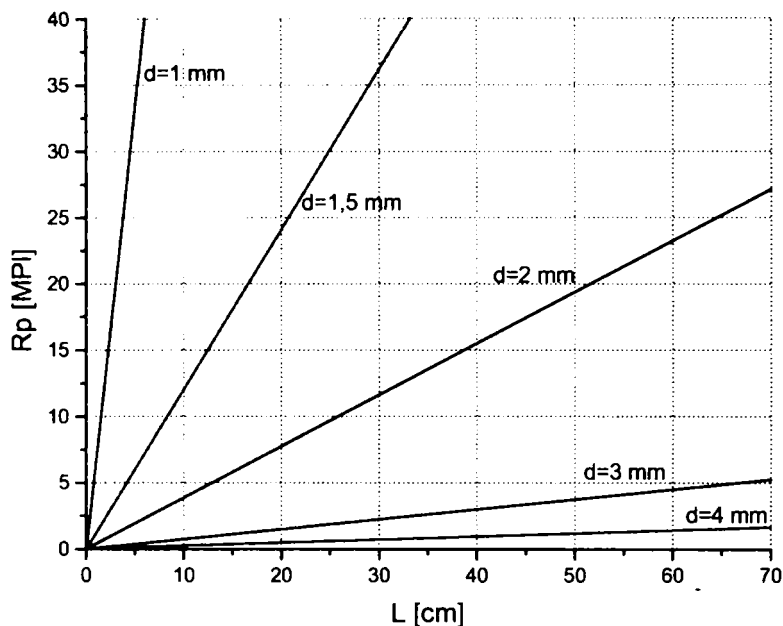


Figura II.62. Diagrama pentru determinarea șunturilor pneumatice

Tabel II.48. Dependența $R_p = f(L)$

d [mm]	Ecuțiile matematice
4	$R_p = 0,026 + 0,023 \cdot L$
3	$R_p = 0,075 \cdot L$
2	$R_p = 0,396 \cdot L$
1,5	$R_p = -0,027 + 1,207 \cdot L$
1	$R_p = -1,409 + 6,957 \cdot L$

S-a preconizat realizarea următoarelor domenii de măsurare: $0 - 5 \cdot 10^{-6}$ kg/s, $0 - 10 \cdot 10^{-6}$ kg/s, $0 - 20 \cdot 10^{-6}$ kg/s și $0 - 50 \cdot 10^{-6}$ kg/s, respectiv pentru valori ale factorului de multiplicare K_x egale cu: 5, 10, 20 și 50.

Având în vedere dimensiunile tubului debitmetric ($d_2 = 2$ mm și $2L = 580$ mm) din diagrama prezentată în figura II.62 s-a determinat valoarea rezistenței pneumatice R_{p2} ca fiind egală cu 23 MPI.

Pentru cele patru valori ale factorului de multiplicare K_x s-au calculat valorile necesare rezistenței șunturilor pneumatice R_{p1} (relația (II.130)), respectiv s-au determinat dimensiunile corespunzătoare din figura II.62. Rezultatele acestor calcule sunt prezentate în tabelul II.49.

Tabelul II.49. Valorile rezistenței șunturilor și dimensiunile corespunzătoare

$Q_m \text{ max.} \cdot 10^6$ [kg/s]	K_x	R_{p2} [MPI]	R_{p1} [MPI]	ΔP [N/m ²]	$d_1 \cdot 10^3$ [m]	$L_1 \cdot 10^2$ [m]
1	1	23	-	23	-	-
5	5	23	5,75	23	2	15,52
10	10	23	2,56	23	3	34,13
20	20	23	1,21	23	3	16,13
50	50	23	0,47	23	4	19,30

Se observă că la o astfel de alegere a parametrilor șunturilor pneumatice, căderea de presiune maximă rămâne constantă la 23 N/m^2 . Datorită valorii reduse a lui ΔP_{\max} se creează posibilitatea obținerii unor caracteristici de debit liniare chiar și în condițiile în care șuntul pneumatic nu respectă relația (II.129) din cauza valorii relativ reduse a raportului L_1/d_1 .

II.9. Simularea comportării microdebitmetrelor electrotermice

Obiectivul simulării este asigurarea că mijlocul de calcul reproduce cu fidelitate comportamentul unui sistem, comportament indus de modelul asociat sistemului respectiv. Astfel, în acest subcapitol vor fi prezentate rezultatele obținute în urma simulării comportării microdebitmetrelor electrotermice pe baza ecuațiilor ce descriu funcționarea acestora, precum și validarea acestor simulări. Simulările au fost efectuate în mediul de programare Matlab 7.5.

Vor fi prezentate următoarele simulări:

- Simularea comportării statice a celor trei microdebitmetre electrotermice;
- Simularea comportării dinamice a celor trei microdebitmetre electrotermice.

II.9.1. Simularea comportării statice

Conform teoriei modelării [5], putem considera ecuația (II.4) ca fiind un model concentrat, o simplificare a modelului de bază al debitmetrelor calorimetrice, obiectivul simplificării fiind găsirea celui mai eficient model a cărui comportare să se apropie de comportarea reală a sistemului. Astfel, procesul de simulare cu modelul concentrat poate fi considerat și ca o verificare a comportării sistemului [140].

În cazul microdebitmetrelor electrotermice 1 și 2, simularea comportării statice s-a realizat pe baza ecuației (II.4), ținându-se cont de informațiile furnizate de cadrul experimental exploatat, iar simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 s-a realizat pe baza ecuației particulare de funcționare a acestuia.

Pentru simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 1 s-au propus cinci seturi de dependențe $U = f(q_m)$ pentru diferite puteri de încălzire (1,15 W; 1,85 W; 2 W; 2,15 W; 2,5 W). Au fost supuse analizei tensiunile de dezechilibru corespunzătoare valorilor debitului de aer cuprinse în intervalul $0 - 1,22 \cdot 10^{-6} \text{ kg/s}$, denumite în figura II.63 „date experimentale”.

Pentru o mai bună precizie a simulării cu ajutorul ecuației (II.4) s-a considerat, în urma unor simulări repetate, necesară ajustarea sensibilității K prin înlocuirea cu K' . Acesta reprezintă produsul dintre K și un factor de corecție determinat prin simulare în mediul de programare Matlab 7.5, pentru cazurile prezentate în tabelul II.6. Valorile factorilor de corecție sunt apropiate, media aritmetică a acestora fiind 0.994.

Astfel, ecuația (II.4) devine ecuația (II.131).

$$U = K' \cdot q_m \quad (\text{II.131})$$

Valoarea lui K' necesară simulării poate fi determinată și utilizând ecuația (II.132), ecuație dedusă tot în domeniile cadrului experimental din tabelul II.6.

$$K' = -4.719 + 15.310 \cdot P \quad (\text{II.132})$$

În figura II.63 este prezentată comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 1 obținută prin simulare în mediul de programare Matlab 7.5. Rezultatul simulării poate fi descris de o ecuație cu forma generală de tipul ecuației (II.21), coeficienții ecuației pentru cele cinci cazuri simulate fiind prezentați în tabelul II.50.

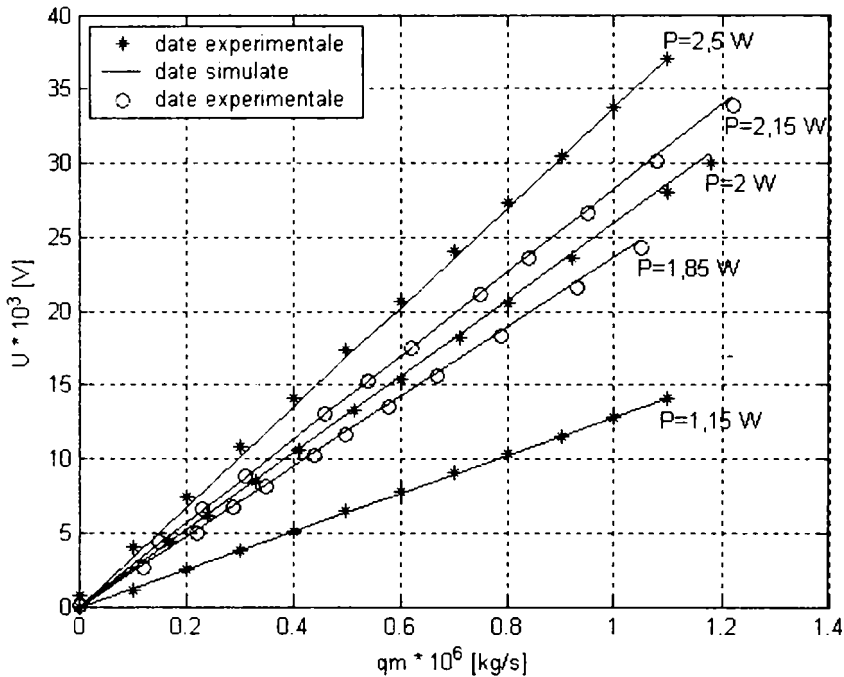


Figura II.63. Simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 1

Tabel II.50. Coeficienții ecuației ce descrie rezultatul simulării comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 1

Caz	P [W]	Coeficienții ecuației	
		a	b
Simulare 1.	1.15	$0,008 \cdot 10^{-3}$	$12,849 \cdot 10^3$
Simulare 2.	1.85	$0,001 \cdot 10^{-3}$	$23,650 \cdot 10^3$
Simulare 3.	2.00	$-0,022 \cdot 10^{-3}$	$26,016 \cdot 10^3$
Simulare 4.	2.15	$-0,013 \cdot 10^{-3}$	$28,315 \cdot 10^3$
Simulare 5.	2.50	$-0,009 \cdot 10^{-3}$	$33,713 \cdot 10^3$

O posibilă definiție a conceptului de validare a simulărilor are în vedere stabilirea modului de adecvare al modelului la realitate, deci modul în care predicțiile concordă cu observațiile. Astfel, multe dintre tehnicile utilizate la validarea modelelor pot fi utilizate și la verificarea simulărilor [5, 140].

Pentru validarea simulărilor au fost calculați următorii indicatori de adecvare: dispersia de adecvare σ^2 , deviația standard σ , indicatorul preciziei modelului R^2 și coeficientul de corelație R. Valorile acestora sunt prezentate în tabelul II.51.

Tabel II.51. Indicatorii de adecvanță pentru cazurile simulate pentru microdebitmetrul electrotermic 1

Caz	σ^2	σ	R	R^2
Simulare 1.	$0,109 \cdot 10^{-7}$	$0,104 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,983
Simulare 2.	$0,827 \cdot 10^{-7}$	$0,288 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 3.	$1,109 \cdot 10^{-7}$	$0,333 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 4.	$0,727 \cdot 10^{-7}$	$0,270 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 5.	$2,946 \cdot 10^{-7}$	$0,543 \cdot 10^{-3}$	0,999	1

În urma calculului indicatorilor de adecvanță se observă valoarea maximă a indicatorului preciziei R^2 pentru majoritatea cazurilor simulate. Pentru primele patru cazuri, puterile de încălzire la care au fost făcute determinările se încadrează în cadrul experimental definit în tabelul II.6. În cazul simulării cu numărul 5, simularea este realizată pentru valori ale tensiunii de dezechilibru U obținute pentru o putere mai mare, dar și în acest caz simularea pe baza relației (II.131) reproduce evoluția datelor experimentale.

Pentru compararea rezultatului simulării comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 2 cu datele oferite de sistemul real, s-au ales cinci seturi de date experimentale obținute măsurându-se tensiunile de dezechilibru pentru diferite debite de aer, cuprinse în intervalul $0 - 3,15 \cdot 10^{-6}$ kg/s, la diferite puteri de încălzire (0,60 W; 0,94 W; 1,65 W; 1,90 W; 2,32 W).

Valoarea lui K necesară simulării este valoarea dedusă, conform ecuației (II.19), în domeniile cadrului experimental prezentat în tabelul II.16.

În figura II.64 este prezentată comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 2 obținută prin simulare în mediul de programare Matlab 7.5. Rezultatul simulării poate fi descris de o ecuație cu forma generală de tipul ecuației (II.21), coeficienții ecuației pentru cele cinci cazuri simulate fiind prezentați în tabelul II.52.

Tabel II.52. Coeficienții ecuației ce descrie rezultatul simulării comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 2

Caz	P [W]	Coeficienții ecuației	
		a	b
Simulare 1.	0,60	$-0,003 \cdot 10^{-3}$	$2,611 \cdot 10^3$
Simulare 2.	0,94	$0,011 \cdot 10^{-3}$	$6,843 \cdot 10^3$
Simulare 3.	1,65	$-0,011 \cdot 10^{-3}$	$14,770 \cdot 10^3$
Simulare 4.	1,90	$-0,017 \cdot 10^{-3}$	$17,564 \cdot 10^3$
Simulare 5.	2,32	$0,002 \cdot 10^{-3}$	$22,246 \cdot 10^3$

Și în acest caz, pentru validarea simulărilor au fost calculați următorii indicatori de adecvanță (tabelul II.53): dispersia de adecvanță σ^2 , deviația standard σ , indicatorul preciziei modelului R^2 și coeficientul de corelație R. Dintre indicatorii de adecvanță, cel mai relevant pentru exactitatea simulării este indicatorul preciziei R^2 .

Cu toate că în acest caz a fost depășită atât limita inferioară cât și cea superioară, în ceea ce privește valoarea puterii de încălzire, a cadrului experimental definit pentru microdebitmetrul electrotermic 2, nu a fost necesară ajustarea valorii lui K, constatându-se de asemenea că ecuația utilizată pentru simulare

(ecuația(II.4)) reflectă tendința datelor experimentale, lucru evidențiat și de indicatorii de adecvță.

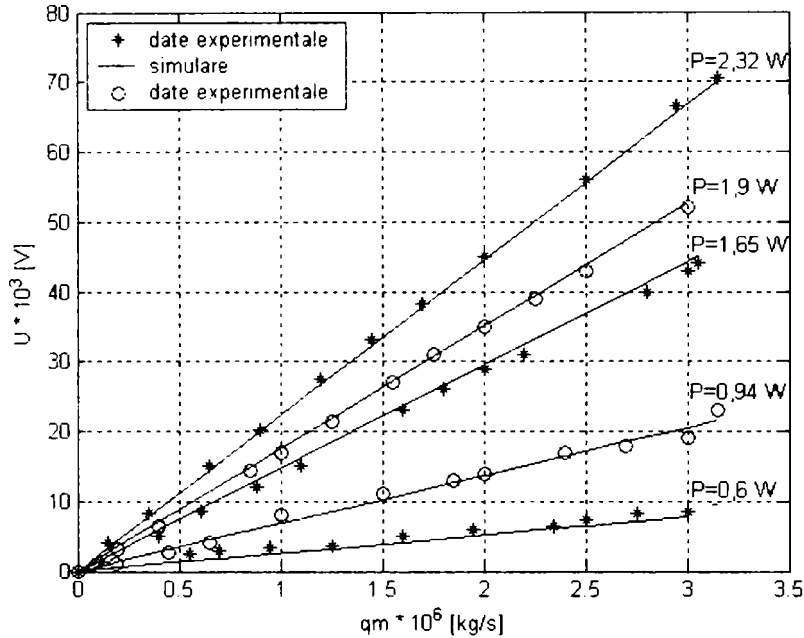


Figura II.64. Simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 2

Tabel II.53. Indicatorii de adecvță pentru cazurile simulate pentru microdebitmetrul electrotermic 2

Caz	σ^2	σ	R	R^2
Simulare 1.	$8,109 \cdot 10^{-7}$	$0,901 \cdot 10^{-3}$	0,945	1
Simulare 2.	$6,691 \cdot 10^{-7}$	$0,818 \cdot 10^{-3}$	0,995	0,975
Simulare 3.	$10,336 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$	0,998	1
Simulare 4.	$2,409 \cdot 10^{-7}$	$0,490 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 5.	$3,518 \cdot 10^{-7}$	$0,593 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,993

Simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 s-a făcut cu ajutorul ecuației particulare de funcționare.

S-a admis că relația (II.62) reprezintă modelul de bază care constituie imaginea prin care poate fi perceput sistemul real. Acest model este pe deplin valid doar dacă reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale, simularea fiind una din mijloacele de verificare a capacității de predicție a modelului.

Pentru compararea rezultatului oferit de simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 cu datele oferite de sistemul real, s-au utilizat cele zece seturi de date experimentale prezentate în paragraful II.5.1.

În figurile II.65 și II.66 sunt prezentate dependențele ce descriu comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 3, obținute prin simulare în mediul de programare Matlab 7.5. Rezultatul simulării poate fi descris de o ecuație cu forma generală de tipul ecuației (II.21), coeficienții ecuației pentru cele cinci cazuri simulate fiind prezentați în tabelul II.54.

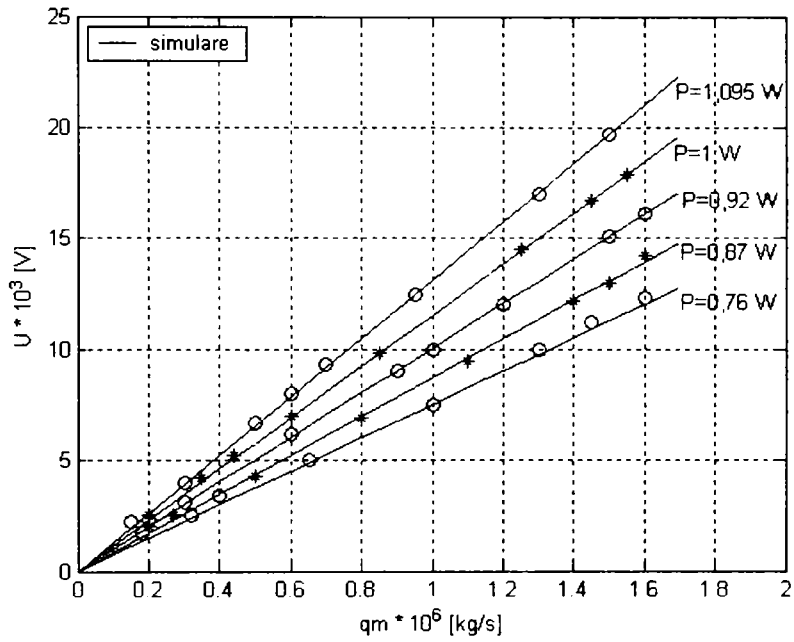


Figura II.65. Simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 (cazurile 1-5)

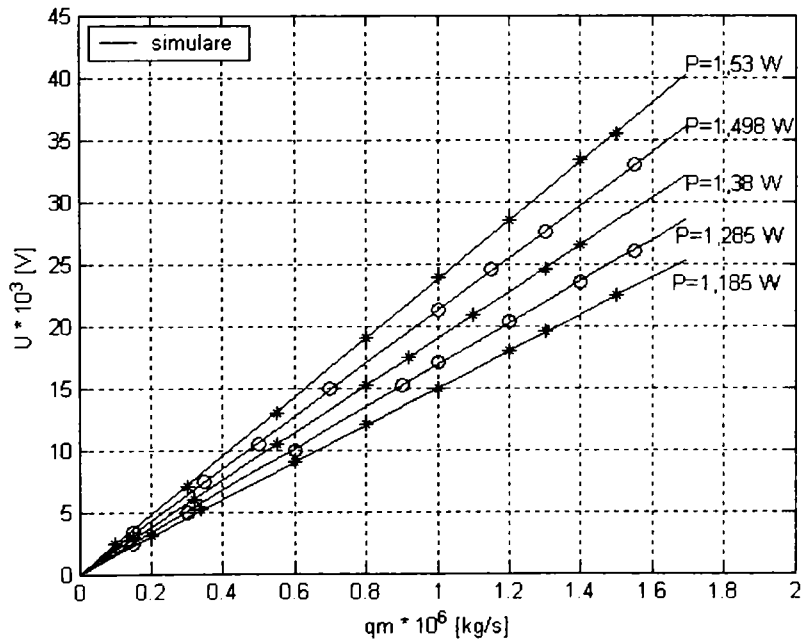


Figura II.66. Simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 (cazurile 6-10)

Tabel II.54. Coeficienții ecuației ce descrie rezultatul simulării comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3

Caz	P [W]	Coeficienții ecuației	
		a	b
Simulare 1.	0,76	$0,021 \cdot 10^{-3}$	$7,505 \cdot 10^3$
Simulare 2.	0,87	$-0,005 \cdot 10^{-3}$	$8,724 \cdot 10^3$
Simulare 3.	0,92	$-0,021 \cdot 10^{-3}$	$10,084 \cdot 10^3$
Simulare 4.	1	$0,009 \cdot 10^{-3}$	$11,531 \cdot 10^3$
Simulare 5.	1,095	$-0,006 \cdot 10^{-3}$	$13,158 \cdot 10^3$
Simulare 6.	1,185	$0,006 \cdot 10^{-3}$	$14,921 \cdot 10^3$
Simulare 7.	1,285	$0,003 \cdot 10^{-3}$	$16,863 \cdot 10^3$
Simulare 8.	1,38	$0,029 \cdot 10^{-3}$	$18,921 \cdot 10^3$
Simulare 9.	1,498	$-0,008 \cdot 10^{-3}$	$21,238 \cdot 10^3$
Simulare 10.	1,53	$-0,002 \cdot 10^{-3}$	$23,696 \cdot 10^3$

Pentru a verifica cantitativ validarea acestor simulări au fost calculați indicatorii de adecvănță (dispersia de adecvănță σ^2 , deviația standard σ , indicatorul preciziei modelului R^2 , coeficientul de corelație R) efectuând o comparație între datele furnizate de procesul real și prezicerile modelului de bază. Valorile acestora sunt prezentate în tabelul II.55.

