UNIVERSITATEA NAŢIONALĂ DE ŞTIINŢĂ ŞI TEHNOLOGIE

POLITEHNICA BUCUREŞTI

ŞCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMAT EXTINS
TEZĂ DE DOCTORAT

Îmbunătățirea eficienței de condensare a vaporilor de apă în reactoare corona cu câmp electric controlat

Doctorand:

Ing, Alex-ştefan VASILIU

Conducător ştiinţific:

Prof. Dr. Ing. Laurenţiu Marius DUMITRAN

BUCUREŞTI
2025

Cuprins

Capitolul I. Introducere 3
I.2. Prezentarea temei de doctorat 3
I.3. Scopul tezei de doctorat 4
I.4. Conţinutul tezei de doctorat 4
Capitolul II. Condensarea vaporilor de apă. Noţiuni teoretice 7
II.1. Nucleaţia vaporilor de apă 7
II.2. Nucleaţia heterogenă în prezenţa sarcinilor electrice 8
II.3. Efectul forţei dielectroforetice asupra moleculelor de apă 9
Capitolul III. Instalaţia experimentală 11
III.1. Reactorul de condensare 12
III.2. Descrierea instalaţiei experimentale 15
III.3. Elementele constructive. Blocuri funcţionale 17
III.4. Producerea câmpului electric, efectului corona şi al sarcinii spaţiale 25
III.4.1. Tensiune alternativă cu componentă continuă 25
III.4.2. Sursa de înaltă tensiune 26
III.4.3. Generatorul de înaltă tensiune continuă 27
III.4.4. Generatorul de înaltă tensiune alternativă 28
III.5. Metoda de experimentare 29
III.5.1. Aplicarea câmpului electric 30
III.5.2. Determinarea eficienţei condensării 30
III.5.3. Tipuri de determinări efectuate 31
III.5.4. Metoda de calcul 32
Capitolul IV. Rezultate experimentale 33
IV.1. Influenţa polarităţii descărcării corona asupra condensării apei 33
IV.2. Influenţa descărcării corona produs în curent alternativ asupra condensării apei 37
IV.1.3. Influenţa descărcării corona produs de tensiunea continuă variabilă asupra condensării apei 38
IV.2. Concluzii 43
IV.3. Contribuţii originale ..... **Error! Bookmark not defined.**
IV.4. Lista articolelor publicate de autor ..... **Error! Bookmark not defined.**
IV.5. Perspective ..... **Error! Bookmark not defined.**

Capitolul I. Introducere

Condensarea apei reprezintă un fenomen natural prin care, în anumite condiţii, moleculele de apă sub formă de vapori în aer se regrupează şi devin lichidul cel mai răspândit pe glob: apa.

Îmbunătăţirea acestui fenomen termodinamic a captat atenţia cercetătorilor din următoarele cauze:

1. Necesitatea producerii de precipitaţii în zone aride.
2. Îmbunătăţirea randamentului unor procese de producere de energie cu transformare de fază.
3. Reducerea consumului de energie al instalaţiilor de uscare a aerului.
4. Extragerea apei din atmosferă sau procese de desalinizare, ambele cu scopul de a obţine apă potabilă.

Pe scară largă instalațiile de condensare bazate pe reducerea temperaturii unui amestec de gaze şi vapori utilizează sistemele de răcire cu sau fără pompe de frig. În general impactul economic al unor astfel de sisteme este mai puţin evident dacă fac parte dintr-un ansamblu de producere de energie (electrică). Totuşi în cele mai multe aplicaţii, reducerea umidităţii sau condensarea apei, în funcţie de rezultatul dorit, este implementată cu ajutorul pompelor de frig. Uneori sunt utilizate suplimentar şi filtre hidrofobice ce îmbunătăţesc într-o măsură eficienţa sistemelor. Mărirea eficienţei unei instalaţii de acest tip este cu siguranţă un lucru de dorit având în vedere că acţionarea pompelor de căldură este în general electrică iar consumul de energie al acestora este ridicat.

Privitor la mecanismele fizice de condensare ale vaporilor de apă precum: creşterea presiunii de vapori spre valoarea de saturaţie, reducerea temperaturii către „punctul de rouă” , utilizarea unor filtre hidrofobice sau combinaţii ale acestora, există şi alte metode ce pot eficientiza această transformare de fază.

I.2. Prezentarea temei de doctorat

O parte din studiile efectuate asupra procesului de condensare s-au concentrat pe influenţarea procesului termodinamic de condensare al apei cu ajutorul câmpurilor electrice, a purtătorilor de sarcină creaţi artificial sau diverse tipuri de radiaţii ionizante. Baza de pornire a acestor studii constă în exprimarea Kelvin a presiunii de vapori saturaţi.

Modificări substanţiale au fost aduse asupra formulării analitice iniţiale prin adăugarea unor parametri suplimentari cum ar fi prezenţa sarcinilor electrice sau a câmpului electric.

Studiul lucrării va utiliza un câmp electric variabil în timp şi cu frecvenţă variabilă, însă fără schimbarea sensului. Acest mod de abordare deosebit urmăreşte aplicarea simultană a unei forţe columbiene variabile în timp şi a unei forţe de aceeaşi natură dar constantă.

Prin compunerea acestor vectori se obţine o combinare a efectelor tipurilor de câmp electric utilizat anterior în alte lucrări.

Pe de altă parte prin utilizarea unui câmp electric cu frecvenţă variabilă în căutarea unei eventuale rezonanţe a fenomenelor specifice din cadrul condensării nu a mai fost studiată. Majoritatea studiilor ce utilizează câmp electric alternativ au frecvenţa de 50Hz, cea industrială. Utilizarea unei frecvenţe mult mai mari şi reglabile poate evidenţia eventuale comportamente particulare, care o dată identificate pot crea bazele unor noi studii în acest sens.

I.3. Scopul tezei de doctorat

Preocuparea generală legată de creşterea randamentului proceselor termodinamice este alimentată atât de noile tehnologii disponibile pentru cercetare cât şi de posibilităţile actuale de abordare interdisciplinară a fenomenelor fizicii.

Scopul tezei de faţă este de a rafina unele din metodele de experimentare ce stau la baza studiilor de acest tip. Au fost studiate principalele surse ce pot genera erori de măsură şi pot conduce la interpretări greşite. Obţinerea unor rezultate care să prezinte fidel fenomenul de schimbare de fază, implică identificarea surselor de incertitudine şi eliminarea lor. Efectuarea unui studiu utilizând un câmp electric cu intensitate oscilantă ar putea fi un element de noutate în domeniu. De asemenea, condiţiile în care se desfăşoară fenomenul de condensare trebuie urmărite şi stabilizate pe cât posibil, având în vedere că transformarea în cauză este de natură exotermă şi orice modificare cât de mică, poate avea efecte nedorite asupra rezultatelor şi interpretării lor.

I.4. Conţinutul tezei de doctorat

Lucrarea de faţă cuprinde patru capitole ale căror conţinut este structurat după cum urmează:

Primul capitol prezintă aspecte generale referitoare la transformarea de condensare şi aplicaţiile în care se utilizează cel mai des acest fenomen.

Capitolul II cuprinde o prezentare generală a procesului termodinamic de condensare. Va fi analizată transformarea pentru situaţia în care se desfăşoară în prezenţa unor specii de ioni şi a unui câmp electric intens.

Instalaţia experimentală utilizată va fi prezentată în cadrul **Capitolului III** împreună cu explicaţiile necesare înţelegerii funcţionării acesteia. Vor fi prezentate cele două elemente, instalaţia de studiu al fenomenului de condensare şi sursa de înaltă tensiune realizată pentru acest studiu.

Capitolul IV va prezenta rezultatele experimentale obţinute cu ajutorul instalaţiei prezentate anterior şi acestea vor fi analizate separat pentru fiecare din condiţiile alese.

Concluzii asupra rezultatelor vor fi prezentate pentru fiecare din situaţiile particulare studiate. În final vor fi exprimate concluzii generale legate de întregul lanţ de rezultate experimentale precum şi contribuţia metodei utilizate comparativ cu rezultatele anterioare studiate.

Capitolul II. Condensarea vaporilor de apă. Noţiuni teoretice

Procesul de condensare poate fi definit ca o succesiune de evenimente bine definite ale căror ordine de desfăşurare este întotdeauna aceeaşi. Primul pas ce se petrece în procesul de condensare este cel de nucleaţie. Nucleaţia este definită ca procesul prin care minim două molecule de apă constituie o micropicătură de apă lichidă. Acest proces are loc fie în prezenţa unui corp străin fie în prezenţa unei alte molecule de apă. În cazul în care în proces este implicat un corp străin elementul format este denumit mugur al nucleaţiei. Acesta va servi în continuarea procesului de condensare la formarea micropicăturii de apă prin acumularea de noi molecule.

În procesul de condensare având în vedere ca starea de vapori reprezintă un amestec de gaze şi apă se poate preciza că pentru aceasta fază comportamentul principalilor parametri de stare se supun ecuației tipice a gazelor. Pentru exprimarea analitică a fenomenului de schimbare de fază una din cele mai utilizate metode de analiză a fenomenului se bazează pe ecuația Gibbs-Thomson [1 - 4].

II.1. Nucleația vaporilor de apă

Vaporii unei substanţe pot condensa prin două tipuri distincte de nucleaţie. Nucleaţia homogenă presupune excluderea oricăror elemente străine ce pot constitui muguri ai condensării pentru ca procesul să aibă loc doar prin contribuţia elementelor substanţei ce îşi schimbă faza. În general condensarea prin nucleaţie homogenă are loc în cazul lichefierii gazelor şi presupune în general utilizarea unei transformări termodinamice de tip adiabatic.

Particular condensarea vaporilor de apă presupune printre alte condiții şi coexistenţa celor două faze ale apei. Având în vedere că parametrii de stare sunt comuni celor două faze transformarea are loc într-un sens sau în celalalt în funcție de presiunea vaporilor. În situația în care densitatea vaporilor de apă depăşeşte limita presiunii vaporilor saturați are loc fenomenul de nucleație şi respectiv condensare. Pentru o micropicătură de raza r (considerându-se a fi sferă, forma geometrică cu suprafața minimă pentru volumul dat) energia utilizată pentru formare [5 - 7] va fi:

$$\Delta G = 4\pi r^2\sigma - \frac{4}{3}\pi r^3 nkT\ln\frac{p_v}{p_s}, \quad (1)$$

II.2. Nucleaţia heterogenă în prezenţa sarcinilor electrice

Având în vedere că fenomenul de nucleație face parte dintr-un lanț de procese vaporizare-condensare ce se desfăşoară permanent, prezenţa micro-picăturilor formate în jurul unor ioni vor avea nevoie de o energie mai mare pentru vaporizare decât dacă ar fi neutre. Aceasta ipoteză a creat premisa că prezenţa ionilor modifică raportul procesului de vaporizare-condensare în favoarea condensării prin modificarea energiei Gibbs la vaporizare.

Cunoscând distanţa legăturilor de hidrogen d_H = 1,88Å intensitatea câmpului electric în legătura este de $4{,}074 \cdot 10^{10}$V/m comparabilă cu intensitatea câmpului exercitat de un ion de azot din apropiere, asupra unei molecule de apă. Ca urmare este plauzibilă o formare a unei legături ion-dipol în aceste condiţii.

Cercetările efectuate în acest sens aduc un termen nou, ce explică reducerea raportului de suprasaturație a vaporilor la o anumită temperatură, în prezenta unor specii de ioni [8 - 9] iar ecuația propusă a fost denumită „ecuaţia modificată Kelvin-Thomson”.

Pentru a calcula energia liberă Gibbs pentru o micro-picătură cu n legături de hidrogen formată în jurul unui ion de raza r_0 relația ecuaţiei modificată Kelvin-Thomson este:

$$\Delta G_{0,\mathrm{n}}^{\mathrm{dipol}} = \Delta G_{0,\mathrm{n}}^{\mathrm{dipol}+Q} - \sum_{\mathrm{n}=1}^{\mathrm{n}} \Delta U = -nkT \cdot ln\left(\frac{p_{\mathrm{v}}}{p_{\mathrm{s}}}\right) + \sigma 4\pi(r_{\mathrm{n}}^2 - r_0^2) - \frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_{\mathrm{L}}}\right) \cdot \left(\frac{1}{\mathrm{r}_0} - \frac{1}{\mathrm{r}_{\mathrm{n}}}\right) - \sum_{\mathrm{n}=1}^{\mathrm{n}} \left\{ \frac{1}{2}\alpha {E_{\mathrm{ion}}}_{\mathrm{n}-1}^{\ 2} - kT \cdot ln\left[\frac{exp\left(\frac{pE_{\mathrm{ion}_{\mathrm{n}-1}}}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{pE_{\mathrm{ion}_{\mathrm{n}-1}}}{kT}\right)}{2^{\frac{pE_{\mathrm{ion}_{\mathrm{n}-1}}}{kT}}} \right] \right\}. \quad (2)$$

În membrul drept al ecuației, primul termen exprimă variația energiei libere datorată suprasaturaţiei vaporilor, următorul termen este lucrul mecanic necesar modificării ariei micro-picăturii, termenul al treilea reprezintă modificarea energiei potențiale a ionului implicat în proces, modificare datorată apariției unui film dielectric.