Tabel II.55. Indicatorii de adecvănță pentru cazurile simulate pentru microdebitmetrul electrotermic 3

Caz	σ^2	σ	R	R^2
Simulare 1.	$0,7 \cdot 10^{-7}$	$0,265 \cdot 10^{-3}$	0,997	0,999
Simulare 2.	$0,257 \cdot 10^{-7}$	$0,160 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 3.	$0,243 \cdot 10^{-7}$	$0,156 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 4.	$0,157 \cdot 10^{-7}$	$0,125 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 5.	$0,129 \cdot 10^{-7}$	$0,113 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 6.	$0,1 \cdot 10^{-7}$	$0,1 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,997
Simulare 7.	$0,857 \cdot 10^{-7}$	$0,093 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,999
Simulare 8.	$0,114 \cdot 10^{-7}$	$0,107 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 9.	$0,143 \cdot 10^{-7}$	$0,120 \cdot 10^{-3}$	0,999	1
Simulare 10.	$0,157 \cdot 10^{-7}$	$0,125 \cdot 10^{-3}$	0,999	0,993

Analizând calitativ și cantitativ dependențele descrise de ecuația particulară de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3 se poate afirma că aceasta reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale. Se remarcă și în acest caz valorile indicatorului preciziei R^2 , acesta având în majoritatea situațiilor valoarea maximă.

În figura II.67 este prezentată dependența dintre sensibilitatea aparatului K, obținută în urma simulării pe baza ecuației particulare de funcționare, și puterea de încălzire P. Această dependență este descrisă de ecuația (II.133), pentru care s-a calculat coeficientul de corelație $R = 0,994$ și deviația standard $\sigma = 0,653$.

$$K_{\text{simulat}} = -8,623 + 20,208 \cdot P \quad (\text{II.133})$$

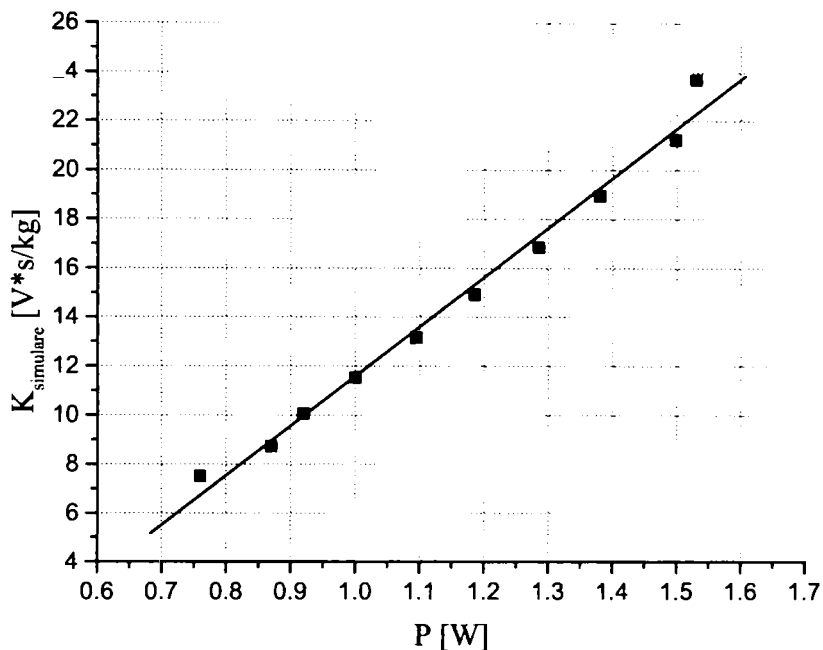


Figura II.67. Dependența dintre sensibilitatea obținută în urma simulării și puterea de încălzire

În tabelul II.56 sunt prezentate comparativ valorile K obținute experimental și cele obținute în urma simulării.

Tabel II.56. Valorile $K_{\text{experimental}}$ și K_{simulat} pentru microdebitmetrul electrotermic 3

P [W]	0,76	0,87	1	1,185	1,285	1,38	1,498	1,53
$K_{\text{exp}} [\text{V}\cdot\text{s}/\text{kg}]$	7,465	8,714	11,407	14,923	16,786	18,8	21,143	23,571
$K_{\text{sim}} [\text{V}\cdot\text{s}/\text{kg}]$	7,511	8,722	11,536	14,924	16,854	18,952	21,227	23,689

Comparând predicțiile ecuației (II.133) cu predicțiile ecuației (II.20) obținută pentru cadrul experimental prezentat în tabelul II.27, se constată o diferență neînsemnată între valorile acestora. Simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 se poate efectua, evident, și pe baza ecuației (II.4), valoarea lui K putând fi determinată pe baza oricăreia din cele două ecuații. Totodată, se poate presupune că predicțiile modelelor asociate microdebitmetrului electrotermic 3 pot fi extinse și peste limitele impuse de cadrul experimental, cu toate că utilitatea practică a acestei extinderi nu este justificată, cadrul experimental definit fiind suficient pentru exploatarea debitmetrului. Verificarea practică a acestei presupunerii se poate face, bineînțeles, ținând cont de limitele impuse de construcția aparatului.

În figurile II.68 și II.69 sunt prezentate comparativ predicțiile obținute prin simulare și valorile furnizate de sistemul real, la măsurarea debitului de aer la temperaturi diferite ale mediului ambiant ($17\text{ }^{\circ}\text{C}$ și $27\text{ }^{\circ}\text{C}$) și caracteristicile statice la măsurarea debitului masic la diferite gaze (aer, dioxid de carbon, oxigen, azot). Și

În aceste situații se constată că predicțiile modelului de bază sunt suficient de apropiate de realitate.

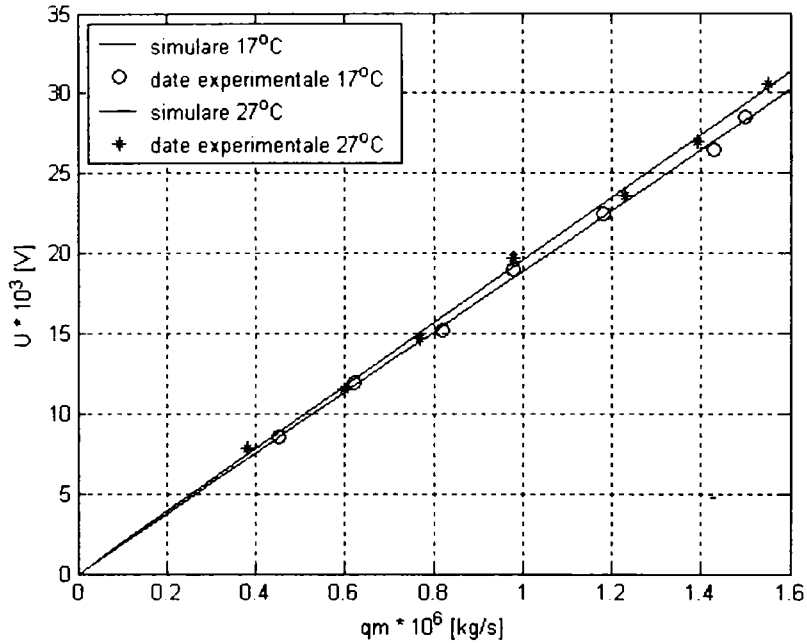


Figura II.68. Simularea comportării statice la temperaturi diferite ale mediului ambiant

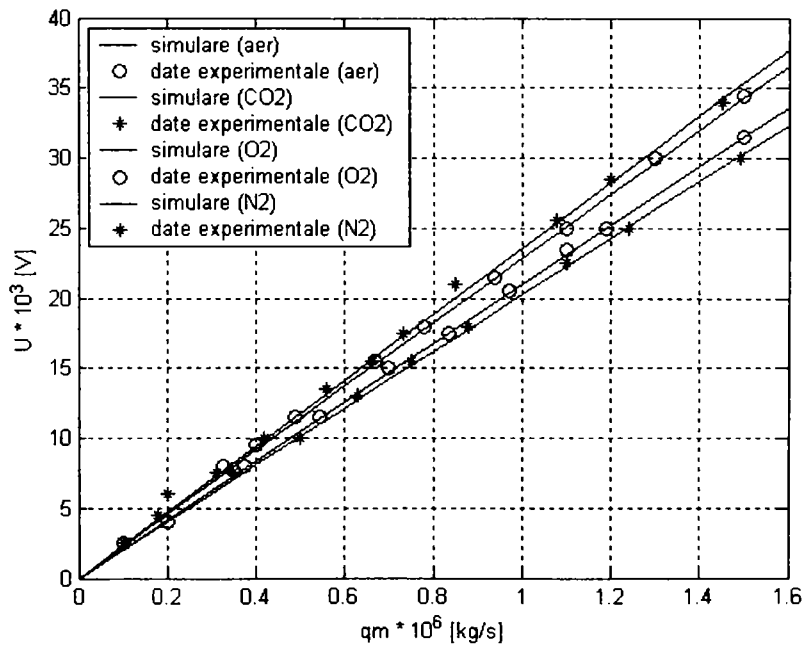


Figura II.69. Simularea comportării statice la măsurarea debitului masic a diferite gaze

II.9.2. Simularea comportării dinamice

Simularea comportării dinamice a celor trei microdebitmetre electrotermice s-a realizat pe baza ecuației (II.24), pentru toate cazurile prezentate în tabelele II.28, II.29 și II.30, utilizând informațiile furnizate de cadrele experimentale.

În figurile II.70, II.71 și II.72 sunt prezentate predicțiile obținute în urma simulării comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 1. Ca și în cazul simulării comportării statice, pentru validarea simulărilor au fost calculați următorii indicatori de adecvare: dispersia de adecvare σ^2 , deviația standard σ , indicatorul preciziei R^2 și coeficientul de corelație R . Valorile acestora sunt prezentate în tabelul II.57. Acestea au fost obținute utilizând datele furnizate de sistemul real și predicțiile ecuației (II.24).

Tabel II.57. Indicatorii de adecvare pentru simulările comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 1

Caz	P [W]	Semnalul treaptă q_m [kg/s]	σ^2	σ	R	R^2
1.	0,85	$0,25 \cdot 10^{-6}$	0,002	0,047	0,998	0,951
		$0,70 \cdot 10^{-6}$	0,005	0,071	0,999	0,970
2.	1,26	$0,70 \cdot 10^{-6}$	0,028	0,168	0,999	0,944
3.	1,495	$0,25 \cdot 10^{-6}$	0,036	0,190	0,992	0,868
		$0,60 \cdot 10^{-6}$	0,056	0,238	0,997	0,932

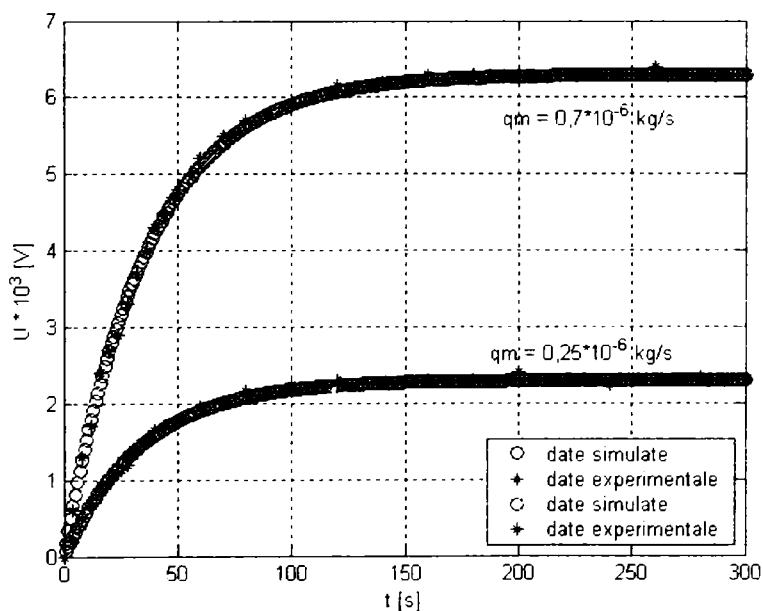


Figura II.70. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 1 – caz 1

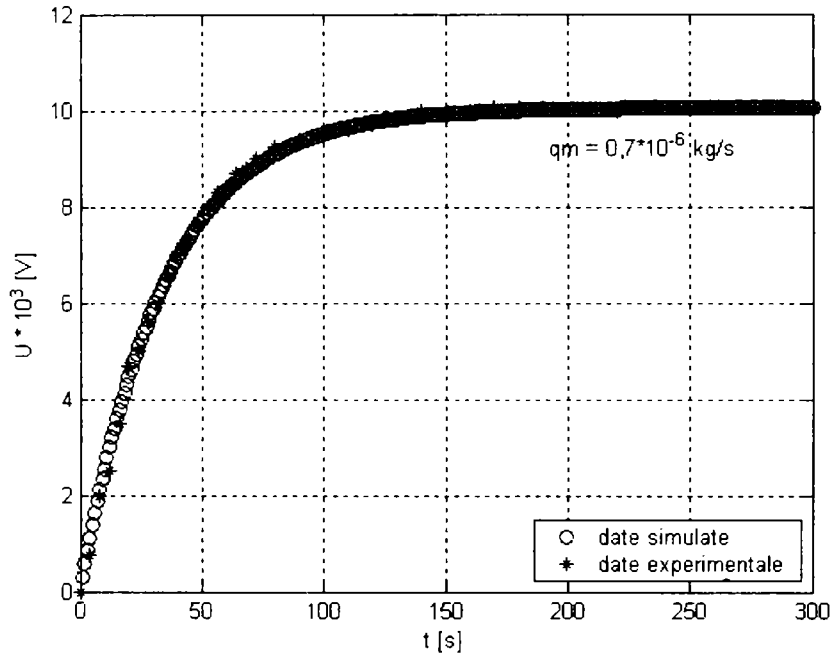


Figura II.71. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 1 - caz 2

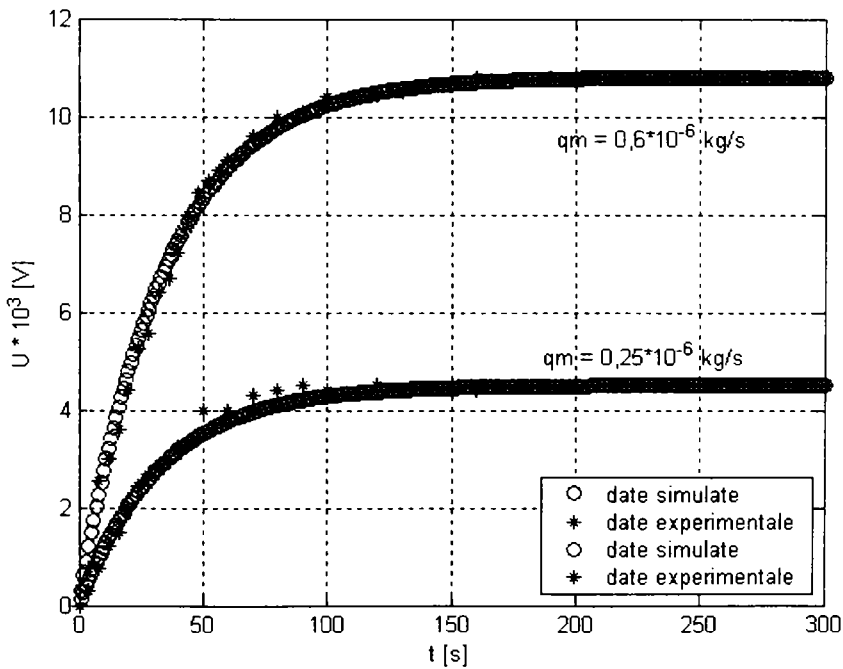


Figura II.72. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 1 - caz 3

În figurile II.73 – II.79 sunt prezentate predicțiile obținute în urma simulării comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2, iar în tabelul II.58 sunt prezentați indicatorii de adecvază corespunzători situațiilor simulate.

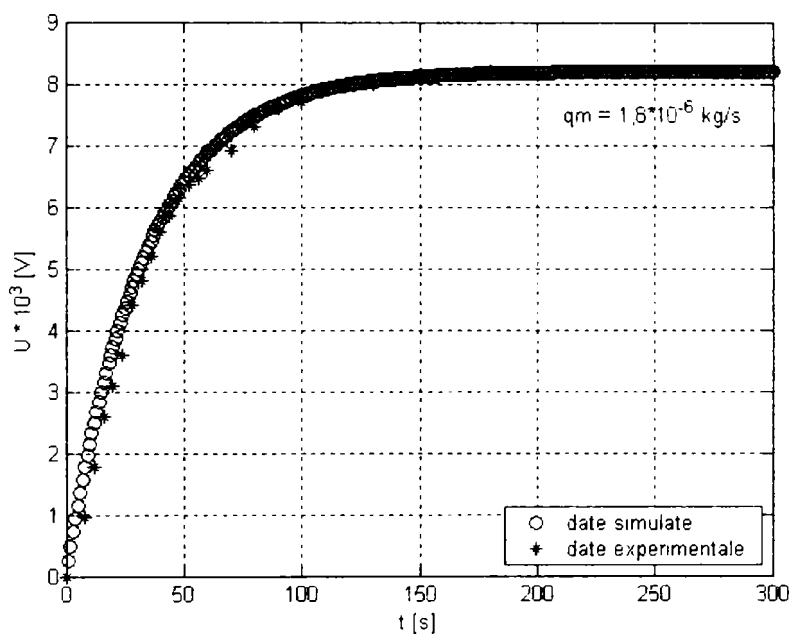


Figura II.73. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2 - caz 1

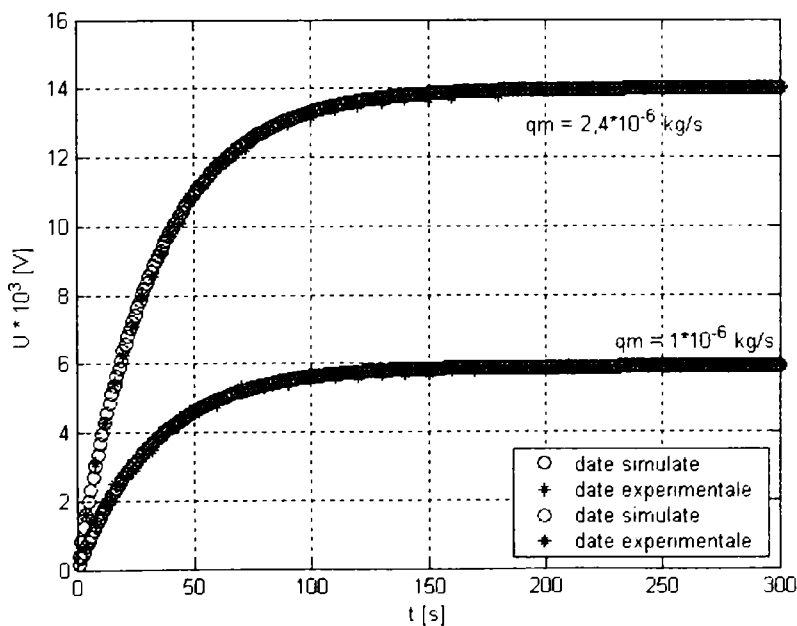


Figura II.74. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2 - caz 2

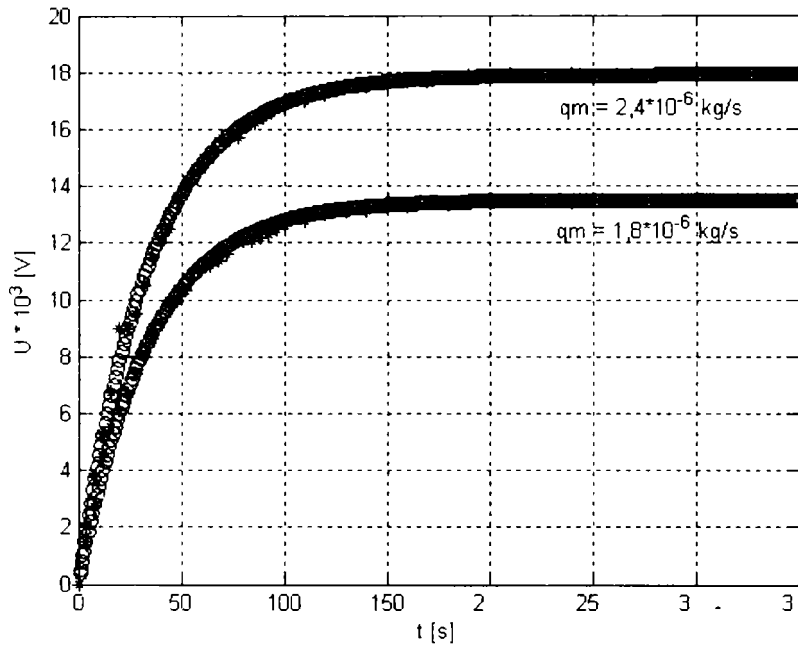


Figura II.75. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2 – caz 3

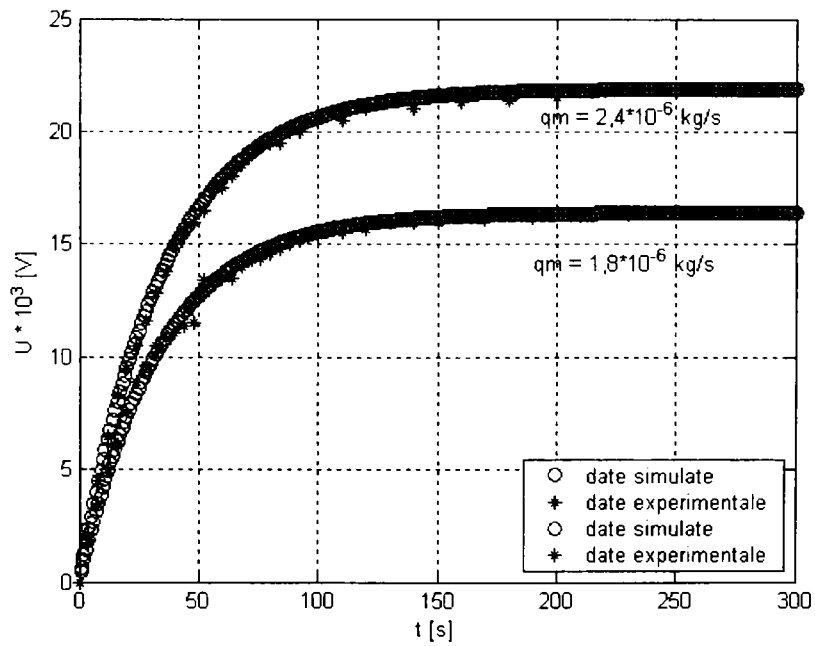


Figura II.76. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2 – caz 4

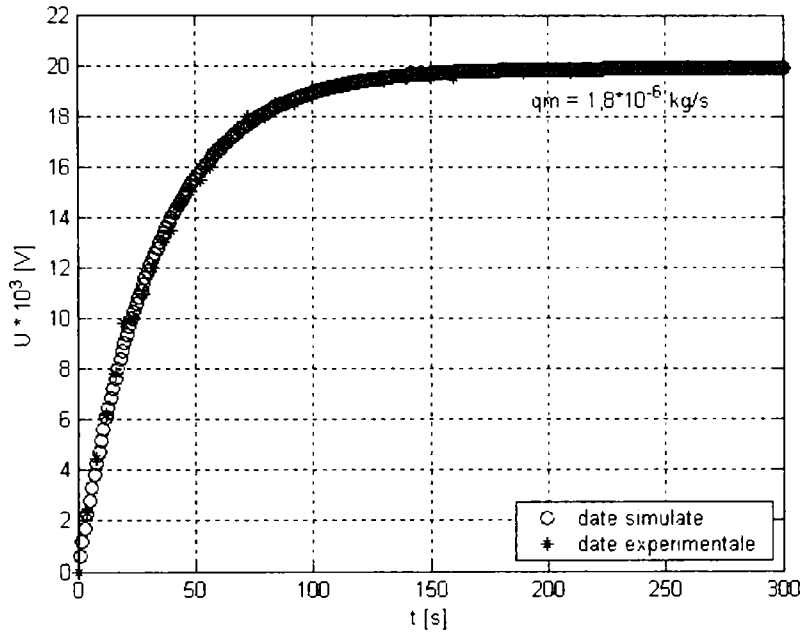


Figura II.77. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2 - caz 5

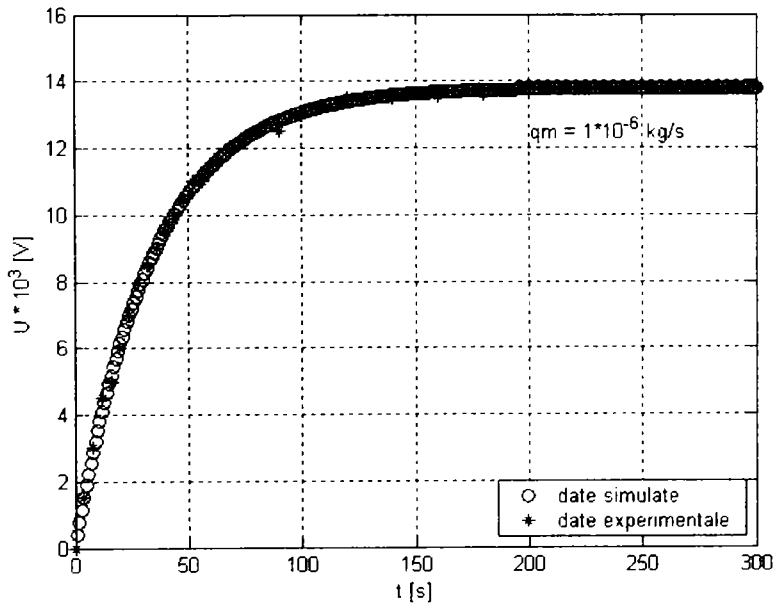


Figura II.78. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2 - caz 6

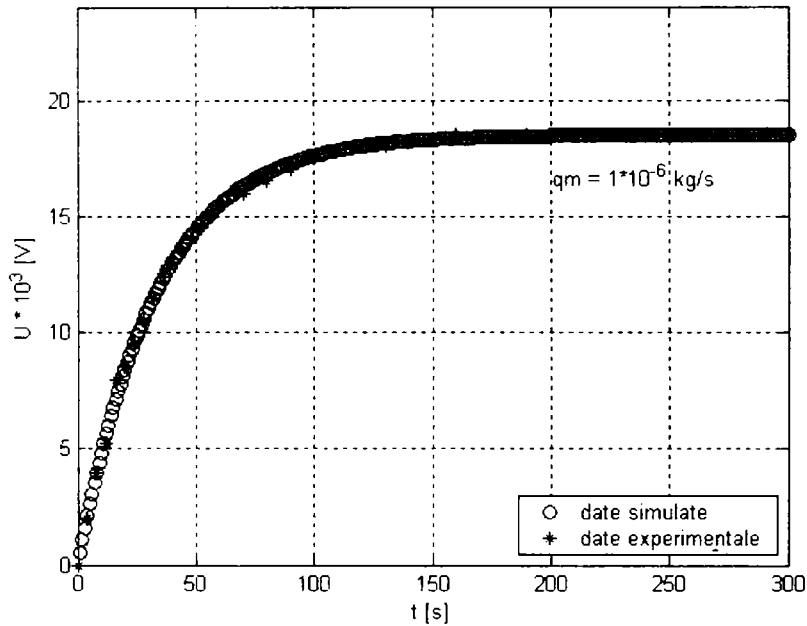


Figura II.79. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2 - caz 7

Tabel II.58. Indicatorii de adecvare pentru simulările comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 2

Caz	P [W]	Semnalul treaptă q_m [kg/s]	σ^2	σ	R	R^2
1.	0,69	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,10	0,316	0,991	0,865
2.	0,84	$1 \cdot 10^{-6}$	0,009	0,098	0,997	1
		$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,011	0,104	0,999	1
3.	1,00	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,034	0,184	0,998	1
		$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,057	0,238	0,998	1
4.	1,16	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,082	0,287	0,997	1
		$2,4 \cdot 10^{-6}$	0,073	0,270	0,998	1
5.	1,355	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,054	0,233	0,999	1
6.	1,55	$1 \cdot 10^{-6}$	0,020	0,143	0,999	1
7.	2,00	$1 \cdot 10^{-6}$	0,058	0,241	0,998	1

Dependențele obținute în urma simulării comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3 sunt prezentate în figurile II.80 – II.84, iar în tabelul II.59 sunt prezentați indicatorii de adecvare corespunzători situațiilor simulate.

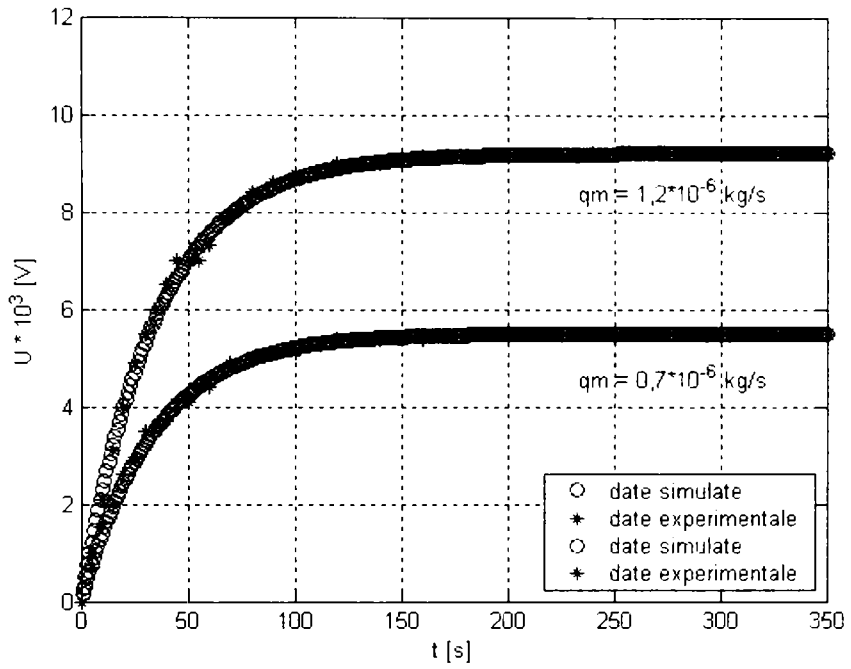


Figura II.80. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3 – caz 1

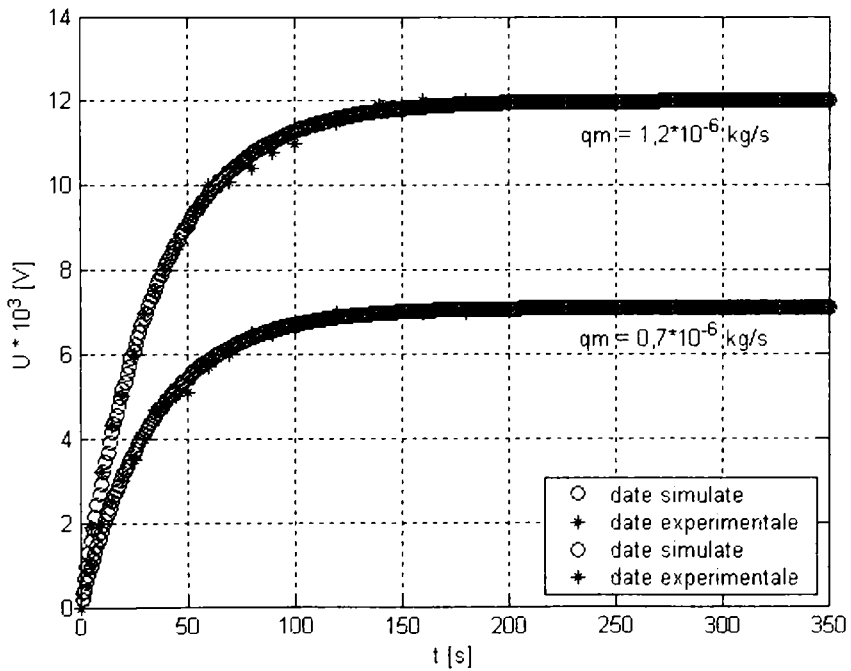


Figura II.81. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3 – caz 2

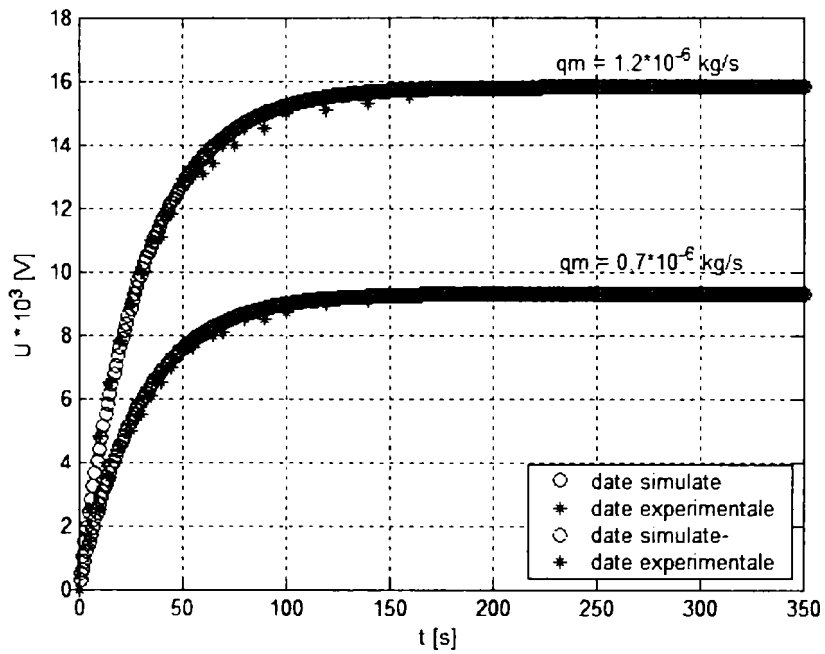


Figura II.82. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3 – caz 3

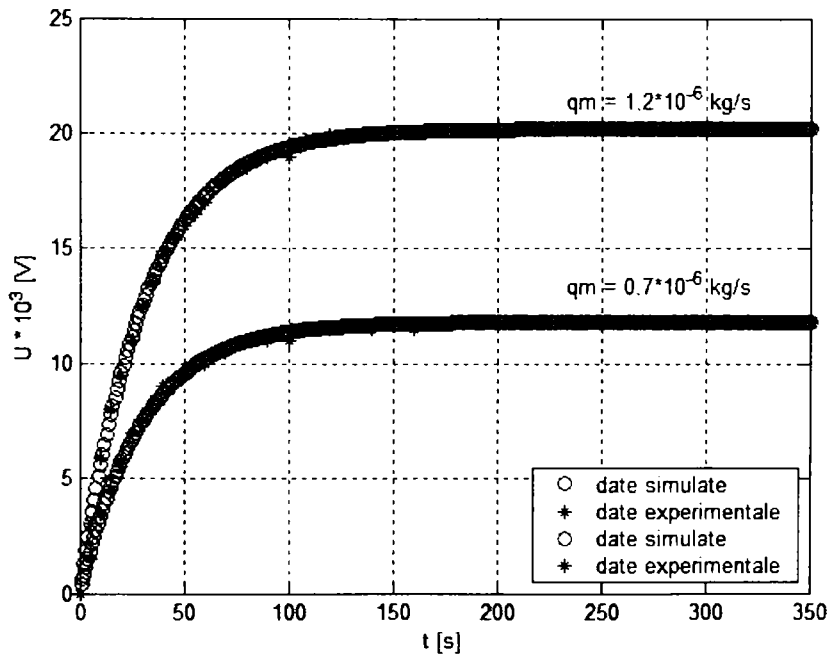


Figura II.83. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3 – caz 4

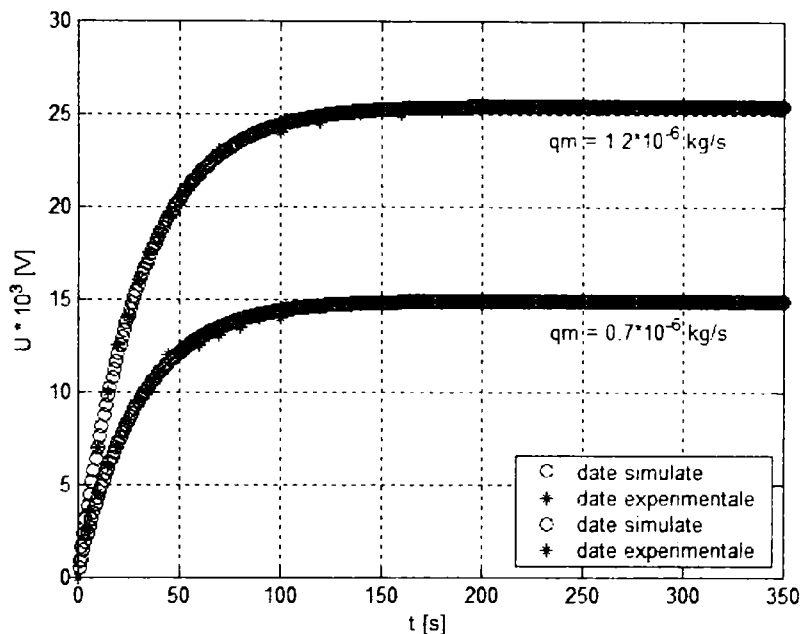


Figura II.84. Simularea comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3 – caz 5

Tabel II.59. Indicatorii de adecvănță pentru simulările comportării dinamice a microdebitmetrului electrotermic 3

Caz	P [W]	Semnalul treaptă q_m [kg/s]	σ^2	σ	R	R^2
1.	0,76	$0,7 \cdot 10^{-6}$	0,010	0,100	0,998	1
		$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,023	0,151	0,998	0,976
2.	0,92	$0,7 \cdot 10^{-6}$	0,016	0,128	0,998	1
		$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,028	0,167	0,998	1
3.	1,09 5	$0,7 \cdot 10^{-6}$	0,035	0,189	0,997	1
		$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,076	0,275	0,997	1
4.	1,28 5	$0,7 \cdot 10^{-6}$	0,033	0,182	0,998	1
		$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,028	0,166	0,999	1
5.	1,49 8	$0,7 \cdot 10^{-6}$	0,044	0,210	0,998	1
		$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,038	0,196	0,999	1

Analizând atât calitativ, cât și cantitativ, dependențele descrise de ecuația (II.24) se poate afirma că aceasta reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale. Se remarcă, și de această dată, valorile indicatorului preciziei R^2 , acesta având, cu excepția simulărilor corespunzătoare microdebitmetrului electrotermic 1, în majoritatea situațiilor valoarea maximă.