Ultimul termen al ecuației prezintă modificarea energiei asociată cu interacţiunea dintre ion şi moleculele dipol.

Conform studiilor efectuate pe bază experimentală asupra veridicității ecuaţiei modificată Kelvin-Thomson, au fost constatate şi documentate rezultate în ceea ce privește comportamentul mai multor tipuri de molecule care prezintă moment de dipol. Structuri ca H_2O, NH_3, CH_3OH şi C_5H_5N au fost studiate experimental şi au fost constatate diferențe între valorile entalpiei şi entropiei măsurate şi cele calculate conform ecuaţiei clasice Kelvin-Thomson (denumire prescurtată CKT) [8].

În concluzie, având în vedere cele expuse mai sus, mecanismul nucleației va avea raportul condensare-vaporizare modificat. În prezenţa purtătorilor de sarcină moleculele vor forma micropicături mai uşor şi tot odată se vor vaporiza mai greu, decât în absenţa lor.

II.3. Efectul forţei dielectroforetice asupra moleculelor de apă

Un câmp electric de o intensitate considerabilă aplicat într-un mediu precum cel format dintr-un amestec de aer şi vapori de apă poate genera efecte sub forma deplasării sau rotirii particulelor.

În cazul în care câmpul electric este uniform cu linii de câmp paralele, numai particulele încărcate cu sarcină electrică se vor deplasa conform semnului sarcinii pe care o au şi aceasta sub acțiunea unei forţe columbiene.

Dacă câmpul electric este neuniform, fiecare particulă din în zona liniilor de câmp va avea suprafaţa expusă în mod diferit, corespunzător electrozilor.

Respectiv suprafața orientată către potențialul negativ va fi mai mare raportată la suprafața expusă potențialului pozitiv. Va exista astfel un dezechilibru în aplicarea forței columbiene asupra particulei. Efectul este numit uzual dielectroforeza şi este pe larg utilizat în separarea particulelor ce prezintă proprietăți dielectrice diferite decât mediul în care se găsesc [10].

Sistemele de electrozi tip ac-plan sau fir-cilindru generează un astfel de câmp electric divergent.

Direcția forței dielectroforetice rezultante este dependentă de polarizabilitatea relativă a particulei raportată la cea a mediului în care se găsește după cum urmează: dacă polarizabilitatea particulei este mai mare decât cea a mediului, forța este aplicată asupra particulei și direcționată către electrodul pozitiv generator de câmp (dielectroforeză pozitivă) , dacă polarizabilitatea mediului este mai mare decât cea a particulei forţa va fi aplicată mediului şi va împinge particula către electrod.

Forța rezultantă este ușor observabilă ca efect în cazul particulelor foarte mici cu diametrul 1-1000µm deoarece în cazul lor gravitația precum şi forțele Browniene au influenţă neglijabilă comparativ cu influenţa câmpului electric [5 – 7, 11].

Pentru o particulă polarizabilă de o rază r şi permitivitate dielectrica ε_p intr-un mediu cu permitivitate dielectrică ε_m forţa aplicată particulei poate fi exprimată ca:

$$\vec{F}_{\mathrm{dep}} = 2\pi r^3 \varepsilon_{\mathrm{m}} R_e \left\{\frac{\varepsilon_{\mathrm{p}}-\varepsilon_{\mathrm{m}}}{\varepsilon_{\mathrm{p}}+2\varepsilon_{\mathrm{m}}}\right\} \nabla\left|\vec{E}\right|, \qquad (3)$$

în care R_e reprezintă numărul Reynolds.

Dacă polarizabilitatea particulei este mai mare decât cea a mediului atunci forţa aplicată particulei va împinge particula către zona cu densitate de sarcină mai mare şi deci cu un câmp mai intens iar asta se va întâmpla în cazul apei.

Capitolul III. Instalaţia experimentală

Lucrarea de faţă studiază efectul câmpului electric în aerul umed asupra vitezei de nucleație și condensare în faza lichidă a vaporilor de apă şi este investigat atât teoretic cât și experimental prin implementarea unui condensator de abur cu rată îmbunătățită de schimbare de fază precum şi prin utilizarea unui câmp electric cu intensitate variabilă în timp.

Un prim obiectiv al studiului efectuat vizează evaluarea cantitativă cât mai precisă a modului în care câmpul electric intens și descărcările corona influențează fenomenul de condensare. Pentru atingerea acestui obiectiv a fost necesară implementarea unui sistem de evaluare care constă în măsurarea umidității unui flux de aer la temperatura ambiantă înainte și după condensare. Astfel, a fost realizată o instalație care produce și conduce cu o viteză constanta un flux de aer umed către un sistem de condensare. Efectuarea unor experimente cu ajutorul instalației realizate reprezintă un proces complex, fiind implicate variabile ce depind de mediul în care se desfășoară experimentările. Pentru controlul parametrilor ce pot influenţa studiul experimental a fost stabilită o procedură de lucru, urmărindu-se stabilirea parametrilor de umiditate relativă și temperatură ambiantă cu ajutorul unui sistem de climatizare (aer condiționat).

Încercările preliminare efectuate pe parcursul realizării instalației au vizat influenţa traseelor, prin care este condus aerul umidificat, dimensiunii tuburilor, formei și materialelor utilizate urmărindu-se influenţa lor asupra umidității din interiorul sistemului de condensare [12 - 14]. Studiul asupra procesului de condensare a evidenţiat faptul că procese de condensare „parazite” pot apărea în unele segmente ale instalației și devin surse de incertitudine în determinări.

Pornind de la aspectele termodinamice ale fenomenului de condensare şi luând în considerare materialele altor cercetări în acest domeniu, a fost identificată o metodă de studiu ce cuprinde atât originalitate, elemente de construcţie cât şi metode deosebite de cele utilizate anterior.

Astfel pentru experimentare s-a apelat la o sursă de generare a vaporilor de apă prin atomizare care permite obținerea unui amestec de aer, micropicături și vapori de apă la temperatura ambiantă în defavoarea obținerii acestora prin fierbere.

Aceasta abordare a exclus o condensare parazită care s-ar fi putut desfășura pe traseul sistemului de conducere a fluxului de aer umed cauzată de diferențele mari de temperatură Acestea ar fi putut da naștere unor erori de măsurare sau interpretare a rezultatului.

Pe de altă parte, în scopul de a obţine rezultate cât mai fidele asupra fenomenului studiat, a fost dezvoltată o metodă de experimentare şi de măsurare adaptată instalaţiei utilizate.

Instalaţia experimentală realizată a fost testată în mai multe condiţii, eficienţa utilizării unui asemenea principiu de condensare fiind observată şi prin reducerea umidităţii unui amestec de aer umidificat la saturaţie (ceaţă deasă) către valori normale ale umidităţii.

III.1. Reactorul de condensare

Constituind elementul central al instalaţiei experimentale, reactorul de condensare propus prezintă caracteristici tehnico-funcționale distincte comparativ cu alte metode utilizate în studiile anteriore.

Din punct de vedere electric a fost abordată o construcţie simplificată respectiv un sistem fir-cilindru ce permite utilizarea unui câmp electric intens, prezintă o capacitate electrică minimă şi permite o curgere laminară a amestecului de aer umed.

Reactorul de condensare este schiţat şi descris în figura 4, împreună cu principalele sale elemente.

Principalul element al sistemului de condensare îl reprezintă cilindrul rece, realizat din material inoxidabil bun conductor termic şi electric (figura 4, detaliul „A”, figura 5, detaliul „A”) cu o lungime de 214 mm şi un diametru interior de 48 mm. Rolul său în instalaţia experimentala este dublu: atât ca electrod cu potenţial nul în crearea câmpului electric cât şi ca element de reținere și condensare a vaporilor ce intră în contact cu el.

Pentru a se colecta condensul format în acest cilindru și pentru ca în prima instanță fenomenul să aibă loc, temperatura cilindrului trebuie să fie mai redusă (sau cel puțin egală) decât temperatura punctului de rouă pentru condițiile în care se desfășoară experimentul. Obținerea acestei temperaturi a cilindrului a fost posibilă prin implementarea unui sistem de răcire figura 4, detaliul „C” ce utilizează un agent termic lichid (figura 4, detaliul „G”) aflat în circulaţie pe suprafaţa exterioară a cilindrului.

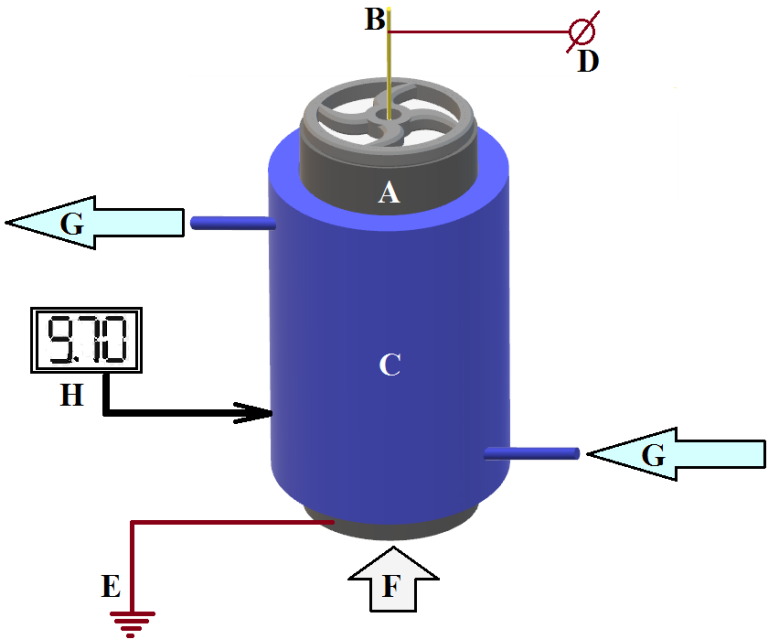


Figura 4. Schema alcătuirii reactorului de condensare. A – cilindru metalic, B – electrod descărcare corona; C – sistem de răcire; D – conexiune înaltă tensiune; E – conexiune pământ; F – intrare aer umidificat; G – agent termic de răcire.

Firul de descărcare corona (figura 4, detaliul „B”) realizat din conductor cu diametru de 75µm, fixat pe suporţi izolatori este dispus central şi pe toată înălțimea cilindrului. În partea superioară a cilindrului prin intermediul unei borne electrice accesibile în exterior (figura 4, detaliul „D” şi figura 8, detaliul „I”), poate fi aplicat un potenţial electric firului de descărcare corona. Pentru a crea câmpul electric dorit cilindrul este conectat cu un conductor (figura 4, detaliul „E”) la potențial nul prin intermediul unei manșete metalice cu borna de legătura.

Prin interiorul cilindrului, în sens ascendent, este condus amestecul de aer umidificat supus experimentului (figura 4, detaliul „F”).

Schema electrică utilizată pentru alimentarea reactorului de condensare este prezentată în figura 5. Tot în această figură este schiţată dispunerea liniilor de câmp electric considerându-se o vedere în secțiune a reactorului de condensare.

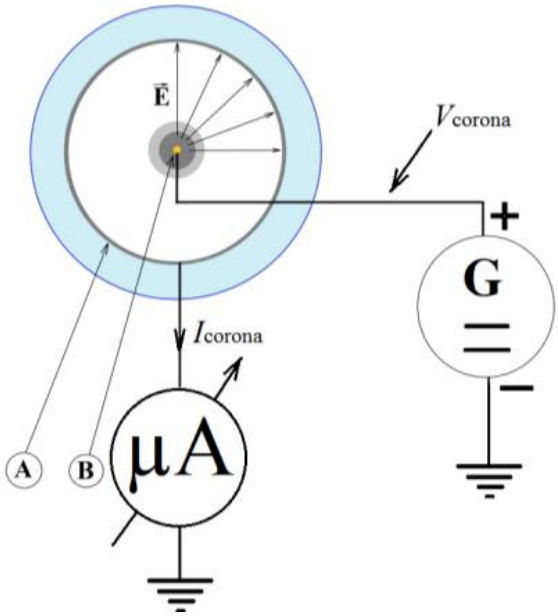


Figura 5 . Schema electrică a cilindrul reactorului de condensare, cilindrul este văzut în secțiune.