II.10. Aplicarea metodelor matematice de calcul pentru stabilirea incertitudinii rezultatului măsurării

Practica a arătat că măsurările, de orice natură ar fi acestea și oricât de corect s-ar efectua, sunt afectate în mod obligatoriu de erori, datorită variației în timp al parametrului de măsurat, imperfecțiunii organelor de simț ale omului, a aparatului și metodelor de măsurare, precum și a influențelor condițiilor exterioare. Astfel, toate erorile posibile ale unei măsurări, oricare ar fi sursele lor sau natura lor, definesc incertitudinea rezultatului măsurării. Aceasta este un concept probabilistic, fiind o apreciere a unor abateri cărora li se pot estima limitele, dar nu și semnul [138].

În cadrul acestui paragraf sunt prezentate valorile calculate ale unor indicatori statistici ce caracterizează incertitudinea rezultatului măsurărilor efectuate cu cele trei microdebitmetre electrotermice.

Având în vedere că obiectivul acestei lucrări a fost realizarea modelării matematice și simulării comportării la transfer a microdebitmetrelor electrotermice, determinările experimentale efectuate au vizat stabilirea dependențelor tensiunii de dezechilibru U a punții Wheatstone de diferite valori cunoscute ale debitului masic q_m și puterii de încălzire P . Astfel, aplicarea metodelor matematice în vederea calculului indicatorilor statistici s-a făcut pentru eșantioane ale mărimii măsurate, aceasta fiind tensiunea de dezechilibru U a punții Wheatstone.

S-a considerat câte un eșantion pentru fiecare din cazurile prezentate în tabelele II.6, II.16 și II.27, fiecare conținând câte un număr de 18 valori măsurate ale tensiunii de dezechilibru U în condiții identice de măsurare (aceiași debit masic q_m și aceeași putere de încălzire P).

În urma determinărilor experimentale s-a emis ipoteza că repartiția valorilor tensiunii de dezechilibru ce alcătuiesc un eșantion urmează legea repartiției normale – repartiția Gauss-Laplace.

În figura II.85 este prezentată tendința repartiției normale (clopotul lui Gauss).

O variabilă aleatoare U urmează legea de repartiție normală dacă are densitatea de forma [156, 138]:

$$f(U; \bar{U}, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (\text{II.34})$$

Repartiția admite ca parametrii valoarea medie \bar{U} , care determină localizarea acesteia pe axă, și eroarea standard σ , care determină forma curbei. Cu cât σ este mai mic, cu atât clopotul lui Gauss este mai ascuțit (concentrarea este mai mare).

Verificarea ipotezei normalității distribuției a fost făcută calitativ și a constat din următoarele verificări [156, 138]:

- se constată dacă repartiția are un singur maxim (u_{\max});
- se calculează valoarea mediei valorilor mărimii măsurate (\bar{U});
- se determină valoarea mediană (x_{me}), care este valoarea variabilei ce împarte aria de sub curba densității de repartiție în două părți egale;

- se calculează moda experimentală (x_{mo}), care reprezintă valoarea variabilei pentru care densitatea de repartiție are un maxim, deci valoarea variabilei cu cea mai mare probabilitate de apariție.

Dacă repartiția este normală trebuie ca valoarea medianei și a modei să nu difere semnificativ de valoarea mediei.

În cazul repartițiilor simetrice media, mediana și moda, coincid, aspect prezentat în figura II.85. La repartițiile asimetrice se pot întâlni cazurile când $media < mediana < moda$ și $moda < mediana < media$ (figura II.86) [138].

Valoarea medianei experimentale a fost calculată ordonând crescător șirul de valori U al fiecărui eșantion și aplicând formula corespunzătoare cazului când volumul eșantionului este un număr n par, în cazurile analizate fiind 18 [138]:

$$x_{me} = \frac{1}{2} (U_{n/2} + U_{(n/2+1)}) \tag{II.135}$$

Moda experimentală a fost calculată cu relația (II.136) [138].

$$x_{mo} = \bar{U} + 3 \cdot (x_{me} - \bar{U}) \tag{II.136}$$

În figura II.85, notațiile U_{inf} și U_{sup} reprezintă limita inferioară și limita superioară a intervalului ce delimitează câmpul de împrăștiere φ al valorilor U determinate experimental:

$$U_{inf} = \bar{U} - \frac{\varphi}{2} \tag{II.137}$$

$$U_{sup} = \bar{U} + \frac{\varphi}{2} \tag{II.138}$$

Acest interval reprezintă intervalul de incertitudine al rezultatului măsurării singulare și se determină pentru o anumită siguranță statistică, peste 99% din valorile mărimii măsurate experimental încadrându-se în acest interval [138, 141].

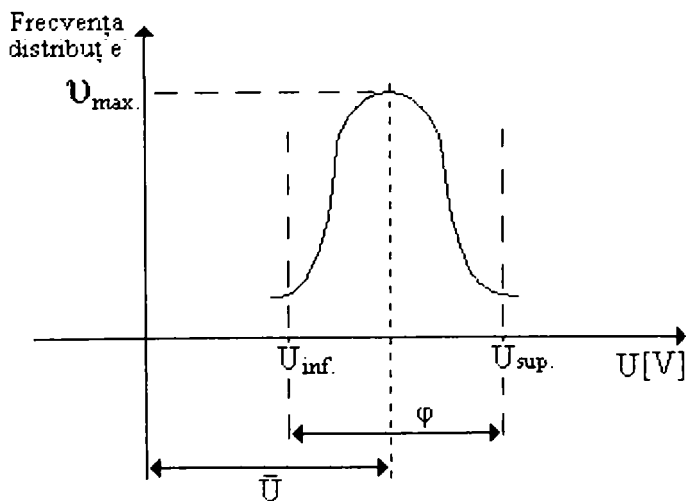


Figura II.85. Câmpul de împrăștiere al valorilor mărimii măsurate (repartiție simetrică)

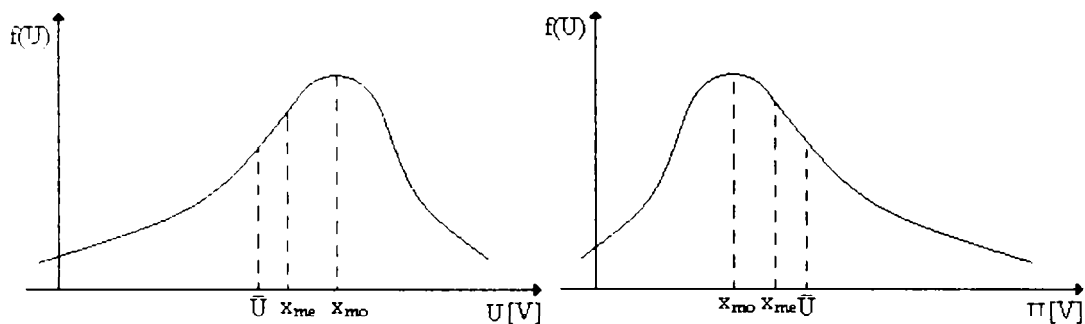


Figura II.86. Repartiții asimetrice

În tabelele II.60, II.61 și II.62 sunt prezentați, alături de condițiile de măsurare (valoarea debitului masic de gaz q_m și a puterii de încălzire P), indicatorii ce caracterizează incertitudinea rezultatului măsurării:

1. eroarea standard (σ);
2. eroarea probabilă (ϵ);
3. eroarea medie absolută (δ);
4. măsura preciziei (h);
5. dispersia erorilor (σ^2);
6. media aritmetică a valorilor mărimii măsurate (\bar{U});
7. câmpul de împrăștiere al valorilor determinate experimental (φ);
8. limitele câmpului de împrăștiere φ al valorilor U determinate experimental (U_{inf} și U_{sup});
9. mediana (x_{me});
10. moda (x_{mo});
11. eroarea relativă (Δ_{rel}).

Calculul indicatorilor 1 – 7 a fost efectuat conform celor prezentate în partea I a acestei lucrări (paragraful I.3.5.). De asemenea, a fost calculată și eroarea relativă Δ_{rel} , definită ca fiind raportul dintre eroarea standard și valoarea mărimii măsurate. Aceasta se exprimă în fracțiuni din valoarea mărimii măsurate sau în procente, spre deosebire de erorile absolute (eroarea standard, eroarea probabilă, eroarea medie) care se exprimă în aceleași unități de măsură ca și mărimea măsurată [160].

Conform figurilor II.85 și II.86, valorile parametrilor \bar{U} , U_{inf} , U_{sup} , x_{me} , x_{mo} și U_{max} , se constituie ca repere pentru descrierea calitativă a distribuției valorilor tensiunii de dezechilibru din fiecare eșantion.

Analizând informațiile obținute, și prezentate în tabelele II.60, II.61 și II.62, pentru cele trei microdebitmetre electrotermice se verifică ipoteza normalității distribuției valorilor tensiunii de dezechilibru U măsurate experimental, valoarea mediane x_{me} situându-se în toate cazurile între valorile mediei \bar{U} și valoarea modei x_{mo} , diferențele dintre acestea fiind mici. De asemenea se observă că valoarea mediane x_{me} coincide cu valoarea întâlnită cu frecvența cea mai mare U_{max} , care este și cea determinată în cadrul determinărilor experimentale ce au vizat elaborarea modelelor matematice ($U_{acceptat}$ – notația utilizată în tabele). Faptul că această valoare acceptată se situează între media aritmetică, care conform literaturii

de specialitate este valoarea cea mai apropiată de valoarea precisă, și valoarea model, care reprezintă valoarea cu cea mai mare probabilitate de apariție, se poate afirma că valorile lui U au fost obținute cu suficientă precizie.

Urmărind indicatorii statistici obținuți pentru cele trei debitmetre și efectuând o comparație între ei, se poate afirma că microdebitmetrul electrotermic 3 prezintă valorile cele mai satisfăcătoare. Dintre aceștia cel mai reprezentativ este σ , datorită faptului că valoarea acestuia intervine în calculul majorității indicatorilor statistici care definesc incertitudinea rezultatului măsurării. S-au obținut următoarele valori medii ale acestuia: 0,1453 pentru microdebitmetrul electrotermic 1; 0,0840 pentru microdebitmetrul electrotermic 2 și 0,0659 pentru microdebitmetrul electrotermic 3.

Totodată se constată că nu se evidențiază nici un fel de discrepante între valorile indicatorilor statistici calculați. Din acest motiv nu s-a considerat necesară mărirea numărului de eșantioane pentru analiză.

Tabel II.60. Indicatorii statistici – microdebitmetrul electrotermic 1

Nr. eșantion	1.	2.	3.	4.	5.
P [W]	0,85	1,26	1,495	1,71	2,3
$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	0,5	0,51	0,45	0,57	0,5
Nr. determinări	18	18	18	18	18
U_{max}	9	8	10	9	12
$U_{acceptat} \cdot 10^3$ [V]	4,5	7,4	7,9	11,8	15,5
$\bar{U} \cdot 10^3$ [V]	4,4667	7,3444	7,9333	11,7833	15,5389
$x_{me} \cdot 10^3$ [V]	4,5	7,4	7,9	11,8	15,5
$x_{mo} \cdot 10^3$ [V]	4,5666	7,5112	7,8334	11,8334	15,4222
$U_{inf} \cdot 10^3$ [V]	4,0065	6,9430	7,4398	11,4088	15,0887
$U_{sup} \cdot 10^3$ [V]	4,9268	7,7459	8,4268	12,1579	15,9891
$\phi \cdot 10^3$ [V]	0,9204	0,8029	0,9870	0,7491	0,9003
$\sigma \cdot 10^3$ [V]	0,1534	0,1338	0,1645	0,1249	0,1501
$\varepsilon \cdot 10^3$ [V]	0,1035	0,0903	0,1110	0,0842	0,1012
$\delta \cdot 10^3$ [V]	0,1224	0,1068	0,1313	0,0996	0,1197
Δ_{rel}	0,0341	0,0181	0,0207	0,0106	0,0097
σ^2	0,0235	0,0179	0,0271	0,0156	0,0225
h	4,6097	5,2839	4,2986	5,6635	4,7123

Tabel II.61. Indicatori statistici - microdebitmetrul electrotermic 2

Nr. eșantion	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
P [W]	0,69	0,84	1	1,16	1,355	1,55	1,77	2	2,12
$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	1,03	1,00	0,99	1,15	1,15	1,10	1,05	1,02	1,02
Nr. determinări	18	18	18	18	18	18	18	18	18
U_{max}	11	9	14	11	13	14	11	13	12
$U_{acceptat} \cdot 10^3$ [V]	4,8	6	7,5	10,3	12,9	14,8	16,5	19,1	20,6
$\bar{U} \cdot 10^3$ [V]	4,750	5,972	7,489	10,311	12,867	14,844	16,550	19,056	20,589
$x_{me} \cdot 10^3$ [V]	4,8	6	7,5	10,3	12,9	14,8	16,5	19,1	20,6
$x_{mo} \cdot 10^3$ [V]	4,9	6,056	7,522	10,278	12,967	14,711	16,4	19,189	20,622
$U_{inf} \cdot 10^3$ [V]	4,437	5,604	7,348	10,022	12,688	14,588	16,237	18,820	20,414
$U_{sup} \cdot 10^3$ [V]	5,063	6,340	7,630	10,600	13,045	15,101	16,863	19,291	20,764
$\Phi \cdot 10^3$ [V]	0,626	0,736	0,283	0,578	0,354	0,513	0,626	0,470	0,350
$\sigma \cdot 10^3$ [V]	0,104	0,123	0,047	0,096	0,059	0,086	0,104	0,078	0,058
$\epsilon \cdot 10^3$ [V]	0,070	0,083	0,032	0,065	0,040	0,058	0,070	0,053	0,039
$\delta \cdot 10^3$ [V]	0,083	0,098	0,038	0,077	0,047	0,068	0,083	0,063	0,047
Δ_{rel}	0,022	0,021	0,006	0,009	0,005	0,006	0,006	0,004	0,003
σ^2	0,011	0,015	0,002	0,009	0,004	0,007	0,011	0,006	0,003
h	6,778	5,761	14,999	7,340	11,902	8,265	6,778	9,021	12,129

Tabel II.62. Indicatori statistici - microdebitmetrul electrotermic 3

Nr. eșantion	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
P [W]	0,76	0,87	0,92	1	1,095	1,185	1,285	1,38	1,498	1,53
$q_m \cdot 10^6$ [kg/s]	1	1,1	1	0,85	0,95	1	1	0,92	1	1
Nr.determinări	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
U_{max}	10	14	15	14	14	16	14	13	13	12
$U_{acceptat} \cdot 10^3$ [V]	7,5	9,5	10	9,8	12,5	15	17	17,5	21,2	23,9
$\bar{U} \cdot 10^3$ [V]	7,472	9,522	10,006	9,844	12,528	15,017	16,961	17,539	21,233	23,883
$x_{me} \cdot 10^3$ [V]	7,5	9,5	10	9,8	12,5	15	17	17,5	21,2	23,9
$x_{mo} \cdot 10^3$ [V]	7,556	9,456	9,989	9,711	12,444	14,967	17,078	17,422	21,133	23,933
$U_{inf} \cdot 10^3$ [V]	7,247	9,394	9,881	9,568	12,355	14,862	16,668	17,330	21,055	23,671
$U_{sup} \cdot 10^3$ [V]	7,698	9,651	10,130	10,121	12,700	15,171	17,255	17,748	21,412	24,096
$\phi \cdot 10^3$ [V]	0,451	0,257	0,250	0,553	0,345	0,309	0,587	0,419	0,357	0,424
$\sigma \cdot 10^3$ [V]	0,075	0,043	0,042	0,092	0,058	0,051	0,098	0,070	0,059	0,071
$\varepsilon \cdot 10^3$ [V]	0,051	0,029	0,028	0,062	0,039	0,035	0,066	0,047	0,040	0,048
$\delta \cdot 10^3$ [V]	0,060	0,034	0,033	0,074	0,046	0,041	0,078	0,056	0,047	0,056
Δ_{rel}	0,010	0,005	0,004	0,009	0,005	0,003	0,006	0,004	0,003	0,003
σ^2	0,006	0,002	0,002	0,009	0,003	0,003	0,010	0,005	0,004	0,005
h	9,404	16,529	16,990	7,671	12,308	13,744	7,226	10,133	11,902	9,999

II.11. Considerații privind utilizarea microdebitmetrelor electrotermice ca traductoare sau ca parte componentă a unor analizoare

II.11.1. Utilizarea microdebitmetrelor electrotermice în sisteme de reglare automată a debitului

Stabilizarea debitelor prin reglare automată este o problemă frecvent pusă în ingineria chimică. Ea asigură un regim de funcționare uniform instalațiilor tehnologice, având ca efect menținerea la valori optime și a altor parametri tehnologici dependenți de debit.

Din punct de vedere al posibilităților de automatizare, reglarea debitului este o problemă relativ simplă deoarece elementul automatizat este de regulă de ordinul zero sau unu (porțiune de conductă).

În figura II.87 este propus un sistem de reglare automată cu ajutorul tehnicii numerice a debitelor mici de gaze, sistem ce înglobează microdebitmetrul electrotermic 3 (MDET).

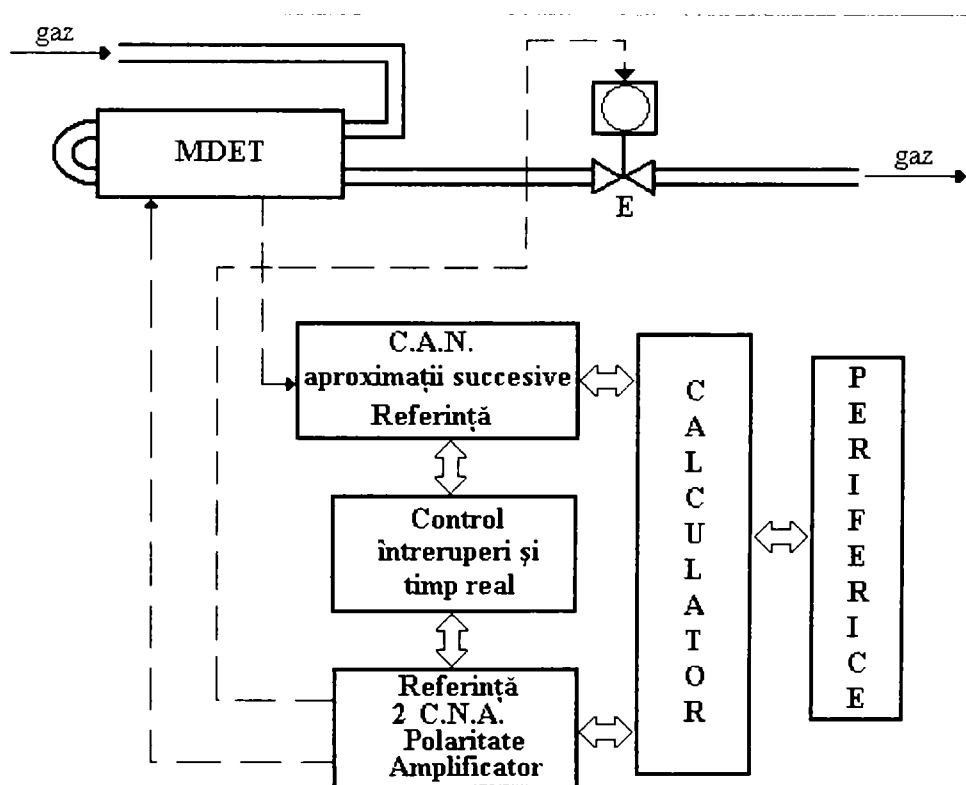


Figura II.87. Sistem de reglare automată a debitelor mici de gaze

Realizarea unui sistem de reglare automată cu ajutorul tehnicii numerice impune utilizarea unui regulator numeric sau a unui calculator prevăzut cu o

interfață de intrare care realizează conversia analog – numerică (CAN) și o interfață de ieșire care realizează conversia numeric – analogică (CNA). Performanțele sistemelor numerice actuale asigură mărirea vitezei de lucru și a capacităților de memorare a acestora, astfel încât acestea să opereze în timp real [2].

În cadrul sistemului de reglare automată prezentat în figura II.87, elementul automatizat este porțiunea de conductă cuprinsă între microdebitmetrul electrotermic MDET și elementul de execuție E.

Dispozitivul de automatizare este alcătuit din microdebitmetrul electrotermic, calculator și elementul de execuție.

Microdebitmetrul electrotermic se constituie ca parte esențială în cadrul acestui sistem datorită avantajelor pe care le oferă. Datorită construcției și modului de funcționare, acesta poate îndeplini pe lângă rolul de element sensibil și rolul de traductor de debit, mărimea de ieșire fiind un semnal electric, tensiunea de dezechilibru U a punții Wheatstone.

Tensiunea de dezechilibru U, conform principiului de funcționare al microdebitmetrului electrotermic, oferă direct informații privind valoarea debitului masic q_m al gazului care trece prin sistem, fiind proporțională cu acesta, nefiind necesară efectuarea altor calcule, ca de exemplu convertirea debitului volumic în debit masic.

Debitmetrul fiind prevăzut cu borne la care se poate măsura tensiunea de dezechilibru cu un instrument exterior, permite, utilizând o interfață corespunzătoare, preluarea datelor cu ajutorul calculatorului, care le stochează, prelucrează, iar apoi generează mărimea de comandă pe care o transmite secvențial la elementul de execuție. Calculatorul determină atât valorile mărimilor de referință cât și valorile comenzilor transmise elementului de execuție, utilizarea calculatorului în locul reguletoarelor fiind varianta cea mai complexă de automatizare [87].

De asemenea, în consens cu cele prezentate în paragraful II.8.2 și utilizând un soft corespunzător, se pot obține informații în timp real în ceea ce privește căldura specifică a gazului vehiculat sau compoziția cantitativă în cazul unui amestec de gaze.

Totodată, aducând modificările corespunzătoare în ceea ce privește montajul electric al microdebitmetrului electrotermic 3, tot cu ajutorul calculatorului se pot controla funcțiile unității de alimentare – indicare (alimentarea punții Wheatstone din traductorul debitmetric la o tensiune constantă; controlul curentului de alimentare al punții Wheatstone, implicit a puterii de încălzire P), aceasta putându-se constitui într-o nouă direcție de cercetare.

II.11.2. Utilizarea microdebitmetrelor electrotermice ca parte componentă a analizoarelor termovâscozimetrice și termodensimetrice

În industria chimică, pentru asigurarea unei desfășurări corecte a proceselor tehnologice este necesar să se controleze compoziția și calitatea materialelor inițiale, a semiproduselor și a produsului finit. În acest caz, principala metodă de control o constituie analiza chimică de laborator, care însă necesită mult timp și nu asigură conducerea operativă a proceselor tehnologice din industria chimică modernă. Continuitatea și viteza mare a proceselor tehnologice sunt incompatibile cu efectuarea relativ lentă a analizelor de laborator, întârzierea rezultatelor analizelor putând să ducă la dereglarea întregului proces de fabricație. Astfel, pentru comanda sigură și optimizarea proceselor de fabricație apare nevoia unui control

curent, cu ajutorul unor aparate automate cu acționare continuă, care permite să se obțină datele necesare cu o întârziere minimă [177, 178, 179].

Aparatura de măsurare destinată scopurilor amintite este cea cunoscută în general sub numele de analizoare, prin analizor înțelegându-se un aparat de măsură care indică conținutul calitativ sau cantitativ al produsului analizat, pe baza măsurării parametrilor ce caracterizează proprietățile fizice, chimice sau fizico-chimice ale acestuia [179].

Procedeele termovâscozimetrie și termodensimetrie se pot constitui ca fiind metode de analiză continuă bazate pe deosebirea componentelor amestecurilor de fluide în privința vâscozității dinamice, densității și a căldurii specifice molare [28, 180, 181].

Procedeele termovâscozimetrie se pot realiza în principiu cu ajutorul unui tub capilar în calitate de rezistență pneumatică laminară (R) și a unui debitmetru electrotermic (MDET), care sunt parcurși consecutiv de proba amestecului gazos supus analizei continue [28, 180]. Schema de principiu este prezentată în figura II.88.

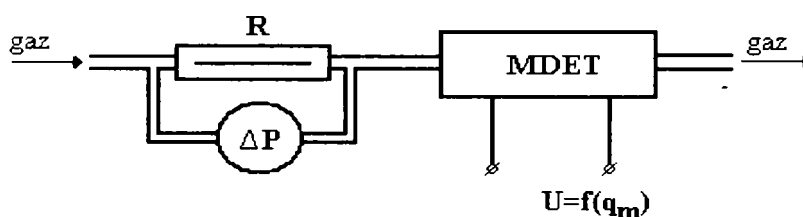


Figura II.88. Schema de principiu a procedurii termovâscozimetrie

Datorită performanțelor funcționale, microdebitmetrul electrotermic 3 poate îndeplini corespunzător rolul de parte componentă a analizorului termovâscozimetrie.

Efectuând raportul dintre relația (II.3), care descrie comportarea microdebitmetrelor electrotermice, și relația (II.5), ce caracterizează trecerea gazului printr-o rezistență pneumatică cu regim de curgere laminară, se poate simplifica termenul q_m , cele două elemente fiind legate în serie, și se obține:

$$\frac{U}{\Delta P} = \frac{B \cdot C_p}{R} \quad (\text{II.139})$$

în care:

- U – tensiunea de dezechilibru a microdebitmetrului electrotermic, [V];
- B – constantă ce depinde de parametrii constructivi și funcționali ai debitmetrului, [$V \cdot s \cdot ^\circ C \cdot J^{-1}$];
- C_p – căldura specifică a amestecului de gaze, [$J/kg \cdot \text{grd}$];
- ΔP – căderea de presiune pe rezistența pneumatică laminară, [N/m^2];
- R – valoarea rezistenței pneumatice laminare, [MPI].

Introducând în relația (II.139) expresia lui R , rezultată din legea Hagen-Poiseuille (relația (II.7)), se obține relația (II.140):

$$\frac{U}{\Delta P} = \frac{B \cdot C_p \cdot \pi \cdot d^4 \cdot P_m \cdot \mu}{128 \cdot \eta \cdot l \cdot R_g \cdot T} \quad (\text{II.140})$$

în care:

d – diametrul tubului capilar, [m];
 P_m – presiunea medie din tubul capilar, [N/m²];
 μ – masa moleculară medie a amestecului de gaze, [kg/kmol];
 η – vâscozitatea dinamică a amestecului de gaze, [N·s/m²];
 l – lungimea tubului capilar, [m];
 R_g – constanta generală a gazelor, [J/(kmol·grd)];
 T – temperatura de lucru, [K].

Separând mărimile constante din membrul drept al relației (II.140) aceasta devine:

$$\frac{U}{\Delta P} = \frac{B \cdot \pi \cdot d^4 \cdot P_m}{128 \cdot l \cdot R_g \cdot T} \cdot \frac{C_p \cdot \mu}{\eta} \quad (\text{II.141})$$

Produsul $C_p \cdot \mu$ constituie căldura molară medie a amestecului gazos și ca atare relația (II.141) poate fi scrisă sub forma [28]:

$$\frac{U}{\Delta P} = G \cdot \frac{C_p}{\eta} \quad (\text{II.142})$$

în care:

$$G = \frac{B \cdot \pi \cdot d^4 \cdot P_m}{128 \cdot l \cdot R_g \cdot T}$$

Se constată că raportul dintre tensiunea de ieșire U a microdebitmetrului electrotermic și căderea de presiune ΔP pe tubul capilar R este proporțional cu raportul dintre căldura molară medie și vâscozitatea dinamică a amestecului gazos, și implicit cu compoziția amestecului gazos. Modificarea acestui raport odată cu modificarea concentrației componentelor amestecului gazos stă la baza funcționării analizoarelor termovâscozimetrice [28].

Analizorul termovâscozimetric poate fi realizat în două variante funcționale:

- cu mărime de ieșire electrică;
- cu mărime de ieșire pneumatică.

Dacă se menține constantă prin reglare automată căderea de presiune ΔP pe tubul capilar R , relația (II.142) poate fi scrisă sub forma (II.143).

$$U = G' \cdot \frac{C_p}{\eta} \quad (\text{II.143})$$

în care:

$$G' = G \cdot \Delta P$$

Relația (II.143) redă dependența tensiunii de dezechilibru U a microdebitmetrului electrotermic de compoziția amestecului gazos la temperatură constantă și constituie expresia matematică ce caracterizează procedeul termovâscozimetric de analiză a gazelor în varianta de funcționare cu mărime de ieșire electrică [28].

În figura II.89 este prezentată schema de principiu a unui analizor continuu bazat pe procedeul termovâscozimetric cu mărime de ieșire electrică.

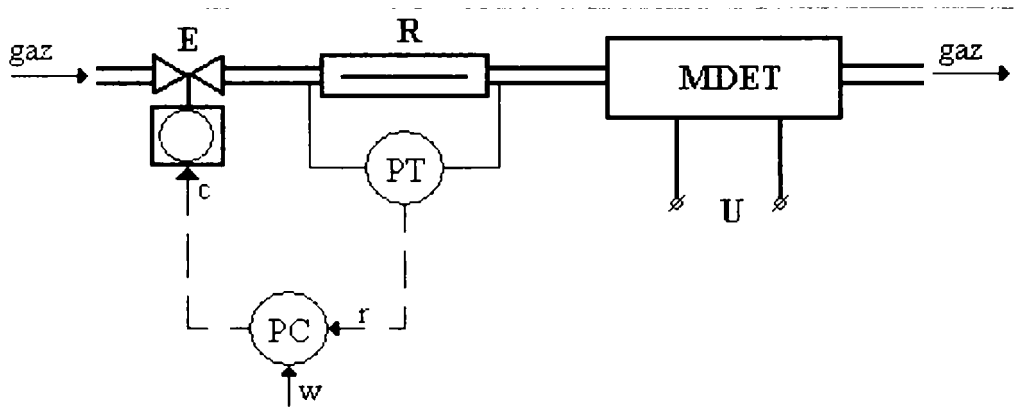


Figura II.89. Analizorul termovâscozimetric cu mărime de ieșire electrică

Căderea de presiune ΔP pe rezistența pneumatică laminară R se poate menține constantă cu ajutorul unui dispozitiv de automatizare alcătuit din traductorul de presiune diferențială PT , regulatorul PC și elementul de execuție E .

Traductorul PT convertește diferența de presiune de pe rezistența laminară R în semnal electric, acesta reprezentând mărimea de reacție r care este transmisă regulatorului PC . Regulatorul compară mărimea de reacție r cu mărimea de referință w de la elementul de prescriere și acționează asupra elementului de execuție E printr-un semnal electric, reprezentând mărimea de comandă c .

Dacă se menține constantă prin reglare automată tensiunea de dezechilibru U a microdebitmetrului electrotermic, relația (II.142) devine:

$$\Delta P = G'' \cdot \frac{\eta}{C_p} \quad (\text{II.144})$$

în care:

$$G'' = \frac{U}{G}$$

Relația (II.144) redă dependența căderii de presiune ΔP pe rezistența pneumatică R funcție de componența amestecului gazos și constituie expresia matematică a procedurii termovâscozimetric în varianta de funcționare cu mărime de ieșire pneumatică [28].

În figura II.90 este prezentată schema de principiu a unui analizor cu mărime de ieșire pneumatică.

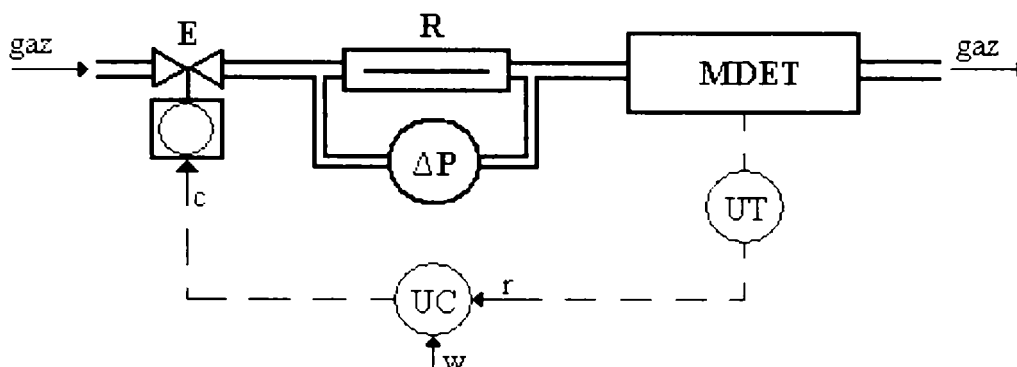


Figura II.90. Analizorul termovâscozimetrie cu mărime de ieșire pneumatică

În cadrul sistemului prezentat în figura II.90, menținerea constantă a tensiunii de dezechilibru U a microdebitmetrului electrotermic se realizează utilizând un dispozitiv de automatizare alcătuit din traductorul de tensiune UT , regulatorul de tensiune UC și elementul de execuție E .

Având în vedere că microdebitmetrul electrotermic poate funcționa la mai multe puteri de încălzire, menținerea constantă a tensiunii de dezechilibru U a punții Wheatstone ar putea fi realizată și prin modificarea puterii de încălzire [182]. În această situație nu este necesară modificarea debitului de gaz ce trece prin analizor, ceea ce ar putea afecta fluxul tehnologic dacă analizorul este montat direct în proces și debitul este un parametru ce trebuie menținut constant. Este suficientă cunoașterea debitului masic de gaz q_m și utilizând modelele matematice elaborate, ce descriu comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic, se poate determina valoarea puterii de încălzire P .

Realizarea analizorului termodensimetric presupune legarea în serie a unei rezistențe laminare turbulente cu un debitmetru termic, funcționarea, respectiv procedeul, bazându-se pe ecuațiile ce descriu funcționarea celor două elemente componente. Datorită performanțelor funcționale, microdebitmetrul electrotermic 3, poate îndeplini corespunzător rolul de parte componentă a analizorului termodensimetric. Și în această situație, semnalul de ieșire al analizorului poate fi fie căderea de presiune, fie tensiunea de dezechilibru U a microdebitmetrului electrotermic. Acest procedeu se bazează pe deosebirea componentelor amestecurilor de fluide în privința densității și a căldurii specifice molare a componentelor [178, 180, 181]. Elaborarea relațiilor de dependență ce descriu procedeul termodensimetric se constituie ca o nouă direcție de cercetare.

CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Concluzii generale

Studiile efectuate în cadrul lucrării au avut ca scop prezentarea literaturii de specialitate privind debitmetrele termice cât și aducerea unei contribuții personale în vederea posibilităților de îmbunătățire a performanțelor funcționale ale debitmetrelor termice destinate măsurării debitelor mici de gaze, denumite în această lucrare microdebitmetre electrotermice, utilizând modelarea matematică și simularea numerică, precum și prin analiza influenței parametrilor constructivi și funcționali.

Măsurarea debitelor de gaze reprezintă un domeniu de interes, aceasta ocupând un loc important în controlarea proceselor industriale, mai ales în ingineria chimică, caracterizată prin procese tehnologice din ce în ce mai complexe, care se disting prin rapiditatea desfășurării și printr-o înaltă sensibilitate la perturbarea regimului stabilit. Astfel, debitul, alături de presiune, temperatură și nivel, constituie un parametru care nu lipsește aproape din nici un sistem de automatizare a proceselor sau a instalațiilor de cercetare din domeniu.

De asemenea, în ingineria chimică sau în instalații de laborator sau cercetare, apar situații când nu se pot utiliza metodele de determinare directă a debitului, motiv pentru care se apelează la principii de măsurare indirectă a acestuia, astfel fiind necesară studierea și îmbunătățirea unor alte principii de măsurare a debitelor. Astfel, microdebitmetrele electrotermice, datorită caracteristicilor constructiv – funcționale, pot face față cu succes la măsurarea debitelor din instalațiile prin care sunt vehiculate cantități mici de gaze.

Studiul efectuat are un caracter ingineresc, interdisciplinar, și a făcut apel la mai multe domenii ale științei, cum ar fi: ingineria chimică, fizica, chimia-fizică, matematica, statistica, metrologia, informatica (Matlab, Statistica, Origin, Excel).

Îmbinând aceste aspecte interdisciplinare complexe, obiectivele propuse au fost în totalitate atinse și rezolvate, astfel:

- 1. Realizarea unei documentări bibliografice cu privire la conceptul de debitmetrie, identificarea locului ocupat de către debitmetrele termice în tehnica măsurării și clasificarea acestora. Prezentarea caracteristicilor constructive, a variantelor și schemelor de funcționare a unor debitmetre termice, precum și identificarea ecuațiilor ce caracterizează funcționarea acestora.**

Acest prim obiectiv s-a realizat prin studierea unui număr mare de referințe bibliografice, lucrări apărute în țară și străinătate, în lucrare fiind surprinse aspecte privind importanța debitmetriei în procesele industriale, definirea debitului de fluid și evidențierea factorilor de influență care condiționează valoarea acestuia, stabilirea criteriilor de clasificare a debitmetrelor pentru identificarea locului pe care îl ocupă debitmetrele termice între acestea, realizarea unei clasificări propriu zise a debitmetrelor, precum și evidențierea tipurilor de debitmetre termice. De asemenea,

sunt prezentate caracteristicile constructive generale ale debitmetrelor termice, domeniile de utilizare ale acestora, debitmetrele cu strat limită termic și debitmetrele calorimetrice, variantele și schemele de funcționare, precum și ecuațiile de bază ce caracterizează funcționarea debitmetrelor termice și relațiile ce definesc transferul de căldură în tuburile debitmetrice.