Electrodul de descărcare „B” este poziționat la distanţa de 10mm în raport cu marginile cilindrului „A” astfel încât câmpul electric format în interiorul cilindrului să nu depăşească zona cu temperatură controlată.

Pentru a se trasa caracteristica I-V a descărcării corona ce are loc în reactorul de condensare s-a utilizat schema electrică din figura 5. Utilizând trei valori ale umidităţii relative a aerului s-au trasat graficele din figurile 6 şi 7, separat pentru descărcare corona negativă respectiv pozitivă. Din caracteristicile expuse se observă că, în cazul descărcării corona negativă, curenţii stabiliţi sunt mai mari decât în cazul corona pozitivă. De asemenea este evidentă caracteristica asemănatoare în ambele cazuri precum şi faptul că dispersia valorilor în raport cu umiditatea aerului este redusă, familia de caracteristici obţinute sunt aproximativ suprapuse.

Puterea termică disipată de efectul joule apărut sub acţiunea curentului de descărcare în cele două cazuri se încadrează între 4W-5,5W.

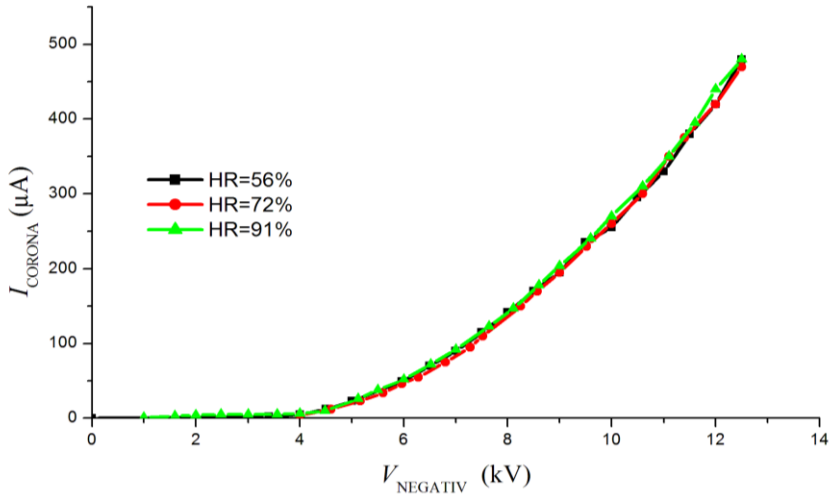


Figura 6. Caracteristici tensiune-curent ale reactorului de condensare pentru trei valori ale umidităţii relative din interior şi pentru potențiale negative aplicate.

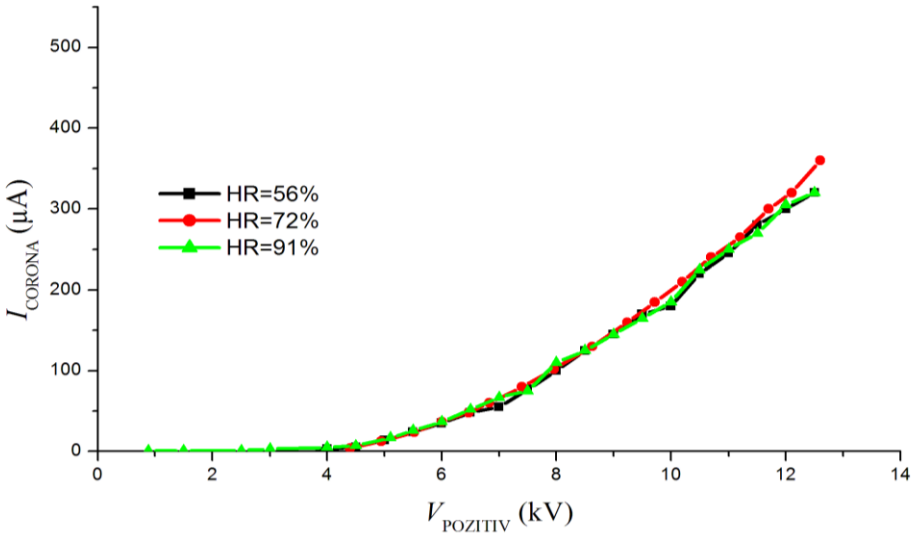


Figura 7. Caracteristici tensiune-curent ale reactorului de condensare pentru trei valori ale umidităţii relative din interior pentru potențiale negative aplicate.

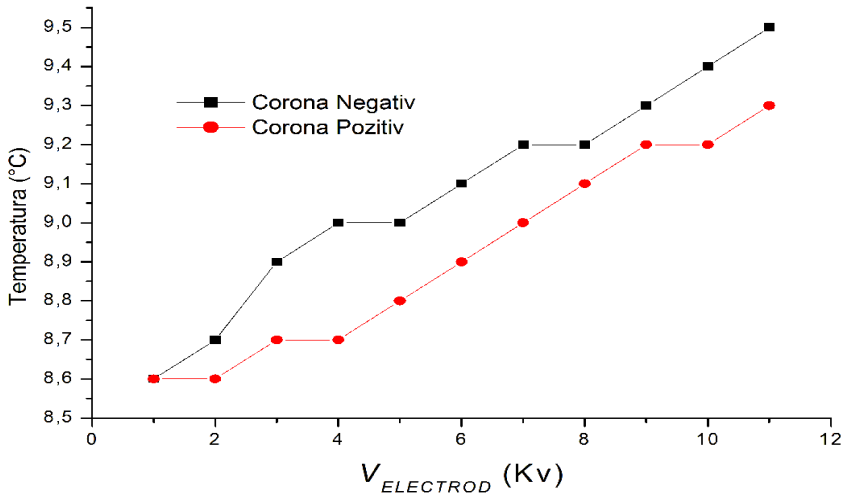


Figura 8. Încălzirea cilindrului de condensare în funcţie de intensitatea descărcării corona.

Ca atare sistemul de răcire ce va fi utilizat va trebui să poată extrage cel puţin această putere termică pentru ca temperatura reactorului de condensare să rămână constantă.

În figura 8 este prezentat grafic efectul termic al descărcării corona asupra cilidrului reactorului de condensare. Este evidenţiat astfel aportul de căldură adus prin efect joule. Evaluarea unei condensări în prezenţă unei descărcări corona prin măsurare calorimetrică, ar necesita eliminarea acestei cantităţi de căldură, ce nu are legatură cu transformarea de fază ci numai cu efectul termic al curentului electric.

III.2. Descrierea instalaţiei experimentale

Pentru a se realiza condiţiile necesare experimentului, reactorul de condensare face parte dintr-o instalaţie complexă. Elementele de hidrodinamică, termodinamică, electricitate precum şi măsurare ce fac parte din această instalaţie vor fi pe parcurs descrise individual.

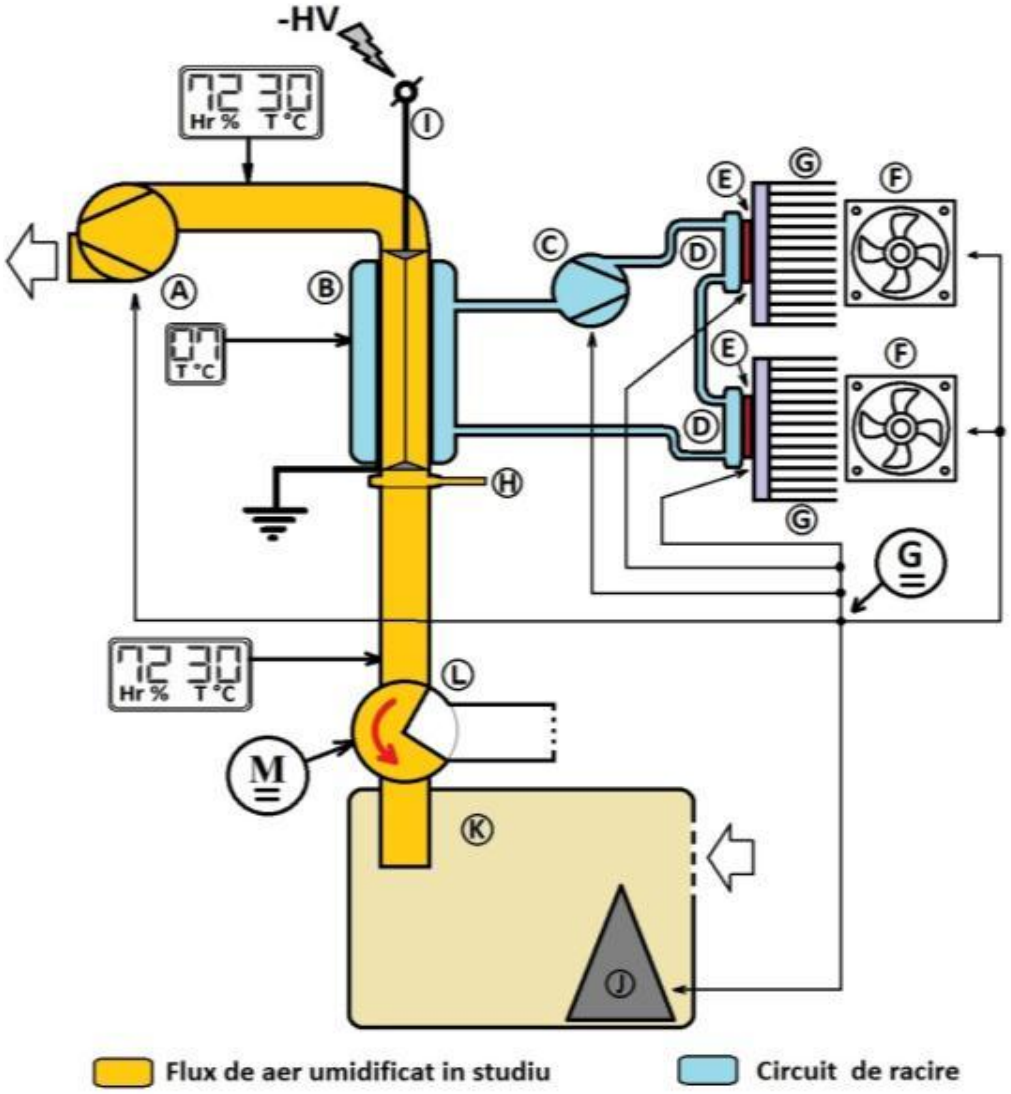


Figura 9. Instalaţia experimentala. Schema de principiu.

Schema de principiu a instalaţiei experimentale este prezentată în figura 9. Elementele distinctive sunt :

A. Turbină de evacuare utilizată pentru a pune în mişcare amestecul de aer umed cu o viteză cunoscută.
B. Reactor de condensare. Procesul de condensare are loc în interiorul acestuia.
C. Pompa circuitului de răcire
D. Schimbător de căldură ale sistemului de răcire
E. Element Peltier utilizate în circuitul de răcire
F. Ventilator de răcire;
G. Radiator termic al elementului Peltier;
H. Sistem de evacuare al condensului colectat de reactorul B;
I. Borna de înaltă tensiune pin intermediul căreia se aplică potenţial electric electrodului corona.
J. Atomizor cu ultrasunete utilizat în creşterea umidităţii;
K. Incintă de separare a vaporilor;
L. Vană de reglare a umidităţii.

Instalaţia utilizează tuburi interconectate din PVC cu diametru de 50mm şi o grosime a peretelui de 1,2mm, pentru transportul aerului umidificat de la sursă.

Reactorul de condensare este răcit cu ajutorul unui lichid care prezintă capacitate calorică ridicată tip etil-glicol, numit în continuare agent de răcire, aflat în circulaţie în jurul cilindrului metalic. Cilindrul metalic al reactorului de condensare este înconjurat de o cămaşă exterioară aflată la o distanţă de 7 mm de suprafaţa exterioară a cilindrului.

Agentul de răcire utilizat ocupă acest interstiţiu. Circulaţia agentului de răcire se desfăşoară pe un traseu elicoidal în sens vertical, ascendent. Această circulaţie turbulentă este asigurată prin poziţionarea dezaxată a conductelor de conectare, intrarea şi ieşirea agentului termic din reactorul de condensare.

Având în vedere că fenomenul urmărit este unul de condensare, pentru a se colecta condensul format în cilindru şi pentru ca în prima instanţă fenomenul să aibă loc, temperatura agentului termic utilizat trebuie să fie mai redusă (sau cel puţin egală) cu temperatura punctului de rouă în condiţii în care are loc experimentul. Răcirea cilindrului sub valoarea punctului de rouă permite reţinerea vaporilor condensaţi pe interiorul cilindrului; acest lucru este foarte important pentru că aplicarea unui câmp electric în interiorul cilindrului este un fenomen exoterm [15] care prin aport de căldura poate vaporiza apă condensată rezultând un amestec de aer umed.

Raportând umiditatea relativă la ieşirea reactorului cu cea de intrare rezultatul nu ar putea să reflecte corect fenomenul în condiţiile în care ar avea loc o vaporizare suplimentară chiar în interiorul cilindrului. Condensul format pe interiorul cilindrului se scurge sub acţiunea gravitaţiei şi este evacuat în exterior printr-un port de colectare (detaliul „H”).

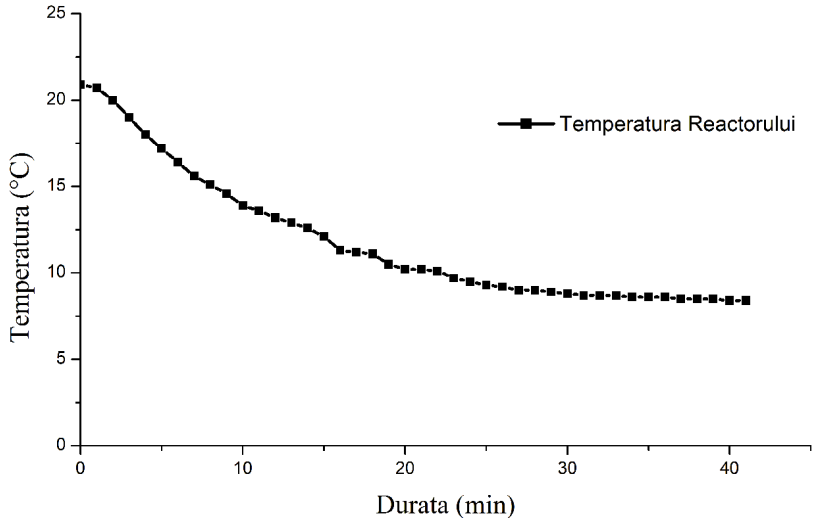


Figura 10. Caracteristica sistemului de răcire şi evoluţia temperaturii reactorului de condensare în timp.

Evoluţia temperaturii cilindrului din reactorul de condensare în timpul utilizării sistemului de răcire poate fi observată sub formă grafică în figura 10. Pornind de la o temperatură ambiantă de aproximativ 21°C instalaţia de răcire reduce temperatura cilindrului la aproximativ 8°C. Caracteristica de evoluţie a temperaturii prezintă o stabilizare a valorii ţintă respectiv punctul de rouă, după circa 35 de minute de funcţionare.

Atât timp cât temperatura reactorului de condensare rămâne constantă cantitatea de apă extrasă din amestecul de aer umidificat prin răcire va fi relativ constantă.

Extracţia apei prin acest procedeu va fi considerată condensare intrinsecă, aportul sistemului de răcire va fi evidenţiat în rezultatele prezentate. Eficienţa sistemului va fi prezentată printr-un procedeu simplu de calcul, ce va fi explicat ulterior.

III.3. Elementele constructive. Blocuri funcționale

- **Ansamblul reactorului de condensare**

O vedere de ansamblu a reactorului de condensare este prezentată în figura 12. Pot fi identificate pe exterior atât izolaţia termică realizată din material plastic spongios cât si conductele de alimentare şi evacuare utilizate pentru transportul agentului de răcire.

Acestea din urmă sunt de asemenea termoizolate cu acelaşi tip de material. La jumătatea înălţimii reactorului de condensare este vizibilă legătura electrică a sondei termice necesare monitorizării temperaturii cilindrului reactorului.

În partea inferioară a reactorului de condensare sunt vizibile porturile de evacuare a condensului colectat pe interiorul cilindrului rece precum şi colierul de legătură electrică ce permite legarea la potenţialul pământului.

În figura 11 este prezentat în detaliu din partea superioară a reactorului de condensare, izolatorul ce susţine firul de descărcare corona. Este vizibilă izolaţia conductorului de

legătură realizată din polipropilenă şi căreia îi este ataşată borna de legătură electrică (Figura 9, detaliul „I”). De asemenea este vizibil şi electrodul de descărcare corona.



Figura 11. Vedere a reactorului de condensare, în detaliu izolatorul electrodului de descărcare corona.



Figura 12. Ansamblul reactorului de condensare.

- **Sistemul de control al temperaturii reactorului de condensare**

Aşa cum a fost prezentat anterior, sistemul de răcire are la bază circulaţia unui agent termic lichid în circuit închis. Traseul pe care-l urmează agentul de răcire este cuprins între reactorul de condensare, care este sursă de căldură şi două schimbătoare de căldură aflate în contact intim cu două elemente semiconductoare Peltier. Schimbătoarele de căldură au rolul de a extrage din agentul de răcire căldura colectată de la reactorul de condensare.

Căldura colectată de agentul de răcire are trei surse de proveniență. În primul rând este vorba de căldura transportată de aerul umidificat provenită din mediul ambiant.

A două sursă o reprezintă căldura latentă de condensare a apei ce condensează pe peretele interior al cilindrului.

În ultimul rând, prin aplicarea unui potențial electric firului de descărcare corona se va stabili un curent slab însă, având în vedere tensiunea ridicată la care se desfășoară fenomenul, aportul de căldură prin efect joule nu este neglijabil.

În consecință sistemul de răcire va trebui dimensionat aşa fel încât puterea sa de răcire să fie suficientă şi să aibă capacitatea de a reduce suficient temperatura reactorului de condensare. Schimbătoarele de căldură sunt conectate prin intermediul unor conducte din silicon la reactorul de condensare iar acestea sunt izolate termic la suprafaţa exterioară cu material spongios.

Cele două schimbătoare de căldură sunt de construcție similară fiind de proveniență industrială, din cupru, un material cu bune proprietăți de transfer termic. Schema de principiu a instalației experimentale prezintă în figura 9, detaliul „D" pozițiile ocupate de schimbătoarele de căldură.



Figura 13. Ansamblul schimbătorului de căldura (sus), Circulația agentului de răcire, detaliu (jos)

Figura 13 prezintă vederea explodată a unui schimbător de căldură iar ca detaliu în partea de jos corpul metalic, ca parte activă lui. Corpul metalic este prevăzut cu fine canalizaţii, pentru a mări suprafaţa de contact, astfel agentul de răcire poate ceda cu uşurinţă căldura transportată. Pentru a se asigura circulaţia agentului de răcire în sistem este utilizată o turbină de recirculare antrenată de un motor electric sincron de tip BLDC. Aspectul turbinei hidraulice utilizate de acest sistem este prezentat în figura 14.



Figura 14. Pompa de circulare a agentului de răcire.

Schimbătoarele de căldură sunt fixate pe elemente de răcire cu semiconductori de tip Peltier. Poziţia termoelementelor Peltier este identificată pe schema de principiu în figura 9, detaliul „E”. La rândul lor acestea sunt răcite cu ajutorul a două radiatoare masive realizate din aluminiu şi ventilate forţat, identificate în figura 8, detaliul „F” şi „G”.

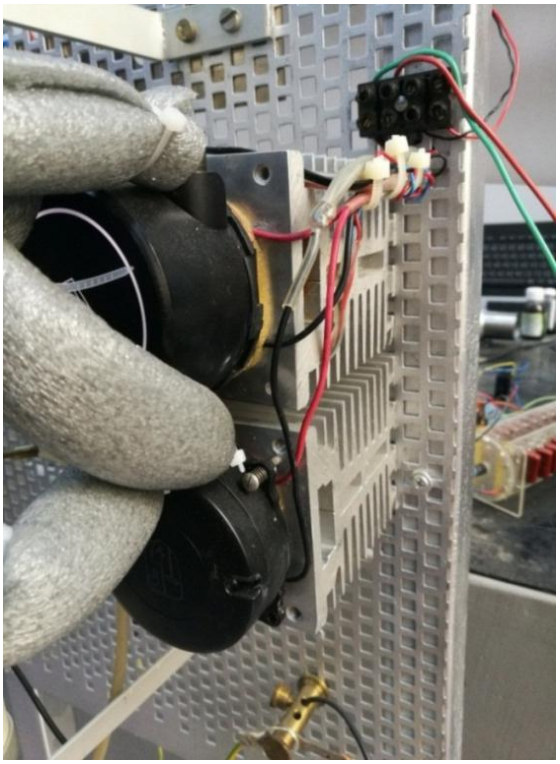


Figura 15. Ansamblul schimbătoarelor de căldura cu elemente Peltier.

Elementele Peltier sunt conectate la o sursă de alimentare ce debitează un curent de 6A, constant, optim funcționării elementelor. La stabilizarea regimului termodinamic puterea electrică absorbită de sistemul de răcire este de cca 100W.

Întregul ansamblu al schimbătoarelor de căldură împreună cu radiatoarele de răcire este prezentat în imaginea din figura 15.

Pentru a se pune în evidenţă caracteristica de evoluţie a temperaturii cilindrului rece în timpul funcţionării sistemului de racire au fost efectuate determinări succesive de temperatură la intervale egale de timp, cu ajutorul unui termometru electronic.

Sonda acestuia este poziţionată astfel încât să poată prelua temperatura într-un mod precis. Identificat în figura 9, detaliul „H" termometrul electronic utilizat este vizibil în figura 16.



Figura 16. Termometrul digital.

- **Sistemul de umidificare a aerului**

În figura 17 este prezentată incinta în care sunt separate micropicăturile de apă de vapori (figura 9, detaliul „K"); este vizibil şi dispozitivul de atomizare a apei (figura 9, detaliul „J"). Atomizorul este de producţie industrială şi are ca principiu de funcționare atomizarea lichidelor cu ajutorul ultrasunetelor.

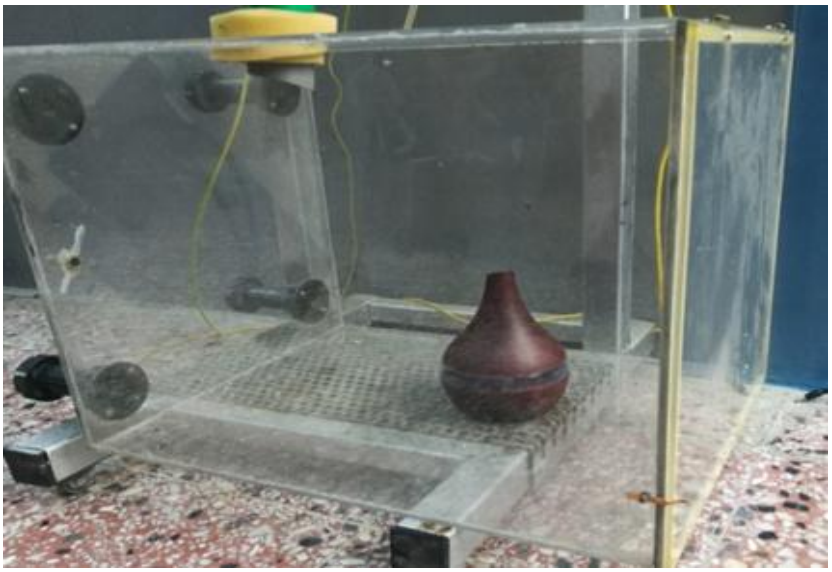


Figura 17. Incinta de separare pentru producerea vaporilor de apă, în detaliu atomizorul de lichid ultrasonic.

Incinta de volum ridicat permite separarea prin gravitaţie a picăturilor de apă generate de atomizorul introdus în interior.

În acest mod se poate obţine o concentraţie relativ mare de apă într-un flux de aer fără a se ridica temperatura peste valoarea din ambiant. Avantajul acestei abordări constă în faptul că amestecul de aer umed obţinut va avea temperatura aproximativ egală cu cea a mediului ambiant şi a conductelor ce îl transportă către reactorul de condensare.

Neexistând diferenţe de temperatură în acest traseu evităm suspicionarea unor condensări parazite ce ar putea afecta rezultatele determinărilor.