2. Documentare privind modelarea matematică și simularea numerică, ca modalități moderne de realizare a cunoașterii.

Acest aspect este legat de abordarea problematicii lucrării, și s-a concretizat prin prezentarea noțiunilor generale legate de modelarea matematică, simularea numerică și a interdependențelor existente între acestea. În lucrare au fost surprinse tendințele actuale în abordarea teoriei modelării, sunt definite conceptele de sistem, model și modelare, tratate prin prisma teoriei sistemelor, și sunt prezentate elementele caracteristice ale modelelor experimentale. A fost evidențiat rolul simulării în descrierea comportării sistemelor reale, simularea fiind înțeleasă ca o imitare a comportării sistemului real reprezentat prin modelul său.

3. Considerații asupra conceptului de măsurare și erorilor de măsurare.

În vederea surprinderii importanței pe care o are măsurarea în majoritatea activităților întreprinse de om, în lucrare sunt prezentate aspecte privind procesul de măsurare, caracteristicile mijloacelor de măsurare, clasificarea și definirea erorilor, precum și considerații privind estimarea valorii adevărate a unei mărimi măsurate.

4. Realizarea instalației experimentale și elaborarea modului de lucru pentru efectuarea determinărilor experimentale.

Pentru rezolvarea acestor prime obiective ale părții experimentale s-a apelat la baza materială a Laboratorului de Automatizarea Proceselor Chimice din Facultatea de Chimie Industrială și Ingineria Mediului – Universitatea „Politehnica” din Timișoara. Au fost realizate două instalații experimentale, suficient de precise pentru asigurarea vehiculării a diferite debite de gaz prin trei microdebitmetre electrotermice, proiectate și realizate ca modele de referință (prototipuri), denumite în lucrare „microdebitmetrul electrotermic 1”, „microdebitmetrul electrotermic 2” și „microdebitmetrul electrotermic 3”.

Primele două microdebitmetre electrotermice au fost înglobate într-o instalație simplă, fiind legate în serie cu o rezistență pneumatică laminară și un element de prescriere, determinările experimentale bazându-se pe măsurarea directă a tensiunii de dezechilibru a punții Wheatston a microdebitmetrelor electrotermice, aceasta fiind conform principului de funcționare o măsură a debitului masic de gaz ce trece prin traductorul debitmetric, și pe măsurarea indirectă a debitului de gaz cu ajutorul rezistenței pneumatice laminare.

Datorită faptului că valoarea rezistenței pneumatice laminare fiind un factor hotărâtor în stabilirea valorii debitului de gaz, a fost concepută o instalație experimentală utilizată la determinarea valorii rezistențelor pneumatice laminare, totodată elaborându-se și modul de lucru necesar efectuării cât mai precis posibil al acestei determinări.

În vederea efectuării determinărilor experimentale cu microdebitmetrul electrotermic 3 s-a realizat o instalație cu buclă de reglare automată a debitului de gaz, acestea bazându-se pe determinarea directă a tensiunii de dezechilibru a punții

Wheatstone și pe determinarea debitului de gaz ținând cont de proporționalitatea existentă între debitul volumic de lichid ce se scurge din vasul V și debitul volumic de gaz care se aspiră prin microdebitmetrul electrotermic 3, gazul luând locul lichidului scurs.

Elaborarea modului de lucru necesar exploatării instalațiilor experimentale a fost conceput în concordanță cu caracteristicile constructiv funcționale ale acestora, răspunzând cerințelor impuse pentru o corectă analiză a comportării la transfer a celor trei microdebitmetre electrotermice.

5. Obținerea, interpretarea, compararea rezultatelor experimentale și caracterizarea comportării la transfer a trei microdebitmetre electrotermice pentru gaze, diferite din punct de vedere constructiv.

Acest obiectiv a fost îndeplinit prin realizarea caracterizării statice și dinamice a funcționării celor trei microdebitmetre electrotermice, în diferite situații de funcționare (diferite puteri de încălzire). Cu ajutorul rezultatelor obținute în urma determinărilor efectuate, conform modului de lucru stabilit, au fost conturate corespunzător cadrele experimentale ce descriu comportarea la transfer a celor trei microdebitmetre electrotermice.

Au fost trasate caracteristicile statice, pentru identificarea dependenței dintre variabila de ieșire (tensiunea de dezechilibru a punții Wheatstone) și variabila de intrare (debitul masic de gaz), și, de asemenea, s-a realizat corelarea între valorile calculate pe baza rezultatelor experimentale a sensibilității aparatului și puterile de încălzire, obținându-se și relația matematică de dependență dintre acestea. Corelațiile descriu corespunzător această dependență, fapt indicat și de valorile coeficienților de corelație (0,99).

S-a observat că odată cu creșterea puterii de încălzire crește și tensiunea de dezechilibru a celor trei microdebitmetre electrotermice, deci sensibilitatea acestora. Pentru un anumit gaz, sau amestec de gaze, căldura specifică a acestuia fiind constantă, se poate afirma că, comportarea statică a celor trei microdebitmetre electrotermice poate fi redată de ecuația generală de funcționare a acestora, ecuația (II.4). Această ecuație ne arată că în regim staționar, pentru o anumită putere de încălzire disipată în rezistențele punții Wheatstone a debitmetrelor, ecuația dependenței dintre tensiunea de dezechilibru și debitul masic de gaz este, după cum s-a dedus și în urma analizei datelor experimentale, de forma ecuației (II.21).

Pentru verificarea concordanței dintre comportarea microdebitmetrului electrotermic 3 și comportarea descrisă în literatura de specialitate, s-a determinat experimental distribuția temperaturii de-a lungul tubului debitmetric atât în regim staționar cât și în regim dinamic, obținându-se dependențe conform principiului de funcționare al debitmetrelor termice: distribuție simetrică a temperaturii în cazul staționar, care în cazul regimului dinamic se deformează, maximul deplasându-se în direcția curgerii fluidului.

În urma caracterizării comportării dinamice se observă că variabila de ieșire în regim tranzitoriu evoluează în timp aperiodic, sistemul tinzând spre o valoare constantă (regim staționar).

Caracteristica de răspuns la semnal treaptă pentru cele trei microdebitmetre electrotermice, în cazul tuturor semnalelor treaptă aplicate, este o curbă exponențială, ceea ce corespunde elementelor proporționale de ordinul I, fiind descrisă de ecuația (II.24).

Atât constanta de timp, cât și coeficientul de transfer, depind de puterea de încălzire din rezistențele punții Wheatstone, astfel la creșterea puterii de încălzire se

observă o ușoară scădere a constantei de timp și o creștere apreciabilă a sensibilității microdebitmetrelor electrotermice. Acest lucru se explică prin existența unei influențe sesizabile pe care o are valoarea cantității de căldură din rezistența de încălzire asupra proceselor complexe de transfer de căldură din tubul debitmetric. Se poate afirma că atât valoarea constantei de timp, cât și a sensibilității, depind de construcția celor trei microdebitmetre electrotermice, în primul rând de caracteristicile și dimensiunile tubului debitmetric.

De asemenea, prelucrarea determinărilor experimentale efectuate au condus la concluzia că atât în privința comportării dinamice cât și a sensibilității mai ridicate, microdebitmetrul electrotermic 3 este superior celorlalte două microdebitmetre.

6. Prelucrarea matematică a rezultatelor experimentale în vederea elaborării modelelor matematice pentru aprecierea și predicția comportării celor trei microdebitmetre electrotermice în diferite condiții specifice. Validarea modelelor matematice prin calculul indicatorilor de adecvănță.

În urma identificării formei generale a modelului matematic ce descrie comportarea statică a celor trei microdebitmetre electrotermice (relația (II.21)) și a prelucrării matematice a rezultatelor experimentale, utilizând metoda celor mai mici pătrate, au fost determinate modelele matematice propriu zise pentru toate cazurile ce alcătuiesc cadrele experimentale conturate în prealabil.

În cadrul studiului, pentru o caracterizare mai exactă a comportării microdebitmetrelor electrotermice, s-a realizat și analizat și corelația multiplă între tensiunea de dezechilibru a punții Wheatstone ca variabilă dependentă, respectiv debitul masic de gaz care trece prin tubul debitmetric și puterea de încălzire, ultimele două fiind variabile independente.

Pentru descrierea cât mai exactă a dependenței tensiunii de dezechilibru de debitul masic de gaz și puterea de încălzire, s-a dorit obținerea unei expresii matematice cât mai simple care să permită exprimarea valorii variabilei de ieșire. Ținând cont de dependențele obținute la caracterizarea comportării statice, s-a propus corelația multiplă liniară (relația (II.25)). Ulterior, analizând dependențele obținute, s-a constatat că ecuația polinomială de ordinul doi (relația (II.26)) este cea potrivită pentru descrierea comportării celor trei microdebitmetre electrotermice, influența curentului de alimentare și implicit a puterii de încălzire, fiind hotărâtoare în acest sens.

Având în vedere că relațiile (II.21) și (II.26) sunt capabile să reproducă comportamentul la ieșire al sistemului real, prin prisma limitărilor impuse de cadrul experimental, pot fi considerate ca fiind forme generale ale modelelor concentrate ce descriu comportarea statică a microdebitmetrelor electrotermice. Pot exista mai multe modele concentrate valide, iar fiecare dintre aceste modele poate fi valid doar în cadrul experimental pentru care a fost determinat.

Pentru validarea modelelor matematice elaborate s-a recurs la calculul indicatorilor de adecvănță (dispersia de adecvănță, deviația standard, coeficientul de corelație și indicatorul preciziei modelului) și la realizarea corelației între valorile tensiunii de dezechilibru determinate experimental și valorile determinate pe baza corelației multiple liniare, respectiv a ecuației polinomiale de ordinul doi, pentru fiecare microdebitmetru electrotermic. Corelațiile evidențiază precizia modelelor matematice generate, prin dispunerea aproape simetrică pentru ecuația (II.25), respectiv simetrică, cum este de dorit, pentru ecuația (II.26), a rezultatelor

experimentale cu cele obținute pe baza modelelor matematice. Precizia modelelor matematice elaborate este confirmată și de indicatorii de adecvanță ai acestora.

7. Determinarea performanțelor de funcționare și studiul posibilității de îmbunătățire al acestora, prin identificarea influenței parametrilor constructivi și funcționali. Analiza de sensibilitate.

Ținând cont de faptul că microdebitmetrul electrotermic 3 este superior ca realizare celorlalte două microdebitmetre, au fost studiate performanțele acestuia în funcție de parametrii săi constructivi și funcționali cu scopul de a stabili relațiile cantitative pentru o exploatare optimală corespunzătoare.

Pentru îndeplinirea acestui obiectiv a fost necesară stabilirea ecuației particulare de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3 și calculul parametrilor constructivi ce intervin în această ecuație. Pornind de la ecuația generală ce descrie funcționarea debitmetrelor termice și identificând parametrii constructivi și funcționali ai microdebitmetrului electrotermic 3 și relațiile de dependență dintre aceștia, s-a ajuns la forma ecuației (II.62). S-a admis că această relație reprezintă modelul de bază ce constituie imaginea prin care poate fi perceput sistemul real, acesta fiind pe deplin valid deoarece reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului în toate cadrele experimentale, fapt certificat prin simularea numerică.

Concretizarea expresiei factorului de proporționalitate B prin relația (II.63) (parte componentă a relației (II.62)) este de o importanță practică deosebită identificând parametrii constructivi și funcționali de care depinde sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 și totodată redă cantitativ influența acestor parametrii asupra sensibilității. Ca atare, relațiile (II.62) și (II.63) stau la baza dimensionării și exploatării optime a microdebitmetrului electrotermic 3.

Spre deosebire de parametrii constructivi, care au valori bine definite și care rămân constante în timpul exploatării microdebitmetrului, parametrii funcționali se pot modifica. Astfel, s-a acordat o atenție deosebită următorilor parametrii funcționali: intensitatea curentului de alimentare, temperatura mediului ambiant, natura gazului vehiculat prin tubul microdebitmetrului și presiunea gazului, rezultând următoarele concluzii privind sensibilitatea debitmetrului:

- Sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 fiind proporțională cu puterea a treia a intensității curentului de alimentare a punții Wheatstone, conform relației (II.63), este indicat a se fixa curentul de alimentare la o valoare cât mai ridicată, adică a se lucra la puteri de încălzire mai ridicate, lucru evidențiat și prin caracteristicile statice determinate experimental.
- Din relația (II.63) rezultă că sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 este influențată și de temperatura mediului ambiant. Ca atare, în urma efectuării unor determinări experimentale în acest sens, se poate concluziona că în limita unor variații mici de temperatură ale mediului ambiant, sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic poate fi considerată constantă, nefiind necesară o termostatare a blocului metalic.
- Conform relației (II.62), sensibilitatea microdebitmetrului electrotermic 3 depinde direct proporțional de căldura specifică a gazului sau al amestecului de gaze al cărui debit se măsoară, fapt certificat de asemenea prin efectuarea de determinări experimentale în acest sens.
- Indicațiile debitmetrului fiind proporționale cu debitul masic al gazului, rezultă că fluctuațiile de presiune nu influențează indicația aparatului decât în măsura în care aceste fluctuații afectează căldura specifică, știind că,

căldura specifică a gazelor reale crește odată cu presiunea, efectul fiind cu atât mai pronunțat cu cât temperatura este mai scăzută, adică cu cât gazul este mai îndepărtat de condițiile ideale. Ca atare, influența variațiilor de presiune trebuie luată în considerare numai la măsurarea debitului unor gaze care la temperatura și presiunea de lucru sunt apropiate de starea de vapori saturați.

De asemenea, în urma analizei de sensibilitate au fost stabilite relațiile ce descriu influența curentului de alimentare, temperaturii mediului ambiant și a căldurii specifice a gazului, asupra tensiunii de dezechilibru a punții traductorului debitmetric (relațiile (II.109), (II.110) și (II.115)).

Având în vedere că indicațiile microdebitmetrului electrotermic 3 depind de natura gazului numai prin căldura specifică a acestuia, etalonarea debitmetrului este suficient să fie făcută numai pentru un singur gaz (în cazul de față s-a folosit aerul). Ca atare, pentru măsurarea debitelor altor gaze, a fost dedusă relația (II.113). Astfel, valoarea debitului unui alt gaz se poate obține înmulțind indicația debitmetrului, conform etalonării făcute pentru gazul de referință, cu raportul dintre căldura specifică a gazului măsurat și căldura specifică a gazului etalon și cu un coeficient fracționar în care intervine temperatura ambiantă efectivă de lucru și temperatura la care s-a efectuat etalonarea.

Analizând relația (II.113), s-a formulat relația (II.114), conform căreia există posibilitatea utilizării microdebitmetrului electrotermic 3 la determinarea căldurii specifice a gazelor sau a amestecurilor de gaze, performanță nespecificată în literatura de specialitate.

De asemenea, analizând comportarea statică a microdebitmetrului electrotermic 3 la măsurarea debitului masic de aer, dioxid de carbon, oxigen și azot s-a ajuns la concluzia că acesta ar putea fi utilizat și la determinarea cantitativă a compoziției amestecurilor de gaze, cu condiția să fie cunoscute în prealabil compoziția calitativă și dependențele ce descriu comportarea statică a aparatului în cazul vehiculării gazelor ce compun amestecul analizat.

În ceea ce privește performanțele de funcționare ale microdebitmetrului electrotermic 3, s-a încercat și reușit, și extinderea domeniului de măsurare cu ajutorul șunturilor pneumatice, precum și utilizarea microdebitmetrului la măsurarea sumei și diferenței a două debite mici de gaze, atât în cazul când cele două curenți de gaz sunt de aceeași natură, cât și în cazul în care cele două fluxuri de gaze vehiculate sunt de natură diferită.

În urma performanțelor obținute, analizate și prezentate se poate concluziona că obiectivul propus a fost îndeplinit, microdebitmetrul electrotermic 3 putând face față cu suficientă precizie la măsurarea debitelor de gaze.

8. Simularea comportării la transfer a celor trei microdebitmetre electrotermice. Validarea simulărilor.

Acest obiectiv a fost concretizat prin realizarea simulării comportării statice și dinamice a celor trei microdebitmetre electrotermice, cu mediul de programare Matlab 7.5.

În cazul microdebitmetrelor electrotermice 1 și 2, simularea comportării statice s-a realizat pe baza ecuației (II.4), ținându-se cont de informațiile furnizate de cadrele experimentale conturate în prealabil, iar simularea comportării statice a microdebitmetrului electrotermic 3 s-a realizat pe baza ecuației particulare de funcționare (relația (II.62)), rezultând următoarele concluzii:

- În cazul microdebitmetrului electrotermic 1, pentru o mai bună precizie a simulării s-a considerat, în urma unor simulări repetate, necesară ajustarea sensibilității K (variabilă componentă a relației (II.4)) printr-un factor de corecție determinat prin simulare în mediul de programare Matlab 7.5. Astfel, în urma calculului indicatorilor de adecvanță s-a obținut valoarea maximă a indicatorului preciziei pentru majoritatea cazurilor simulate. S-a obținut valoarea maximă și pentru simularea realizată la o putere mai mare decât puterile ce conturează cadrul experimental.
- Cu toate că în cazul microdebitmetrului electrotermic 2, simulările au fost efectuate pentru valori ce încalcă atât limita inferioară cât și cea superioară a cadrului experimental definit, în ceea ce privește valoarea puterii de încălzire, nu a fost necesară ajustarea valorii sensibilității K , constatându-se de asemenea că ecuația (II.4) reflectă tendința datelor experimentale, lucru evidențiat și de indicatorii de adecvanță.
- Analizând calitativ și cantitativ dependențele descrise de ecuația particulară de funcționare a microdebitmetrului electrotermic 3, se poate afirma că aceasta reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale, putând fi acceptată ca fiind modelul de bază ce constituie imaginea sistemului real. Se remarcă și în acest caz valorile indicatorului preciziei, acesta având în majoritatea situațiilor valoarea maximă. De asemenea, s-a constatat că predicțiile modelului de bază descriu corespunzător dependența dintre tensiunea de ieșire și debitul masic de gaz, și în cazul simulărilor efectuate pentru diferite gaze și temperaturi ale mediului ambiant.

Simularea comportării dinamice a celor trei microdebitmetre electrotermice a fost realizată pe baza ecuației (II.24). Analizând atât calitativ, cât și cantitativ, dependențele descrise de această relație, se poate afirma că reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale. Se remarcă, și de această dată, valorile indicatorului preciziei, acesta având, cu excepția simulărilor corespunzătoare microdebitmetrului electrotermic 1, în majoritatea situațiilor valoarea maximă.

9. Stabilirea incertitudinii rezultatului măsurării al celor trei microdebitmetre electrotermice, prin aplicarea metodelor matematice de calcul al erorilor de măsurare.