O curgere turbulentă a amestecului de aer umidificat prin sistemul de condensare ar putea contribui suplimentar la efectul global al sistemului și ar fi dificil de estimat cât din rezultatul măsurat i s-ar datora [16].

Prezenţa unei asemenea conducte de lungime mult mai mare decât cea a sistemului de condensare a urmărit formarea unui flux laminar cu o curgere cât mai puțin turbulentă în interiorul reactorului de condensare. Pe acest traseu de alimentare cu aer umed a fost instalat un prim sistem de măsurare a umidității relative, considerată a fi umiditatea de intrare în sistemul de condensare.

În interiorul incintei de separare se obţine un amestec de aer cu umiditate foarte ridicată şi prin adăugarea unei cantităţi de aer din exterior se pot obţine valorile dorite ale umidităţii. Pentru ajustarea valorii umidităţii relative la ieşirea din incinta de separare s-a inserat o vană de amestec (Figura 18). Acţionarea vanei se execută electric cu ajutorului unui servomotor de curent continuu. Astfel se pot realiza determinări la diverse valori stabilite ale umidităţii.

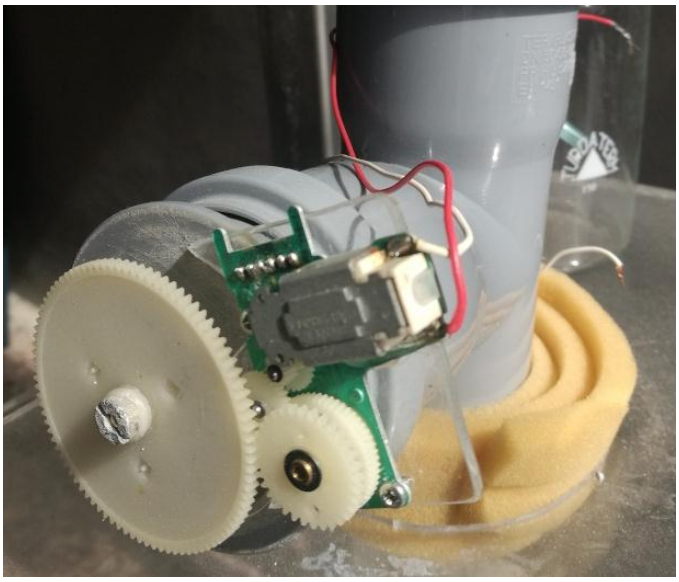


Figura 18. Vană de amestec pentru ajustarea umidităţii relative.

- **Sistemul de măsurare**

Pentru determinarea modificărilor datorate aplicării câmpului electric asupra schimbării de fază ce se petrece în interiorul reactorului de condensare a fost necesară implementarea unui sistem de masură adaptat experimentului. Astfel au fost instalate un numar de două dispozitive prevăzute cu sonde de măsurare a umidităţii relative şi a temperaturii.

Sonda primului instrument de masură a fost introdusă în interiorul conductei ce alimentează reactorul de condensare la o distanţă suficientă (600mm) de reactorul de condensare astfel încât să nu influenţeze curgerea laminară în zona de interes. Sonda este prezentată în figura 19. Acest prim instrument de măsurare va indica umiditatea de intrare, cea iniţială, în reactorul de condensare.

Având în vedere că traseul de transport al amestecului de aer umidificat este realizat din PVC şi între suprafeţele conductei respective gradientul de temeratură este foarte mic, nu putem suspecta condensări parazite în această zonă.

De altfel pe parcursul determinărilor au fost efectuate inspecţii ale acestei zone pentru a identifica eventualele probleme de acest fel.



Figura 19. Sonda de măsurare a umidităţii relative la intrarea în reactorul de condensare.

Pentru a determina valoarea umidităţii relative de la ieşirea reactorului de condensare a fost instalat un alt instrument de măsură, echivalent, a cărui sondă a fost introdusă în conducta de evacuare a reactorului de condensare. Cele două aparate de măsură sunt prezentate în figura 20.

În zona în care au fost amplasate cele două instrumente de măsură, conducta de evacuare a fost ecranată prin manşonare cu folie metalică din aluminiu. Aceasta fost conectată la potenţial nul printr-un conductor prevăzut cu colier metalic.



Figura 20. Higrometrele utilizate în determinările experimentale.

Fiind vorba de prima parte a traseului din avalul reactorului de condensare a fost suspicionată o încărcare electrostatică consistentă, a cărei proveniență este fenomenul de descărcare corona. Un număr important de particule purtătoare de sarcină electrică vor părăsi zona descărcării corona şi cel mai probabil vor cauza acumulări de sarcină electrică pe traseul de evacuare.



Figura 21. Anemometrul cu fir cald utilizat pentru determinarea vitezei de curgere.

Cele două instrumente de măsură au fost verificate în prealabil pentru diverse valori ale temperaturii şi umidităţii pentru a se realiza o corelare între indicaţiile lor. Verificările au dovedit că o eventuală corecţie nu a fost necesară, indicaţiile fiind corelate intr-o mare măsură.

Pentru a se verifica şi stabili viteza cu care amestecul de aer umidificat circulă în sistemul expus mai sus, a fost utilizat un anemometru cu fir cald. Indicaţiile acestuia au fost corelate cu turaţia turbinei de evacuare respectiv cu tensiunea electrică de alimentare a sa. Corelarea a fost necesară ca, pe parcurul determinărilor, sa nu fie necesară utilizarea

anemometrului, fiind suficientă stabilirea unei anumite tensiuni de alimentare a turbinei de evacuare. Anemometrul utilizat este prezentat în figura 21.

Pentru a se evita eventualele erori de măsurare în prealabil anemometrul prezentat a fost calibrat.

III.4. Producerea câmpului electric, efectului corona şi al sarcinii spaţiale

Instalaţia realizată poate permite evaluarea cantitativă a condensării în prezența unui câmp electric de diverse forme, polarităţi și amplitudini. Se cunosc studii efectuate în prezența unui câmp electric de o intensitate și polaritate fixă și s-a dorit punerea în evidenţă a efectului în alte condiții și căutarea unei eficientizări a fenomenului.

Pentru realizarea unei astfel de surse s-a optat pentru realizarea unui invertor electronic alimentat de la o sursă de joasa tensiune separata galvanic de reţeaua de alimentare, lucru care sporește siguranța manevrării precum şi posibilitatea de a conecta la potențialul pământului oricare din borne, la alegere. Mai mult de atât prezența unei tensiuni alternative ar putea permite aplicarea în interiorul cilindrului a unui câmp electric variabil în timp.

Fenomenul de condensare ar putea fi influenţat prin următoarele mecanisme:

- moleculele de apă pot prezenta mișcări de rotație în prezenţa unui câmp electric variabil sau alternativ.
- microparticule din amestecul de aer umed ar putea fi puse în mișcare relativă față de vaporii de apă prin forțele columbiene în prezența câmpului electric alternant.

Microparticulele respective ar putea colecta molecule de apă într-un regim accelerat.

De asemenea, moleculele de apă pot avea tensiunea superficială modificată datorită potenţialelor legături de hidrogen realizate cu ionii rezultaţi din prezenţa descărcării corona, fapt ce ar putea contribui la accelerarea fenomenului de condensare .

III.4.1. Tensiune alternativă cu componentă continuă

Obţinerea unui câmp electric cu intensitate variabilă presupune aplicarea unei tensiuni electrice variabile în timp. Uzual precipitatoarele electrostatice sunt alimentate cu tensiune electrică continuă. Sunt mai puţin întâlnite cazurile în care electrozilor li se aplică o tensiune alternativă cu o altă formă de undă. Sunt cunoscute cazuri în care precipitatoarele electrostatice sunt alimentate cu tensiune alternativă, de obicei sinusoidală.

Un caz particular şi încă nedocumentat suficient este cel în care tensiunea electrică de alimentare oscilantă şi nu-şi schimbă polaritatea. Aplicarea unui asemenea tip de tensiune electrică va duce la formarea unui câmp electric fix ca sens dar variabil ca intensitate după forma curentului alternativ. Variaţia de intensitate a câmpului produs va fi proporţională în acest caz cu valoare vârf-la-vârf a tensiunii alternative.

Acest tip de tensiune electrică este tehnic denumită tensiune alternativă cu componentă continuă.

Un asemenea experiment realizat în condiţii diferite faţă de studiile anterioare ar putea evidenţia efecte noi asupra fenomenului de condensare.

Pentru a studia efectele unei tensiuni electrice variabile în timp ca cea descrisă mai sus aplicată electrodului de descărcare corona, este necesară utilizarea unei surse speciale de alimentare.

III.4.2. Sursa de înaltă tensiune

O reprezentare bloc a unei asemenea surse de înaltă tensiune care convine scopului propus este prezentată în figura 22. Aceasta ar putea permite aplicarea simultană a două tensiuni reglabile independent şi însumate, prin înseriere.

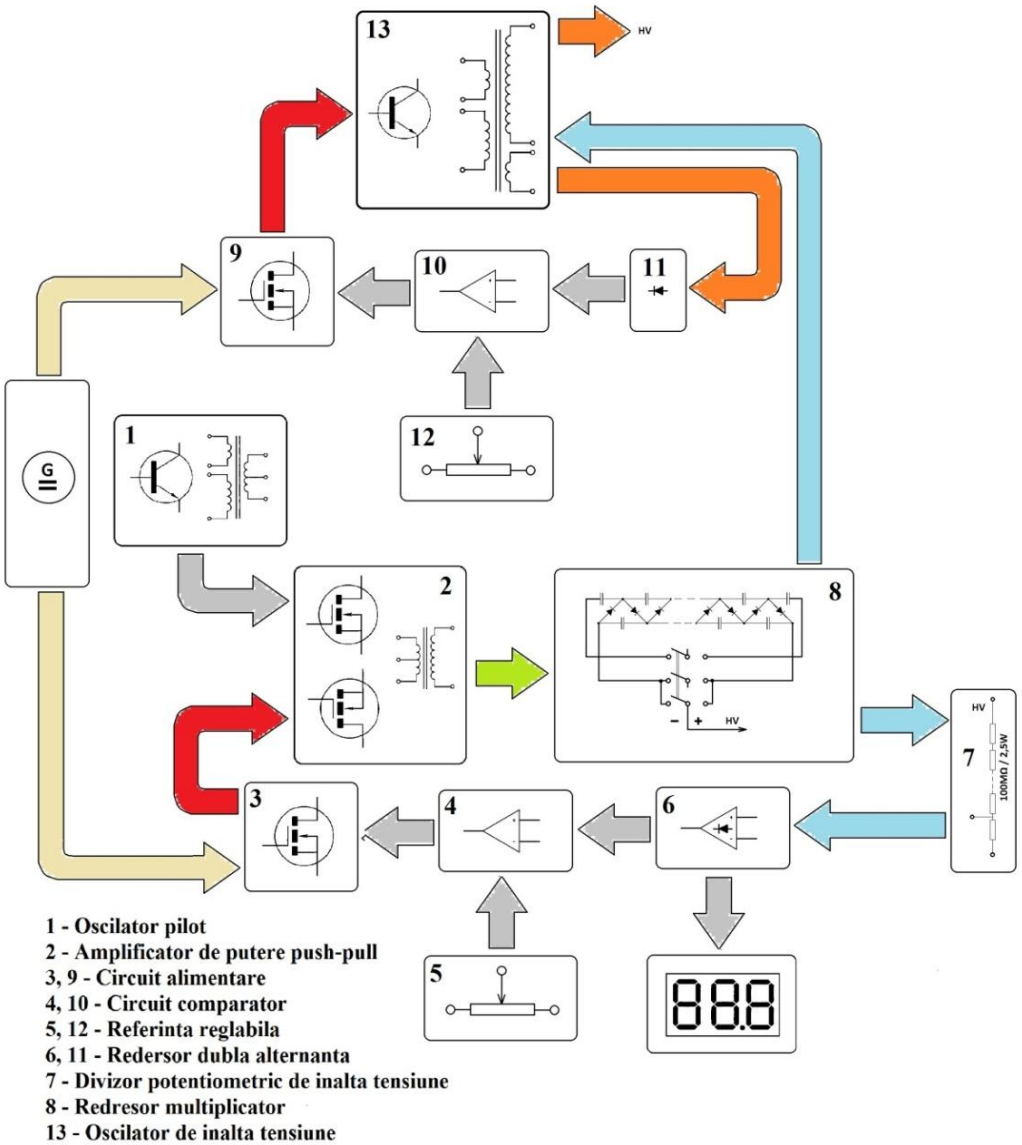


Figura 22. Schema bloc a sursei de înaltă tensiune.

Blocurile sursei de alimentare au următoarele funcţii:

1. Oscilator pilot cu circuit acordat LC cu transformator defazor şi ieşire simetrică.
2. Etajul de amplificare, realizat cu transformator fazor de ieşire.
3. Sursă de alimentare PWM cu factor de umplere variabil ce alimentează etajul de amplificare 2.
4. Circuit de comandă a sursei de alimentare PWM realizat cu un comparator de tensiune.
5. Referinţa sistemului de reglare al tensiunii continue.
6. Redresor electronic fără trecere prin zero.
7. Divizor potenţiometric al înaltei tensiuni.
8. Redresor-Multiplicator în schemă de redresare monoalternanţă cu 26 de celule şi inversor de sens.
9. Sursă de alimentare PWM cu factor de umplere variabil ce alimentează etajul de auto-oscilator 13.
10. Circuit de comandă a sursei de alimentare PWM realizat cu un comparator de tensiune.
11. Redresor de curent alternativ realizat cu punte de diode.
12. Referinţa sistemului de reglare al tensiunii alternative.
13. Etaj auto-oscilator de putere cu transformator ridicător de tensiune.

Tensiunea continuă astfel obținută va fi însumată cu tensiunea alternativă obținută în blocul 13 şi în final tensiunea rezultată va fi aplicată reactorului de condensare. Ambele căi de producere a tensiunii pot fi reglate pentru a obține o anumită valoare de ieşire în mod independent, prin blocurile de reglaj 5 și 12.

Pentru urmărire, pe traseul sistemului de producere a tensiunii continue este intercalat un voltmetru electronic ce va indica prezenţa şi valoarea tensiunii de ieşire. Întregul ansamblu va fi alimentat de la o sursă de tensiune continuă.

III.4.3. Generatorul de înaltă tensiune continuă

Pentru generarea tensiunii continue utilizate în experiment a fost realizat un invertor de înalta tensiune bazat pe un redresor-multiplicator (blocul 8) de curent alterativ cu 26 de celule şi un generator de curent alternativ.

Funcţionarea generatorului de tensiune continuă are loc după cum urmează:

1. Circuitul comparator 4 va primi din referinţa 5 tensiunea dorită ca fracţiune în raport de 1000:1 şi o va compara cu tensiunea adusă de redresorul 6, dacă rezultatul este supraunitar va comanda circuitul PWM 3 în sensul creşterii tensiunii de alimentare a circuitului 2.
2. Circuitul de putere 2 va primi comandă simetrică de la circuitul oscilator 1 şi va produce la ieşire o tensiune alternativă cu raportul 20:500 din tensiunea de alimentare a sa. Tensiunea alternativă de ieşire este proporţională cu tensiunea de alimentare primită din circuitul 3.

3. Tensiunea alternativă generată de circuitul 2 va fi redresată de redresorul-multiplicator 8 şi la ieşirea sa va fi prezentă o tensiune continuă.
4. Circuitul 7 va prelua tensiunea prezentă la ieşirea circuitului 8 şi o va injecta redresorului 6 cu un raport de 1000:1.
5. Redresorul 6 va aduce modului tensiunii primite la intrarea comparatorului 4.
6. Dacă tensiunile prezente la intrările comparatorului 4 nu sunt egale, circuitul PWM 3 va fi reglat în sensul de creştere sau scădere astfel încât să se obţină la ieşirea blocului 8 tensiunea dorită.

Tensiunea redresată obţinută de la redresorul 6 este utilizată şi pentru a indica tensiunea de ieşire a invertorului prin intermediul unui voltmetru numeric cu auto-scalare.

În etapele de experiment s-a constatat că invertorul de tensiune continuă funcţionează fără probleme în intervalul -12 kV … +12 kV şi cu un curent debitat de până la 0,5mA. Probleme deosebite au fost străpungerile ocazionale cauzate de acumulările de condens. Datorită caracterului puternic capacitiv al redresorului-multiplicator utilizat, cât şi datorită faptul ca transformatorul ridicător folosit are inductanţă relativ mică în circuitul secundar (frecventa de lucru fiind de cca 52 kHz), s-au produs defecte prin străpungerea unor diode din componenţa redresorului-multiplicator datorate depăşirii integralei de curent specifice.

Pentru a se evita acest neajuns, s-a introdus în circuit o rezistenţă de balast care limitează curentul în circuitul de înaltă tensiune la o valoare sub limita maximă permisa de diodele utilizate (20 kΩ limitează curentul de descărcare pentru 12 kV sub valoarea maxima de 1 A al diodelor utilizate). Rezistenta de balast influenţează într-o mică măsură valoarea tensiuni de ieşire pentru curenţii de pana la 0,5 mA, fiind o eroare de maximum 100 V faţă de valoarea indicată de voltmetrul numeric.

III.4.4. Generatorul de înaltă tensiune alternativă

Pentru obţinerea tensiunii alternative a fost utilizat un transformator ridicător de tensiune şi un oscilator electronic cu cuplaj inductiv. Pentru ca nivelul oscilaţiilor produse să fie controlat şi stabil a fost introdus un sistem automat de reglaj ce permite ajustarea şi menţinerea tensiunii de ieşire în intervalul 1-5kV.

Funcţionarea generatorului de tensiune alternativă poate fi descrisă după cum urmează:

1. Circuitul comparator 10 primeşte o fracţiune din tensiunea dorită la ieşire de la circuitul 12 în raport de 1:500.
2. Circuitul 11 redresează o tensiune produsă de o înfăşurare de măsură şi aplică rezultatul circuitului comparator 10.
3. Dacă rezultatul obţinut de comparatorul 10 este subunitar acesta va comanda circuitul PWM 9 în sensul creşterii tensiunii de ieşire. Aceasta se aplică circuitului auto-oscilator 13.
4. Circuitul auto-oscilator 13 conţine un transformator electric ridicător de tensiune cu raportul 20:8250. Acesta va debita o tensiune alternativă la ieşire de o valoare proporţională cu tensiunea sa de alimentare, provenită de la circuitul PWM 9.

A fost aleasă o metodă de măsurare indirectă, fără cuplaj galvanic. Metoda aceasta presupune existenţa unei înfăşurări suplimentare care, cuplată magnetic cu înfăşurarea secundară, va prezenta o tensiune indusă proporţională cu tensiunea alternativă de la ieşire. Tensiunea disponibilă în această înfăşurare este utilizată în reglajul automat al tensiunii alternative.

Transformatorul utilizat este de tip circuit magnetic cu două coloane, optim pentru plasarea separată a înfăşurărilor de joasă şi înaltă tensiune şi dispune de o ramură mobilă prin intermediul căreia se poate varia inductanţa proprie a circuitului LC rezonant prin modificarea ariei comune. În acest mod poate fi variată în limite largi frecvenţa curentului alternativ.

Sursa de alimentare propusă a fost prealabil simulată în programul Proteus CAD 8 pentru a se determina principalele caracteristici şi a se estima o bună funcţionare.

Pe parcursul simulărilor schemei electrice a sursei de alimentare au fost înregistrate date referitoare la caracteristicile funcţionale ale schemei cu ajutorul instrumentelor de măsură prezente în simulator. Astfel au fost colectate date referitoare la buna funcţionare a invertorului de tensiune continuă precum şi caracteristica de ieşire a sursei de alimentare în stare de funcţionare cu parametrii *U*cc = 10 kV şi *U*ca = 5kV.

Având în vedere că înfăşurarea secundară a sursei de tensiune alternativă se va regăsi în anumite condiţii la un potenţial foarte ridicat (+/- 12 kV proveniţi de la generatorul de tensiune continuă) faţă de miezul magnetic utilizat, trebuiesc luate măsuri specifice de izolaţie electrică. Izolatorul ales, optim pentru spaţiul disponibil ce prezintă rigiditate dielectrică suficientă este PET. Acest tip de material conferă rigiditate dielectrică ridicată optimă situaţiei în cauză. Întreaga schema electronică este alimentată de la o sursă de curent continuu cu tensiunea de 19Vcc.

III.5. Metoda de experimentare

Pentru a se determina efectul aplicării câmpului electric asupra fenomenului de condensare a vaporilor de apă a fost dezvoltată o procedură de experiment ce care are în vedere condiţiile în care se desfăşoară şi este adaptat posibilităţilor instalaţiei utilizate.

Având în vedere ca fenomenul de condensare a vaporilor de apă este complex şi este legat de factorii de mediu în care se desfăşoară, respectiv presiune şi temperatură au fost luate masuri speciale pentru ca experimentul să se desfăşoare în condiţii controlate. Totodată efectuarea unor determinări de lungă durată cu numeroase puncte de măsurare, la diferite valori de umiditate a aerului utilizat sau viteze de curgere diferite, necesitau o stabilitate a condiţiilor iniţiale riguroasă. Astfel experimentările au fost realizate în cadrul laboratorului urmărindu-se ca temperatura ambiantă să fie cuprinsă între 19-22°C şi o umiditate relativă de 40…45%RH; pentru obţinerea acestor condiţii a fost necesară utilizarea instalaţiei de climatizare a laboratorului.

III.5.1. Aplicarea câmpului electric

Pentru a estima corect tensiunea aplicată, forma de undă şi frecvenţa, pe parcursul efectuării determinărilor a fost utilizată o sondă de înaltă tensiune P6015A Tektronix, cuplată la electrodul axial al cilindrului. Sonda utilizată cu raport de divizare 1000:1 şi o bandă de trecere de 75 MHz a fost cuplată la un osciloscop cu banda de 20 MHz şi considerând raportul de divizare compus se pot înregistra valorile, polaritatea şi frecvenţa tensiunii aplicate electrodului de descărcare. Pentru uşurinţă, aparatele de măsurare a umidităţii, voltmetrul şi microampermetrul, precum şi osciloscopul utilizat în experiment, au fost înregistrate video pentru ca, mai apoi, datele colectate să fie centralizate în tabele conform condiţiilor respectivelor determinări.

Pentru determinarea contribuției aplicării câmpului electric asupra fenomenului de condensare s-au efectuat determinări atât prin aplicarea de tensiune continuă cu valori cuprinse în intervalul precizat mai sus în trepte de 1 kV cât şi combinații între tensiune continuă şi tensiune alternativă cu diverse frecvenţe, de asemenea în trepte de 1 kV. În jurul valorilor unde s-au determinat rezultate mai bune, au fost efectuate determinări prin iterație cu trepte mai mici, până la obţinerea eficienţei maxime a condensării pentru modelul utilizat. Nu în ultimul rând pentru combinaţia de tensiuni alternativă şi continuă cu eficienţa cea mai mare a fost efectuată o măsurătoare a defazajului între tensiunea alternativă şi curentul stabilit în circuit prin achiziţia simultană a tensiunii şi a curentului pe ecranul osciloscopului electronic.

III.5.2. Determinarea eficienţei condensării

În vederea determinării gradului de eficienţă al condensării s-au utilizat două aparate cu sondă de măsură a umidităţii şi a temperaturii.

În timpul experimentului s-a urmărit atingerea unei umidităţi a aerului de intrare în sistemul de condensare cât mai ridicată, valorile înregistrate fiind de pana la 90-94 RH(%).

De asemenea sistemul de răcire al reactorului de condensare a fost activat şi s-a aşteptat stabilizarea temperaturii cilindrului rece. După atingerea temperaturii dorite reactorul de condensare a fost alimentat cu aerul umidificat.

Sonda primului aparat de măsurare a umidității a fost amplasată în prima parte a traseului ascendent din sistemul de conducere a aerului umed către cilindrul de condensare. În aceasta poziție putem măsura umiditatea de intrare. În același timp s-a urmărit ca poziția sondei să nu fie un factor de perturbare a curgerii aerului umidificat, prin formarea de turbulenţe în interiorul cilindrului de condensare. Umiditatea măsurată a fost notată cu RH_{in}(%). Pentru ajustarea umidităţii RH_{in}(%) s-a utilizat vana de amestec servo electrică care a permis aducerea de aer din ambiant suplimentar în circuit.

La ieşirea din cilindrul de condensare a fost amplasată sonda celui de al doilea aparat de măsură astfel încât pe traseul din amonte să existe cât mai puţină condensare suplimentară, alta decât cea care se desfăşoară în interiorul cilindrului studiat. Valorile citite de acest aparat au fost notate cu RH_{out}(%).

III.5.3. Tipuri de determinări efectuate

Cu ajutorul instalaţiei experimentale au fost realizate determinări necesare stabilirii bunei funcţionări ale părţilor componente şi ale ansamblului întreg. Acestea au fost denumite generic „predeterminări" şi nu au fost utilizate în evaluarea experimentului ci mai exact în identificarea celei mai bune metode de efectuare a experimentului.