Având în vedere că obiectivul acestei lucrări a fost realizarea modelării matematice și simulării comportării microdebitmetrelor electrotermice, determinările experimentale efectuate au vizat stabilirea dependențelor tensiunii de dezechilibru a punții Wheatstone de diferite valori cunoscute ale debitului masic și puterii de încălzire. Astfel, aplicarea metodelor matematice în vederea calculului indicatorilor statistici s-a făcut pentru eșantioane ale mărimii măsurate, aceasta fiind tensiunea de dezechilibru a punții Wheatstone.

Analizând informațiile obținute pentru cele trei microdebitmetre electrotermice, se verifică ipoteza normalității distribuției valorilor tensiunii de dezechilibru măsurate experimental, valoarea medianei situându-se în toate cazurile între valorile mediei și valoarea modei, diferențele dintre acestea fiind mici. De asemenea se observă că valoarea medianei coincide cu valoarea întâlnită cu frecvența cea mai mare, care este și cea stabilită în cadrul determinărilor experimentale ce au vizat elaborarea modelelor matematice. Faptul că această valoare acceptată se situează între media aritmetică, care conform literaturii de

specialitate este valoarea cea mai apropiată de valoarea precisă, și valoarea modei, care reprezintă valoarea cu cea mai mare probabilitate de apariție, se poate afirma că valorile tensiunii de dezechilibru au fost obținute cu suficientă precizie.

Urmărind indicatorii statistici obținuți pentru cele trei debitmetre și efectuând o comparație între ei, se poate afirma că microdebitmetrul electrotermic 3 prezintă valorile cele mai satisfăcătoare. Totodată se constată că nu se evidențiază nici un fel de discrepanțe între valorile indicatorilor statistici calculați, evidențiindu-se prin aceasta justetea, fidelitatea și sensibilitatea.

10. Identificarea posibilităților de utilizare a microdebitmetrelor electrotermice în domeniul cercetării și ingineriei chimice.

Acest obiectiv a fost atins prin identificarea unor posibilități de utilizare a microdebitmetrelor electrotermice în cadrul sistemelor de reglare automată a debitului de gaz și ca parte componentă a analizoarelor termovâscozimetrice și termodensimetrice.

Utilizarea microdebitmetrelor electrotermice în cadrul sistemelor de reglare automată a debitului prezintă avantajul că pe lângă rolul de element sensibil pot îndeplini și rolul de traductor de debit, mărimea de ieșire fiind un semnal electric (tensiunea de dezechilibru a punții Wheatstone), aceasta permițând conectarea la regulatoarele numerice sau la calculatoarele de proces prin intermediul echipamentelor de interfață adecvate.

În cazul utilizării microdebitmetrului electrotermic 3 ca element sensibil și traductor, cu ajutorul unui soft corespunzător, se pot obține informații în timp real în ceea ce privește căldura specifică a gazului vehiculat sau compoziția cantitativă în cazul unui amestec de gaze.

Aducând modificările corespunzătoare în ceea ce privește montajul electric al microdebitmetrului electrotermic 3, tot cu ajutorul calculatorului se pot controla funcțiile unității de alimentare – indicare, aceasta putându-se constitui într-o nouă direcție de cercetare.

Utilizarea microdebitmetrelor electrotermice ca parte componentă a analizoarelor termovâscozimetrice și termodensimetrice se bazează pe deosebirea componentelor amestecurilor de fluide în privința vâscozității dinamice și a căldurii specifice molare, respectiv a densității și a căldurii specifice molare. Procedul termovâscozimetric se poate realiza în principiu cu ajutorul unui tub capilar în calitate de rezistență pneumatică laminară și a unui microdebitmetru electrotermic, care sunt parcurși consecutiv de proba amestecului gazos supus analizei continue. Astfel, au fost identificate două variante funcționale a analizoarelor termovâscozimetrice: cu mărime de ieșire electrică și cu mărime de ieșire pneumatică. Totodată, a fost identificată o posibilitate de îmbunătățire a variantei de funcționare cu mărime de ieșire pneumatică, remarcându-se în acest sens utilitatea modelelor matematice elaborate pentru microdebitmetrele electrotermice.

De asemenea, utilizarea microdebitmetrelor electrotermice ca parte componentă a analizorului termovâscozimetric a fost concretizată și prin redarea ecuațiilor ce caracterizează funcționarea acestuia. Elaborarea relațiilor de dependență ce descriu procedul termodensimetric se constituie ca o nouă direcție de cercetare.

Contribuții personale

Principalele contribuții aduse de prezenta lucrare prin studiul teoretic și experimental al comportării microdebitmetrelor electrotermice, sunt următoarele:

- Realizarea unei documentări bibliografice privind principiile de funcționare, variantele constructive de debitmetre termice și relațiile ce caracterizează transferul termic în traductoarele debitmetrice.
- Prezentarea într-un mod sistematic al conceptelor de modelare matematică și simulare numerică, privite ca modalități moderne de realizare a cunoașterii.
- Realizarea unor montaje experimentale de etalonare și testare a capacităților de funcționare a microdebitmetrelor electrotermice pentru gaze.
- Elaborarea modului de lucru, corespunzător exploatării instalațiilor experimentale realizate, necesar studiului comportării la transfer a trei microdebitmetre electrotermice, precum și pentru obținerea cadrului experimental ce descrie comportarea acestora în diferite condiții de funcționare.
- Stabilirea dependențelor existente între principalele variabile ce caracterizează comportarea a trei microdebitmetre electrotermice și definirea cadrelor experimentale, în vederea elaborării modelelor matematice.
- Elaborarea și validarea unor modele matematice experimentale ce descriu comportarea celor trei microdebitmetre electrotermice.
- Stabilirea ecuației particulare de funcționare a unui prototip de microdebitmetru electrotermic, denumit în lucrare „microdebitmetrul electrotermic 3”, precum și identificarea și calculul parametrilor constructivi și funcționali ce influențează sensibilitatea acestuia.
- Deducerea relațiilor de sensibilitate, pentru microdebitmetrul electrotermic 3, ce descriu influența curentului de alimentare, temperaturii mediului ambiant și a căldurii specifice a gazului, asupra tensiunii de dezechilibru a punții traductorului debitmetric.
- Deducerea relației pentru determinare căldurii specifice a gazelor sau a amestecurilor de gaze, performanță nespecificată în literatura de specialitate.
- Identificarea posibilității determinării cantitative a compoziției amestecurilor de gaze cu ajutorul microdebitmetrului electrotermic 3, performanță nespecificată în literatura de specialitate.

- Extinderea domeniului de măsurare a microdebitmetrului electrotermic 3 cu ajutorul șunturilor pneumatice. Materializarea expresiei rezistenței pneumatice laminare, pentru tuburi cu secțiune circulară în care gazul vehiculat este aerul, în ecuații ce descriu direct dependența valorii rezistenței pneumatice de lungimile și diametrele șunturilor pneumatice.
- Calculul indicatorilor statistici ce caracterizează incertitudinea rezultatului măsurării, pentru cele trei microdebitmetre electrotermice. Verificarea normalității distribuției mărimii măsurate.
- Identificarea unor posibilități de utilizare a microdebitmetrelor electrotermice în cadrul unor sisteme de reglare automată a debitelor îndeplinind pe lângă rolul de element sensibil și rolul de traductor de măsură, precum și utilizarea ca parte componentă a analizoarelor termovâscozimetrice și termodensimetrice.

BIBLIOGRAFIA

1. **Moldovan R. C.**, Şuta M., Marinescu S., Perju Delia – Mathematical Modelling of the Transfer Behaviour of the Thermal Boundary Layer Flowmeter Operating with Constant Heating Power; *Analele Universităţii Ovidius*, Vol. XVII, Seria Chimie, Ovidius University Press, Constanţa, 2006, p. 174-178.
2. Perju Delia, Şuta M., Rusnac Carmen, Brusturean Gabriela-Alina – Automatizarea proceselor chimice. Aplicaţii 1, Editura Politehnica, Timişoara, 2005.
3. **Moldovan R.C.**, Perju Delia, Glevitzky M., Marinescu S. – Mathematical Modelling of the Static Behaviour of the Thermal Boundary Layer Flowmeter Operating with Variable Thermal Flow; *Buletinul Universităţii Petrol-Gaze din Ploieşti*, Vol. LVIII, Seria Tehnică, Nr. 1, Editura Universităţii Petrol-Gaze Ploieşti, 2006, p. 75-78.
4. Pocinog G. – Modele şi metode de simulare; Editura Eurobit, Timişoara, 1998.
5. Savii G., Luchin M. – Modelare şi simulare; Editura Eurostampa, Timişoara, 2000.
6. Popescu P. P., Mihordea P. – Măsurarea debitului în tehnică, Editura Tehnică, Bucureşti, 1969.
7. Priestman H. Geoffrey, Boucher F. Robert – Smart Fluidic Meters for Simultaneous Measurement of Fluid Flowrate, Reynolds Number, Density and Viscosity, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 39, No. 4, p. 383-393, 2006.
8. Jinescu Gheorghita – Procese hidrodinamice şi utilaje specifice în industria chimică; Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1984.
9. Gheorghe G. – Măsurarea debitelor de fluide, Editura Tehnică, Bucureşti, 1978.
10. Moţit H.M., Ciocîrlea-Vasilescu A. – Debitmetrie Industrială, Editura Tehnică, Bucureşti, 1988.
11. Hongjian Zhang, Yongmei Huang, Zhiqiang Sun – A Study of Mass Flow Rate Measurement Based on the Vortex Shedding Principle, *Flow Measurement and Instrumentation*, 17, p. 29-38, Elsevier Ltd., 2006.
12. Friedmann M., Gills J., Liron N. – Laminar Flow in a Pipe at Low and Moderate Reynolds Numbers, *Appl. Sci. Res.*, 19, 1968.
13. Pode V. – Procese hidrodinamice, Editura Politehnica, Timişoara, 2001.
14. Ookawara S., Ogawa K., Dombrowski N., Amooie-Foumeny E., Riza A. – Unified Entry Length Correlation for Newtonian, Power Law and Bingham Fluids in Laminar Pipe Flow at Low Reynolds Number, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 33, No. 4, p.675-678, 2000.
15. Pode V. – Îndrumător de lucrări practice. Procese hidrodinamice, Editura Waldpress, Timişoara, 2004.
16. Dombrowski N., Foumeny E.A., Ookawara S., Riza A. – The Influence of Reynolds Number on the Entry Length and Pressure Drop for Laminar Pipe Flow, *Can. J. Chem. Eng.*, 71, 1993.

17. Tiron M. – Teoria erorilor de măsurare și metoda celor mai mici pătrate; Editura Tehnică, București, 1972.
18. Spitzer D.W. – Flow Measurement – Practical guides for Measurement and Control, Instrument Society of America, 1991.
19. Perju Delia, Todinca T. – Automatizarea proceselor chimice, Partea a II-a; Lito, Timișoara, 1995.
20. Jinescu Gheorghița, Balaban Cornelia – Operații și utilaje în industria chimică; Centrul de multiplicare I.P.B, București, 1981.
21. Vivarat-Perrin Marie-Pierre – Mesure de debit. Le debitmetre thermique, un faux vrai massique, Mesures 731 – Le magazine de l'instrumentation et des automatismes industriels, Paris, Janvier 2001.
22. Viswanathan M., Rajesh R., Kandaswamy A. – Design and Development of the Thermal Mass Flowmeters for High Pressure Applications, Flow Measurement and Instrumentation 13, p. 95-102, Elsevier Science Ltd., 2002.
23. Perju Delia, Șuta M. – Ways of Improving the Performance of Flow Measuring and Control Systems by Using a Heat Boundary Layer Flow Meter; Buletinul Universității "Petrol-Gaze" Ploiești, Vol. LII, Seria Tehnică, Nr. 1, p. 129-131, 2000.
24. Priestman H. Geoffrey, Boucher F. Robert – Smart Fluidic Meters for Simultaneous Measurement of Fluid Flowrate, Reynolds Number, Density and Viscosity, Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 39, No. 4, p. 383-393, 2006.
25. Rusnac L.M. – Analiza și sinteza proceselor chimice. Principii și metode; Editura Politehnica, Timișoara, 2004.
26. Perju Delia, Șuta M., Pîrlea Harieta, **Moldovan R.C.** – Possibilities for Constructing and Using an Electrothermal Gas Micro-Flowmeter with Digital Displaying; Fluid and Heat Engineering Volume, microCAD 2005 – International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 2005, p. 101-106.
27. Hemp J. – Weight Vector for Thermal Diffusion Flowmeters, Part 2: Application to a Particular Configuration, Flow Meas. Instrum., Vol. 6, No. 3, p. 149-156, Elsevier Science Ltd., 1995.
28. Perju Delia – Analiza automată continuă a amestecurilor de gaze bazată pe deosebirea componentelor în privința căldurii molare și a vâscozității dinamice – Teză de doctorat; Institutul Politehnic „Gh. Asachi”, Iași, 1977.
29. Perju Delia, Todinca T. – Automatizarea utilajului tehnologic în industria chimică; Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1986.
30. Perju Delia – Îmbunătățirea performanțelor sistemelor de măsurare a debitelor mici de lichide prin utilizarea procedurii cu strat limită termic și a tehnicilor analog-numerice; Grant de cercetare tip A, MEI, tema 31, cod CNCIS 850, Nr. contract 34977, 2001.
31. Minges R., Perju Delia, Deaky A., Aibolaru Ana – Măsurarea debitelor mici de lichide prin procedeul cu strat limită termic, Buletinul Științific și Tehnic al Institutului Politehnic Traian Vuia, Timișoara, Seria Chimie, Tom 19 (33), 1974.
32. Rawlins W., Radebaugh R., Timmerhaus K.D. – Thermal Anemometry for Mass Flow Measurement in Oscillating Cryogenic Gas Flows; Review of Scientific Instruments 64 (11), 1993.
33. Komiya K., Higuchi F., Ohtani K. – Characteristics of a Thermal Gas Flow Meter, Review of Scientific Instruments 59 (3), p. 477-479, 1988.

34. Schmid U. – Theoretical and experimental investigations of a novel hot-film anemometer for high-pressure automotive applications, *IEEE Sens. Journal*, 3, p. 229-240, 2003.
35. Mancier Valerie, Leclercq Didier – New Flowmetric Measurement Methods of Power Dissipated by an Ultrasonic Generator in a Aqueous Medium; *Ultrasonics Sonochemistry*, Elsevier Science Ltd., 2006.
36. Okabayashi M., Yamasaki H. – Feasibility Study of New Fluidic Gas Meters, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Fluid Control and Measurement*, p. 313-318, San Francisco, U.S.A., 1991.
37. Perju Delia, Todinca T., Dobroi Lucia – The Use of the Procedure with Thermal Limiting Layer for the Measurement of Small Inorganic and Organic Liquid Flows, *Buletinul Științific și Tehnic al Institutului Politehnic Traian Vuia, Timișoara, Seria Chimie*, Tom 27 (41), 1982
38. Isachenko V., Osipova V., Sukomel A. – Heat Transfer, MIR P. Moscow, 1969.
39. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. – Exerciții și probleme de procese și aparate din tehnologia chimică; Editura tehnică, București, 1981.
40. Pascu A. – Transfer termic în aparatele electronice; Editura Tehnică, București, 1995.
41. Korotkov P.A., Beliaev D.V., Azimov R.K. – Teplovîie rashodomerî; *Izd. Masinostroenie*; Leningrad, 1969.
42. Horvatin M. – *Archiv fur technisches Messen*, nr. 422, p. 37-40, 1971.
43. Șuta M., Perju Delia, **Moldovan R.C.**, Calisevici Mirela Nicoleta – Considerations Regarding the Improvement of the Heat Boundary Layer Flowmeter Performances; *Buletinul Științific al Universității Politehnica din Timișoara, Seria Chimie și Ingineria Mediului*, Vol. 50 (64), Nr. 1-2, 2005, p. 22-25.
44. Macri V., Dumitrașcu Gh., Domnișoru C., Panaite Carmen Ema – Transferul de căldură; *Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” Iași*, 1996.
45. Schlichting H. – *Boundary Layer Theory*, 7th Edition, McGraw Hill Book Co., New York, U.S.A., 1979.
46. Perju Delia, Șuta M., Rusnac Carmen – Echipamente de automatizare pneumatice de joasă presiune, Editura Politehnica, Timișoara, 2003.
47. Kaminoyama M., Watanabe M., Nishi K., Kamiwano M. – Numerical Simulation of Local Heat Transfer Coefficients in Stirred Vessel with Impeller for Highly Viscous Fluids, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 32, No. 1, p. 23-30, 1999.
48. Koski J.A., Gritz L.A., Kent L.A., Wix S.D. – Actively Cooled Calorimeter Measurements and Environment Characterisation in a Large Pool Fire; *Fire and Materials*, Vol. 20, No. 2, p. 69-78, 1998.
49. Alpert Seymour S., Bryant Pat D., Woodside William F. – A Linear Fick's Law Calorimeter; *American Journal of Physics*, Vol. 50, No. 10, p. 889-893, 1982.
50. Manosa L., Bon M., Calles C., Cirera A. – Low-cost Differential Scanning calorimeter; *American Journal of Physics*, Vol.64 (3), p. 283-287, 1996.
51. Brown A.F., Kronberger H. – A Sensitive Recording Calorimetric Mass Flowmeter, *I. Sci. Instrum.* 24, p. 151-155, 1947.
52. Widmer A.E., Fehlmann R., Rehwald W. – A Calibration System for Calorimetric Mass Flow Devices, *I. Phys. E., Sci. Instrum.*, 15, p. 213-220, 1982.

53. Donnelly P. Denis, Crean Kevin – Portable Digital Recording System for Low-complexity Environmental signals: Wind Velocity Measurements; *American Journal of Physics*, Vol. 52, No. 7, 1984.
54. Kolahi K., Gast T., Rock H. – Mass Flow Measurement of Gas Under Normal Conditions, *Flow Measurement and Instrumentation* 5 (4), p. 275-283, 1994.
55. Kramer M. Alex, Greiner Miles, Koski J.A., Lopez Carlos, Suo-Anttila Ahti – Measurements of Heat Transfer to a Massive Cylindrical Calorimeter Engulfed in a Circular Pool Fire; *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, p. 110-117, 2005.
56. Belicicov I.S., Korotkov P.A., Piatakov V.V. – Metodî i priborî dlia izmerenia rashoda i kolicestva jidcosti, gaza i para; *Mašinostroenie*, p. 63-66, 1973.
57. Suzuki Hiroshi, Yamada Sayaka, Usui Hiromoto – Numerical Computations on Heat Transfer Characteristics from the Cavity Bottom in Plates Swept by Viscoelastic Fluid, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 39, No. 9, p.915-923, 2006.
58. Gabor L., Gabor Doina – Transfer termic în ingineria chimică; Editura Politehnica, Timișoara, 2001.
59. Pittman J.F.T., Richardson J.F., Sharif A.O., Sherrard C.P. – Heat Transfer from Planar Surface to a Fluid in Laminar Flow. An Experimental and Computational Study, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37, 1994.
60. Horvatin M., *Archiv fur technisches Messen*, nr.421, p. 15-18, 1971.
61. Perju Delia, Șuta M., Todinca T., Rusnac Carmen – Echipamente de automatizare pneumatice de joasă presiune. Aplicații; Editura Politehnica, Timișoara, 2001.
62. Baker C. Roger, Gimson Chris – The effects of Manufacturing Methods on the Precision of Insertion and In-Line Thermal Mass Flowmeters, *Flow Measurement and Instrumentation* 12, p. 113-121, Elsevier Science Ltd., 2001.
63. Okabayashi M., Yamasaki H. – Feasibility Study of New Fluidic Gas Meters, *Proceedings of the 3rd International Symposium on Fluid Control and Measurement*, p. 313-318, San Francisco, U.S.A., 1991.
64. Gabor L. – Fenomene de transfer și utilaje în industria chimică. Procese termice; Imprimeria Mirton, Timișoara, 1994.
65. Cristea M., Agachi Ș. – Elemente de teoria sistemelor; Editura Risoprint, Cluj-Napoca, 2002.
66. Teodorescu D. – Ingeria Biosistemelor; Editura Facla, Timișoara, 1978.
67. Forrester J.W. – Principiile Sistemelor. Teorie și autoinstruire programată; Editura Tehnică, București, 1979.
68. Cristea V.M., Agachi Ș.P. – Computer Aided Chemical Engineering and Ecological Engineering; *International Care Innovation'98 Symposium*, Vienna, Nov. 16-19, 1998.
69. Eykhoff P. – Identificarea sistemelor; Editura Tehnică, București, 1977.
70. Eykhoff P – Trends and progress in System identification; Pergamon Press, Oxford-NY-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt, 1981.
71. Savii G.G. – Elemente de calculatoare și programare; Litografia Institutului Politehnic Traian Vuia, Timișoara, 1980.
72. McGraw-Hill Encyclopedia of Science and Tehnology, Vol. 9; 7th Edition, Mc.Graw-Hill Inc., New York, St. Louis, Toronto, 1992.