Pe parcursul acestor predeterminări au fost identificate pe cât posibil sursele de incertitudine ale experimentului.

Tot prin aceste predeterminări a fost stabilit un procedeu de efectuare a experimentului care să reducă cât mai mult erorile de măsurare. Pentru acest deziderat s-a ales o metodă de determinare prin mediere a rezultatelor obţinute, prin aplicarea potenţialului electric în sensul de creştere şi de scădere. Astfel s-au obţinut două seturi de determinări în aceleaşi puncte din care s-a extras media. O astfel de metodă a permis obţinerea unor rezultate mai exacte, a unor determinări repetabile.

Astfel, pe baza acestui procedeu stabilit au fost efectuate determinări ale influenţei câmpului electric şi a efectului corona asociat asupra condensării vaporilor de apă după cum urmează:

- Determinări utilizând efect corona produs cu tensiune continuă de ambele polarităţi efectuate la trei viteze de circulaţie a aerului umidificat, în scopul stabilirii influenţei vântului ionic generat de câmpul electric asupra vaporilor de apă.
- Determinări care au studiat influenţa polarităţii fenomenului corona asupra condensării vaporilor de apă. Speciile purtătorilor de sarcină produşi fiind dependente de polaritatea descărcării, s-a dorit evidenţierea afinităţii moleculelor de apă către unul din cele două cazuri.
- Un alt set de determinări a fost realizat utilizând un câmp electric alternativ de frecvenţă mare. Aceste determinări au avut scopul de a testa efectul acestui tip de câmp electric asupra condensării vaporilor de apă.
- Prin însumarea celor două tipuri de tensiuni ce pot fi obţinute de la sursa de alimentare s-au putut efectua determinări utilizând un câmp electric cu intensitate variabilă fără schimbare de sens. Astfel s-a determinat experimental un interval exact al tensiunii, un minim şi un maxim, în care dacă frecvenţa de oscilaţie este ridicată efectul de deumidificare este maxim.
- Luând valorile tensiunilor determinate anterior, frecvenţa de oscilaţie a câmpului electric a fost ajustată între anumite limite. Astfel a fost obţinuta o caracteristică grafică a îmbunătăţirii condensării în acest tip de câmp electric raportat la frecvenţa sa.
- De asemenea s-au efectuat determinări asupra formei de undă a curentului corona. A fost pus în evidenţă astfel un caracter capacitiv al reactorului de condensare ca şi sarcină electrică. Forma achiziţionată curentului a evidenţiat oscilaţii periodice de frecvenţă mare asemănătoare impulsurilor Trichel.

III.5.4. Metoda de calcul

În timpul determinărilor, pentru a se reţine apa rezultată în procesul de condensare şi pentru a influenţa cât mai puţin valorile măsurate la ieşirea sistemului, cilindrul de condensare este răcit printr-un sistem bazat pe elemente Peltier şi agent termic de răcire sub valoarea punctului de rouă. Datorita acestei metode de funcţionare în sistem există o condensare intrinseca, naturală, cauzată de prezenţa cilindrului răcit sub temperatura punctului de rouă.

Pentru a putea calcula corect rezultatele obținute pe parcursul experimentului au fost reținute valorile indicate de aparatele de măsură a umidității şi au fost considerate diferențele de umiditate dintre intrare şi ieşirea reactorului de condensare în absenţa câmpului electric ca fiind rezultatul condensării intrinseci şi notată cu „$RH_{intrinsec}(\%)$”. Ca urmare s-au extras din valorile obținute condensarea provocată de cilindrul rece, condensarea intrinsecă şi s-au reținut doar diferențele, acestea fiind notate cu indicația „Delta *RH*(%)”.

$$DeltaRH(\%) = RH_{in}(\%) - RH_{out}(\%) - RH_{intrinsec}(\%) \quad . \qquad (4)$$

În intervalul de umiditate relativă utilizat 60-94 RH(%), la intrarea sistemului, aportul adus de cilindrul rece în reducerea umidității la ieşire a fost cuprins în intervalul 9,1-10,5 RH(%). Aceasta pentru o temperatură a reactorului de condensare cuprinsă între 8,7…10,5 ^{o}C.

Diferența determinată de umiditate în experimente pentru ambele polarităţi, diversele intensităţi şi frecvenţe ale câmpului aplicate s-au redus cu acest aport intrinsec de condensare iar valorile obținute au fost considerate ca fiind numai rezultatul aplicării câmpului electric respectiv.

Acest fapt a fost dovedit şi prin întreruperea temporară, arbitrară, a câmpului electric şi observarea revenirii rapide a valorilor umidității la ieşire la valorile măsurate anterior fără câmp electric. S-au realizat seturi de determinări în ambele sensuri de variație a tensiunii, atât prin creşterea graduală a tensiunii cât şi prin scăderea ei până la valoarea de pornire notându-se valorile obținute. Pe parcursul determinărilor experimentale au fost excluse valorile reduse ale potenţialului electric care nu prezentau nici un efect evident în fenomen şi pentru care intensitatea curentului a fost sub limita inferioară de măsurare.

Capitolul IV. Rezultate experimentale

Considerând caracteristicile predeterminate ce au în evidenţă dependenţa $If_{(U)}$ (figurile 6 şi 7) la tensiuni continue, s-au efectuat o serie de experimente asupra fenomenului de condensare utilizând tensiuni continue.

IV.1. Influenţa polarităţii descărcării corona asupra condensării apei

Primul set de determinări a măsurat dependenţa între eficienţa reactorului de condensare şi polaritatea tensiunii aplicate în condiţiile utilizării a trei viteze de curgere a amestecului de aer în instalaţie (17 cm/s, 19 cm/s şi 22cm/s) şi o umiditate de intrare cuprinsă în intervalul RH 92% - RH 94%.

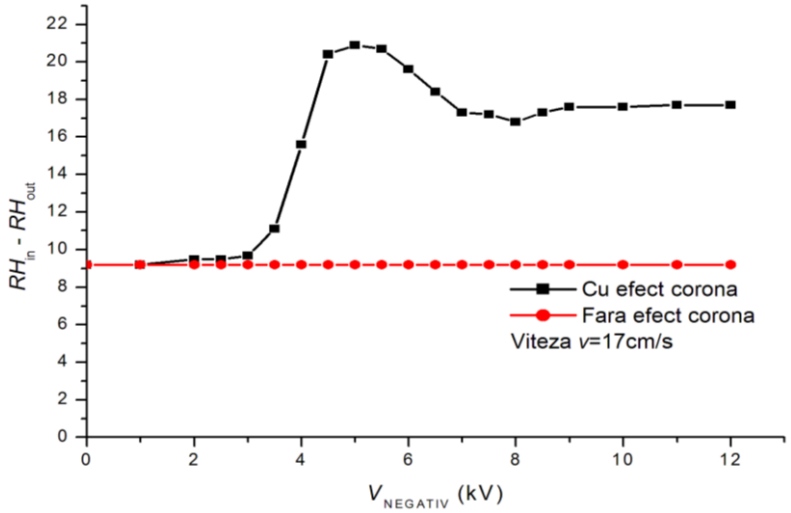


Figura 23. Caracteristica condensării vaporilor de apă la viteza v = 17 cm/s, în prezenţa efectului corona negativ.

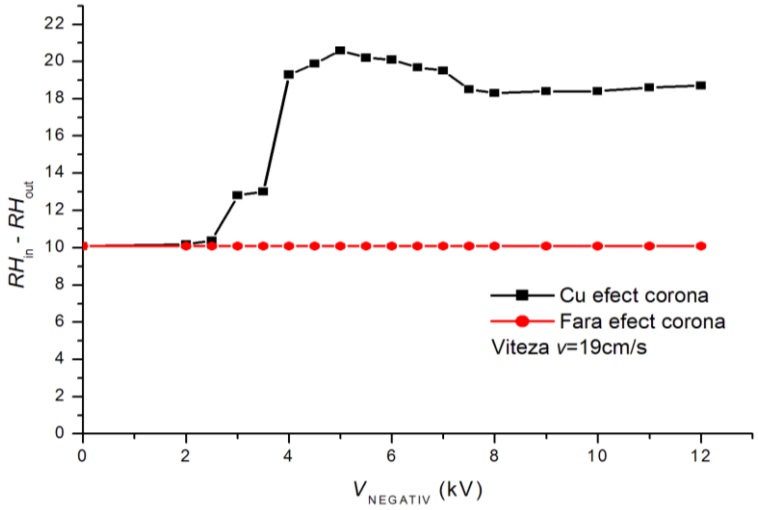


Figura24. Caracteristica condensării vaporilor de apă la viteza v = 19 cm/s, în prezenţa efectului corona negativ.

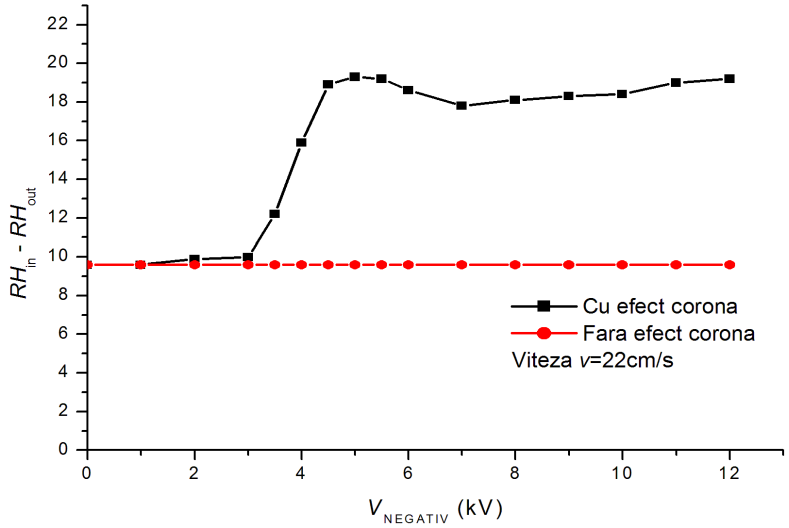


Figura 25. Caracteristica condensării vaporilor de apă la viteza v = 22 cm/s, în prezenţa efectului corona negativ.

În graficele anterioare (figurile 23 – 25) sunt prezentate modificările pe care le aduce prezenţa efectului corona negativ asupra transformării de fază ce are loc în reactorul de condensare. Abscisele graficelor exprimă valoarea tensiunii negative cu care este alimentat reactorul de condensare. Pe ordonatele graficelor este exprimată în puncte procentuale diferenţa de umiditate relativă măsurată în timpul experimentului cu aparatele de măsură specificate la III.5.2.

Astfel poate fi identificată pe grafic diferenţa dintre umiditatea aerului cu care este alimentat reactorul de condensare RH_{in} (%) şi umiditatea relativă măsurată la ieşirea acestuia, RH_{out} (%), la diverse valori ale tensiunii de alimentare.

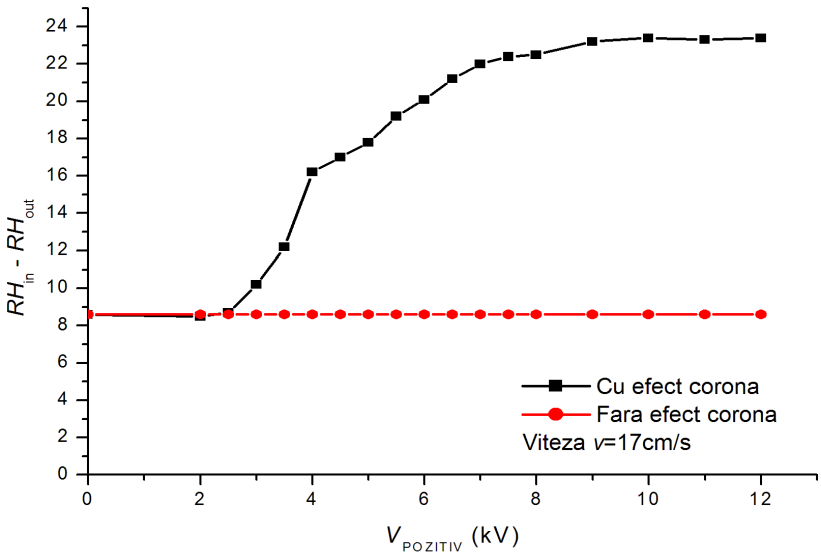


Figura 26. Caracteristica condensării vaporilor de apă la viteza v = 17 cm/s, în prezenţa efectului corona pozitiv.