73. Ionescu V. – Teoria sistemelor; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985.
74. Ionescu V., Varga A. – Teoria sistemelor; Editura All, București, 1994.
75. Dragomir T.L., Preitl Șt. – Elemente de teoria sistemelor și reglaj automat, vol. I și II; Litografia Institutului Politehnic Traian Vuia, Timișoara, 1979.
76. Dragomir T.L. – Elemente de teoria sistemelor; Editura Politehnica, Timișoara, 2004.
77. Hângănuț M. – Noțiuni de teoria sistemelor; Atelierul de multiplicare al Institutului Politehnic, Cluj-Napoca, 1989.
78. Isoc D. – Analiza, modelarea și identificarea sistemelor; Editura Mediamira, 2001.
79. Popescu Dorina, Nanu S., Voloșencu Ctin., Peană L., Dan Ana-Maria, Dragomir T.L. – Teoria sistemelor. Aplicații 1; Editura Politehnica, Timișoara, 2005.
80. Marin C. – Teoria sistemelor; Editura Universitaria, Craiova, 2001.
81. Agachi Ș. – Automatizarea proceselor chimice; Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 1994.
82. Iordache O., Maria Gh., Corbu S. – Modelarea statistică și estimarea parametrilor proceselor chimice; Editura Academiei Române, București, 1991.
83. Căta Adina, Glevitzky M., **Moldovan R.C.**, Calisevici Mirela, Perju Delia – Optimisation of Heat Exchangers Ensemble Operation in Order to Improve the Technological Indicators; Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești, Volum LVIII, Seria Tehnică Nr. 1, Editura Universității Petrol-Gaze, Ploiești, 2006, p. 122-125.
84. Dumitrel D. – Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 2006.
85. Nichici A., Cicală E., Mee R. – Prelucrarea datelor experimentale. Curs și aplicații; Centrul de multiplicare, Timișoara, 1996.
86. Perju Delia, Todinca T. – Automatizarea proceselor chimice; Vol. 2, Centrul de multiplicare al UTT, Timișoara, 1995.
87. Perju Delia, Geantă M., Șuta M., Rusnac Carmen – Automatizarea proceselor chimice; Vol. 1, Editura Mirton, Timișoara, 1998.
88. Todinca T., Geantă M. – Modelarea și simularea proceselor chimice. Aplicații în Matlab; Editura Politehnica, Timișoara, 1999.
89. Perju Delia, Șuta M., Todinca T., Rusnac Carmen – Echipamente de automatizare pneumatice de joasă presiune. Aplicații, Editura Politehnica, Timișoara, 2001.
90. Roger G. Franks – Modelarea și simularea în ingineria chimică; Editura Tehnică, București, 1979.
91. Landau I.D. – System Identification and Control Design; Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
92. Landau I.D. – Identificarea și comanda sistemelor; Editura Tehnică, București, 1997.
93. Luchin M. – Considerații asupra semnificației și conținutului conceptelor de model și modelare; A XXVIII-a Sesiune de Comunicări științifice cu participare internațională, Academia Tehnică Militară, București, 1999.
94. Busenberg S., Forte B., Kuiken H.K. – Mathematical Modelling of Industrial Processes; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992.
95. Barbu Gh. – Modele de simulare cu aplicabilitate în fiabilitate; Editura Tehnică, București, 1992.

96. Curiac D., Filip I. – Teoria sistemelor și automatizări; Centrul de multiplicare al Universității Politehnica, Timișoara, 1995.
97. Leția T.S., Aștilean A.M. – Sisteme cu evenimente discrete: modelare, analiză, sinteză și control; Editura Albastră, Cluj-Napoca, 1998.
98. Tertîșco M., Stoica P. – Identificarea și estimarea parametrilor sistemelor; Editura Academiei RSR, București, 1980.
99. Muntean O., Woinaroschy A., Bogza G. – Aplicații la calculul reactoarelor chimice; Editura tehnică, București, 1984.
100. Bequette B.W. – Process Dynamics. Modeling. Analysis and Simulation; Prentice Hall PTR, New Jersey, 1998.
101. Bogza G., Muntean O. – Reactoare chimice; Vol.1, Editura Tehnică, București, 2000.
102. Brusturean Gabriela-Alina, Perju Delia, Carre J., Dumitrel D., Chem.Bull."Politehnica"Univ. Timișoara, 49(63), p.144, 2004.
103. Perju Delia, Dalea Viorica, Șuta M., Rusnac Carmen – Main Aspects Concerning Teaching of Environmental and Chemical Process Modeling at the Faculty of Industrial Chemistry and Environmental Engineering from the Politehnica University of Timișoara; Chem. Bull. Politehnica Univ., Vol. 45 (59), Nr. 1, p. 147-150, 2000.
104. Perju Delia, Dalea Viorica, Șuta M., Rusnac Carmen – Chemical Processes Control and Optimization – Significant Aspects in Chemical Environmental Engineers Education; Chem. Bull. Politehnica Univ., Vol. 45 (59), Nr. 1, p. 143-146, 2000.
105. Todinca T., Perju Delia, Șuta M. – Optimizări în industria chimică; Vol. 1, Centrul de multiplicare al Universității Tehnice Timișoara, 1993.
106. Marinoiu V., Paraschiv N. – Automatizarea proceselor chimice; Editura Tehnică, București, 1992.
107. Luchin M. – Clasificarea și descrierea modelelor; A XXVIII-a Sesiune de comunicări științifice cu participare internațională, Academia Tehnică Militară, București, 1999.
108. Imre Lucaci Arpad, Agachi Paul Șerban – Optimizarea proceselor din industria chimică, Editura Tehnică, București, 2002.
109. Ungureanu Șt. – Conducerea automată a proceselor. Teorie și aplicații în ingineria chimică; Volumul I, Editura Matrix Rom, București, 2005.
110. Jensen V.G., Jeffreys G.V. – Mathematical Methods in Chemical Engineering; Academic Press Inc., London, 1977.
111. Brusturean Gabriela-Alina, Perju Delia, Carre J., Silaghi-Perju Dana, Dumitrel D. – Revista de Chimie, 57(3), p. 312, 2006.
112. Perju Delia, Șuta M., Dumitrel D., Tănăsie C. – Proceedings of the 4th International Conference of PHD Students. University of Miskolc, Engineering Sciences 1, p. 359, 2003.
113. Perju Delia, Șuta M., Căta Adina, Brusturean Gabriela-Alina – Proceedings of the 4th International Conference of PHD Students. University of Miskolc, p. 413, 2003.
114. Perju Delia, Șuta M., Rusnac Carmen, Brusturean Gabriela-Alina – Revista de Chimie, 54(3), p. 250, 2003.
115. Mihoc Gh., Urseanu V., Ursianu Emiliana – Modele de analiză statistică; Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1982.
116. Mihail R. – Introducere în strategia experimentării, cu aplicații din tehnologia chimică; Editura Științifică și Pedagogică, București, 1976.

117. Glüch A. – Metode matematice în industria chimică; Editura Tehnică, București, 1971.
118. Resa I.D., Petrescu Șt., Precupaș M., Căra Al. – Probleme de statistică rezolvate pe calculator; Editura Facla, Timișoara, 1984.
119. Popescu I.A., Rădulescu D. – Modelarea sistemelor de producție, Editura Tehnică, București, 1986.
120. Panait T. – Teoria modelării proceselor termoenergetice, Editura Evrika, Brăila, 1996.
121. Tănăsescu Nasta – Modelarea matematică și simularea numerică a proceselor tehnologice din industria alimentară, Editura Matrix Rom, București, 2000.
122. Titu M., Oprean C., Cicală E. – Statistica tehnică și controlul statistic; Universitatea Lucian Blaga, Sibiu, 2001.
123. Zadeh L.A., Desoer C.A. – Linear system theory; McGraw-Hill, New York; San Francisco; Toronto, 1963.
124. Smigelski O. – Ingineria sistemelor și optimizarea proceselor chimice; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1984.
125. Ionescu V. – Teoria sistemelor; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985.
126. Bucur C.M., Popeea C.A., Simion Gh. – Matematici. speciale. Calcul numeric; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
127. Teodorescu N., Olaru V. – Ecuații diferențiale și cu derivate parțiale; Editura Tehnică, București, 1980.
128. Jora B., Popeea C., Barbulea S. – Metode de calcul numeric în automatică – Sisteme liniare; Editura Enciclopedică; București, 1996.
129. Iliescu S.S. – Contribuții privind aplicațiile informatice; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1993.
130. Iorga V., Jora B., Nicolescu C., Lopătaru I., Fătu I. – Programare numerică; Editura Teora, București, 1996.
131. Gorunescu F., Prodan A. – Modelare stochastică și simulare; Editura Albastră, Cluj-Napoca, 2001.
132. Kennedy H.P., Gentle J.E. – Statistical Computing; Marcel Dekker Inc., New York&Basel, 1980.
133. Marinoiu V., Strățulă C., Petcu A., Pătrășcioiu C., Marinescu C. – Metode numerice aplicate în ingineria chimică; Editura Tehnică, București, 1986.
134. Kilyeni S. – Metode numerice. Algoritme. Programe de calcul. Aplicații în energetică; Ed. Orizonturi Universitare, ediția a 3-a, Timișoara, 2004.
135. Borse G.J. – Numerical Methods with MATLAB; PWS Publishing Company, Boston, 1997.
136. Pătrășcioiu C. – Metode numerice aplicate în ingineria chimică; Editura Matrix Rom, București, 2004.
137. Anthony J. Wheeler, Ahmad R. Ganji – Introduction to Engineering Experimentation; Prentice Hall, New Jersey, 1996.
138. Davidescu Arjana – Metrologie generală; Editura Politehnica, Timișoara, 2001.
139. Aloman A. – Statistică și probabilitate în experimentul științific; Editura Matrix Rom, București, 1998.
140. **Moldovan R. C.**, Perju Delia, Șuta M., Calisevici Mirela, Marinescu S. – Modelling and Simulation of the Electrothermal Gas Micro-Flowmeter Static Behaviour; Buletinul Științific al Universității Politehnica din

- Timișoara, Seria Chimie și Ingineria Mediului, Vol. 52 (66), Nr. 1, Editura Politehnică, Timișoara, 2007, p. 21-26.
141. Neagu C., Ioniță C. – Rețele neuronale. Teorie și aplicații în modelarea și simularea proceselor și sistemelor de producție; Editura Matrix Rom, București, 2004.
 142. Rațiu Suciuc C. – Modelarea și simularea proceselor economice; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1995.
 143. Dulău M., Oltean S. – Modelare și simulare. Lucrări de laborator; Universitatea "Petru Maior", Târgu Mureș, 2003.
 144. Luyben W.L. – Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers; McGraw Hill Book Company, U.S.A, 1973.
 145. Bennett B.S. – Simulation Fundamentals; Prentice Hall, London, Munich, 1995.
 146. Dima N. – Teoria erorilor și metoda celor mai mici pătrate; Universitatea Tehnică Petroșani, 1992.
 147. Puri G. – Metrologie generală, Institutul Politehnic Traian Vuia, Timișoara, 1983.
 148. Botez M. – Teoria erorilor și metoda celor mai mici pătrate; Editura de Stat Didactică și Pedagogică, 1961.
 149. Ciocârdia C., Ungureanu I. – Bazele cercetării experimentale în tehnologia construcțiilor de mașini; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
 150. Pârvulescu Luminița – Estimarea calității sucurilor de fructe cu ajutorul analizatoarelor automate; Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2003.
 151. Perju Delia, Todinca T. – Automatizarea utilajului tehnologic în industria chimică; Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1986.
 152. Perju Delia – Analizoare automate de gaze – Referat documentar; IPT; Timișoara, 1974.
 153. Crișan S., Ignea A. – Măsurări și traductoare; Vol 1, Lito UTT, Timișoara, 1993.
 154. Savu T. – Sisteme computerizate pentru achiziția de date. Îndrumar de laborator; 1999.
 155. Șuta M. – Sisteme analog numerice utilizate la măsurarea PH-ului; Editura Politehnică, Timișoara, 2001.
 156. Puri G., Pugna A. – Metrologie generală; Centrul de multiplicare al Institutului Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1990.
 157. Ceaușescu D., Chiriac A. – Intervale de încredere. Precizia măsurătorilor; Editura Mirton, Timișoara, 2002.
 158. Dumitrescu S., Tertîșco M., Marinoiu V., Sprînceană N., Popescu D., Popeea C., Cîrtoaje V., Paraschiv N., Epure M. – Aparate de măsurat și automatizări în petrol și petrochimie; Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
 159. Puri G., Pugna A. – Metrologie; Centrul de multiplicare al Institutului Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1989.
 160. Plăcișteanu I. – Teoria erorilor de măsurare și metoda celor mai mici pătrate; Editura Tehnică, București, 1957.
 161. *** Manualul inginerului chimist; Vol. 1, Editura Tehnică, București, 1972.
 162. Lascu Mihaela – Metode analogice și numerice de măsurare a mărimilor electrice; Editura Politehnică, Timișoara, 2000.
 163. Perju Delia, Klepp F., Geantă M., Cofan N. – The measurement of the parameters in research, pile and low tonnage instalation from chemical

- industry with pneumatical element of low pressure. III. The measurement of the small flows of gas and liquids; Chemical Bulletin of Technical University Timișoara, Vol. 37 (51), p. 65-70, 1992.
164. Perju Delia – Automatizarea instalațiilor de laborator și de cercetare din chimie și ingineria chimică cu echipamente pneumatice de joasă presiune; Contract 26681/2000, colaborator R.A. Aquatim Timișoara, beneficiar M.E.C., 2000.
165. Perju Delia – Low pressure pneumatic equipment. Achievements and perspectives; Chemical Bulletin of Technical University Timișoara, Vol. 40 (54), p. 1-10, 1995.
166. Perju Delia, Șuta M., Silaghi-Perju Dana – Posibilități de îmbunătățire a performanțelor SRA a debitelor mici de fluide cu ajutorul elementelor de execuție pneumatice de joasă presiune; Revista de Chimie, Vol. 51 (12), p.919-923, 2000.
167. Minges R., Perju Delia, Deaky A. – Zur Temperaturmessung mit pneumatischen Laminarwiderstanden; Messen Steuern, Regeln. RDG, 12 (7), p.268-271, 1969.
168. Barna R., Perju Delia, Deaky A. – Stand de testare și etalonare a rezistențelor pneumatice laminare; Sesiunea Științifică „Tehnic 2000” Electrotimiș, Timișoara, Vol. I, p.309-314, 1988.
169. Perju Delia, Șuta M., Rusnac Carmen, Brusturean Alina – Revista de Chimie, vol. 54 (3), Nr. 3, 2003, p. 250-255.
170. Ianculescu Gh. – Analizoare de gaze și lichide; Editura Tehnică, București, 1969.
171. Calisevici Mirela, **Moldovan R.C.**, Glevitzky M., Perju Delia – Mathematical Modelling of the Static Behaviour of a Heat Exchanger Pipe-in-Pipe Type Ensemble; Fluid and Heat Engineering Volume, microCAD-2007 International Scientific Conference, March 22-23, 2007, Miskolc, Hungary, p. 29-34.
172. Lungu A. – Modelări numerice în hidrodinamică; Editura tehnică, București, 2000.
173. Ghinea M., Fireșteanu V.– Matlab. Calcul numeric. Grafică. Aplicații; Editura Teora, București, 2001.
174. Constantin Gh., Negrea R. – Lecții de statistică descriptivă; Universitatea de Vest Timișoara, 2004.
175. Ungureanu Șt. – Sensibilitatea sistemelor dinamice; Editura Tehnică, București, 1988.
176. *** Debitmetre masse U70; Material documentar al firmei Setaram; Franța, 1980.
177. Tănăsie C., Todinca T., Căta Adina, Gabor Lazăr, **Moldovan R.** – Intensificarea absorbției dioxidului de carbon în soluții de carbonat de potasiu prin utilizarea promotorilor reacției chimice în faza lichidă. II. Absorbție cu reacție chimică: efectul promotorilor; Revista de Chimie, București, Volum 58, Nr. 12, 2007, p. 1274-1277.
178. Calisevici Mirela, Perju Delia, **Moldovan R.C.**, Marinescu S. – Procedeu termodensimetric pentru măsurarea concentrațiilor amestecurilor de lichide. Principii și baze teoretice pentru analizorul în varianta cu mărime de ieșire pneumatică; Acceptată pentru publicare în Buletinul A.G.I.R., Editura A.G.I.R., București, 2007.
179. Heghedus-Mindru G., Biron Ramona Cristina, Perju Delia Maria, Rusnac L.M., Ravis A., **Moldovan R.C.** – Determinarea concentrației anionilor la

- apele minerale din zona de vest, centru si nord a Romaniei, cu ajutorul cromatografiei ionice de inalta performanta (HPIC) – Revista de Chimie, București. – Trimisă pentru publicare.
180. Calisevici Mirela, Perju Delia, Brusturean Gabriela Alina, **Moldovan R.C.**, Marinescu S. – Thermodesimetric Procedure for Liquid Mixtures Concentrations Measurements I. Principles; Fluid and Heat Engineering Volume, microCAD 2008 – International Scientific Conference, Miskolc, Ed. ME Sokszorosito Uzeme, Hungary, 2008, p.75-80.
 181. Calisevici Mirela, Perju Delia, Brusturean Gabriela Alina, **Moldovan R.C.**, Manea Adela – Thermodesimetric Procedure for Liquid Mixtures Concentrations Measurements II. Statistical Modeling that Characterize the Procedure; Fluid and Heat Engineering Volume, microCAD 2008 – International Scientific Conference, Miskolc, Ed. ME Sokszorosito Uzeme, Hungary, 2008, p.81-86.
 182. **Moldovan R.C.**, Șuta M., Rusnac Carmen, Marinescu S., Perju Delia – Elaboration of Mathematical Models for the Transfer Behaviour of a Thermal Boundary Layer Flowmeter Operating with Constant Disequilibrium Voltage; Buletinul Științific al Universității Politehnica din Timișoara, Seria Chimie și Ingineria Mediului, Vol. 51(65), Nr. 1-2, Editura Politehnica, Timișoara, 2006, p. 43-51.