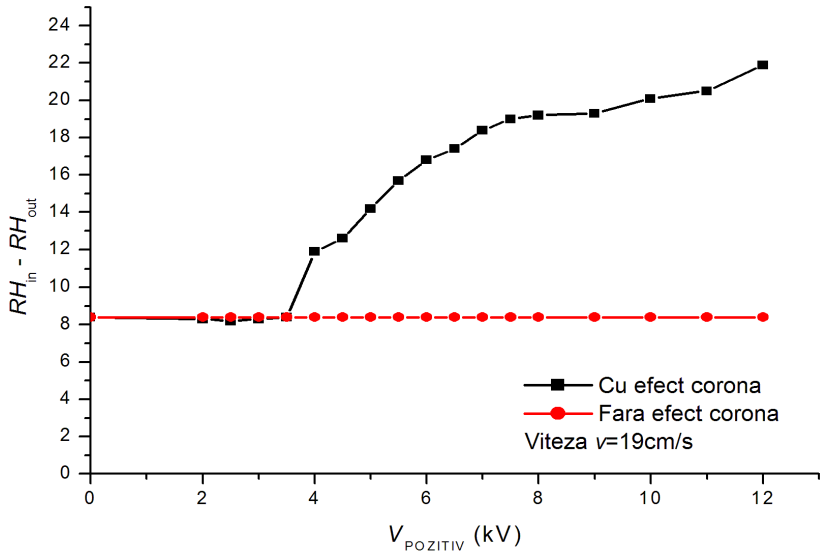


Figura 27. Caracteristica condensării vaporilor de apă la viteza *v* = 19 cm/s, în prezenţa efectului corona pozitiv.

Cele două trase prezente pe grafice, identificate prin culoare, prezintă această diferenţă în cele două cazuri posibile, respectiv cu efect corona şi prezenţă de câmp electric sau fără aceste două.

În acest mod se poate identifica cu uşurinţă îmbunătăţirea adusă procesului de condensare al vaporilor de apă prin utilizarea efectelor câmpului electric. Spre exemplu în cazul utilizării vitezei de 17 cm/s, reducerea umidităţii atinge o valoare de aproximativ 21 % prin utilizarea efectelor câmpului electric. Comparativ, reducerea obţinută doar condensarea provocată de cilindrul rece este de circa 9,5 %.

Pentru comparare sunt prezentate tot sub formă de grafice, rezultatele obţinute prin utilizarea efectului corona pozitiv în aceleași condiții în figurile 26 – 28.

O primă concluzie ce se formează după analizarea rezultatelor obţinute este că reducerea umidităţii relative a aerului măsurată la ieşirea reactorului de condensare prezintă modificări importante o dată cu apariţia fenomenului de descărcare corona, indiferent de polaritatea sa.

În ceea ce priveşte dependenţa acestei modificări în raport cu intensitatea curentului de descărcare corona s-a constatat că aceasta este puternic neliniară mai ales în cazul utilizării polarităţii negative.

Prin analizarea rezultatelor obţinute s-a constatat că rezultatele obţinute în cazul utilizării descărcării corona pozitive sunt mai bune decât în cazul utilizării efectului corona negativ.

Astfel pentru condiţii similare în cazul utilizării descărcării corona pozitive reducerea umidităţii este îmbunătăţită cu 2 -3 puncte procentuale faţă de cea obţinută prin efect corona negativ.

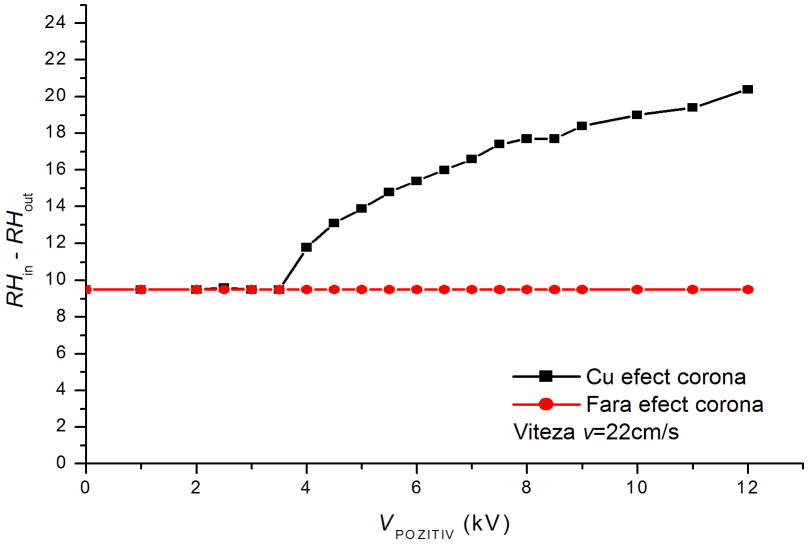


Figura 28. Caracteristica condensării vaporilor de apă la viteza v = 22 cm/s, în prezenţa efectului corona pozitiv.

Dacă se ia în considerare speciile de ioni care sunt produşi de fiecare tip de descărcare corona putem concluziona că fenomenul de condensare al apei este favorizat în special de prezenţa ionilor pozitivi. De altfel, efectul forţei dielectroforetice asupra moleculelor de apă a fost prezentat anterior în capitolul II.3.

Anterior au fost prezentate studii care au concluzionat printre altele faptul că există o îmbunătăţire suplimentară a fenomenului de condensare în prezenţa descărcării corona pozitivă raportat la cea negativă. Cauza principală a acestei diferenţe este apariţia unei forţe dielectroforetice asupra moleculelor şi micropicăturilor de apă care imprimă o mişcare ordonată spre cilindrul rece al reactorului de condensare mai ales în cazul descărcării corona pozitivă.

Forţa dielectroforetică se manifestă la interfaţa micropicăturilor de apă cu mediul (gazul) înconjurător şi le imprimă o mişcare acestora. Apa, având permitivitatea electrică relativă ε_r mult mai mare decât aerul din care este extrasă va fi împinsă de efectul dielectroforezei pozitive către zona în care sarcina spaţială are densitate mai. Efectul prezenţei purtătorilor de sarcină electrică asupra nucleaţiei anterior expus în II.2. va avea un rol important în îmbunătăţirea condensării apei.

În ceea ce priveşte efectul descărcării corona cu polaritate negativă asupra condensării apei, determinările au pus în evidenţă o scădere accentuată a beneficiilor acesteia la intensităţi mai mari ale câmpului electric. Simultan cu creşterea intensităţii câmpului electric, curentul de descărcare este mai mare şi ionii pozitivi produşi ai ionizării secundare sunt din ce în ce mai concentraţi în jurul electrodului corona şi mai depărtaţi de cilindrul rece al reactorului.

Necesitatea prezenţei ionilor pozitivi în preajma cilindrului rece al reactorului pentru a favoriza condensarea apei este confirmată de evoluţia graficelor din figurile 26 – 28.

În ceea ce priveşte viteza de deplasare a micropicăturilor de apă către cilindrul de condensare, este pusă în evidenţă o scădere a eficienţei fenomenului de condensare pe măsură ce viteza de curgere a amestecului de aer umidificat este mai mare. Fenomenul este mai

accentuat îndeosebi pentru cazul aplicării de potenţial pozitiv şi mai redus pentru potenţial negativ, panta graficelor confirmând această tendinţă.

Conform modelului analitic abordat anterior în care viteza vântului ionic calculată rezulta a fi în jurul valorii de 4,7 m/s, rezultatele obţinute nu susţin o influenţă importantă a vântului ionic asupra deplasării micropicăturilor. Cel mai probabil acest fapt se datorează ciocnirilor numeroase ce au loc la nivelul moleculelor de apă ce prezintă elasticitatea caracteristică legăturilor electrostatice precum şi al impulsului redus specific ionilor ce au masă mult mai mică decât cea a micropicăturilor de apă.

Se poate asuma şi prezumţia prin care forţa dielectroforetică este principalul motor al deplasării micropicăturilor către cilindrul rece iar prezenţa vântului ionic are o relevanţă foarte redusă.

IV.2. Influenţa descărcării corona produs în curent alternativ asupra condensării apei

Având posibilitatea utilizării unei surse de alimentare cu înaltă tensiune de o construcţie adaptată acestui tip de experiment au fost efectuate determinări asupra modificărilor ce apar în procesul de condensare al apei utilizând o tensiune alternativă sinusoidală.

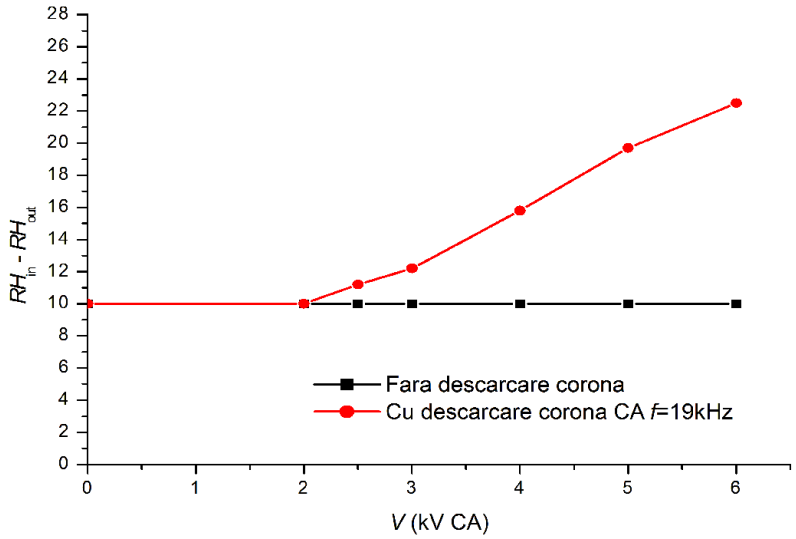


Figura 29. Caracteristica condensării vaporilor de apă în câmp electric alternativ cu efect corona la viteza v = 17 cm/s.

Acest tip de tensiune, va crea în interiorul reactorului de condensare o descărcare corona de ambele polarităţi şi un câmp electric intens, al cărui sens se va inversa la fiecare alternanţă a sa.

În figura 29 este prezentată caracteristica obţinută prin utilizarea tensiunii alternative. Tensiunea alternativă aplicată a avut frecvenţa de 19 kHz iar valorile de pe abscisă se referă la valoarea efectivă a tensiunii.

Efectul aplicării câmpului electric este vizibil asupra valorii umidităţii măsurate la ieşirea reactorului de condensare începând cu valoare de 2 kV. Caracteristica aproximativ liniară obţinută în prin acest experiment indică o îmbunătăţire a condensării vaporilor de apă sub acţiunea câmpului electric intens şi al efectului corona chiar dacă se utilizează curent alternativ.

Sarcina spaţială produsă în timpul descărcării corona de o polaritate va migra cel mai proabil la schimbarea sensului câmpului electric şi pentru o perioadă scurtă de timp în secţiunea reactorului de condensare vom avea o distribuţie mai uniformă a concentraţiei speciilor de ioni prezenţi. În cazul descărcărilor unipolare această „zonă" va avea variaţii importante ale concentraţiei purtătorilor de sarcină, aceştia fiind grupaţi în apropiera electrodului cu rază de curbură redusă.

Purtătorii de sarcină produşi de o descărcare corona în curent alternativ sunt de ambele specii însă recombinarea lor este rapidă şi ar fi de aşteptat ca influenţa asupra condensării să nu fie mare. Totuşi o influenţă suficient de notabilă este regăsită şi în acest caz precum şi în cazul anterior al descărcărilor corona unipolare.

IV.1.3. Influenţa descărcării corona produs de tensiunea continuă variabilă asupra condensării apei

Aşa cum a fost expus în capitolul III.4.2, sursa de alimentare de înaltă tensiune construită, aceasta permite aplicarea unei tensiuni provenite din însumarea a două tipuri de tensiune continuă şi alternativă.

Astfel s-au efectuat determinări prin aplicarea unei tensiuni alternative şi însumarea acesteia cu o tensiune continuă care a fost crescută treptat până la valoarea maximă la care se produc străpungeri electrice.

Pentru clarificare trebuie specificat ca fenomenul corona se desfăşoară în regim alternativ din punct de vedere al polarităţii atâta vreme cât tensiunea continuă este mai mică decât valoarea vârf-la-vârf a tensiunii alternative. După acest moment în reactorul de condensare se produce o descărcare corona unipolară a cărei intensitate este variabilă şi respectă forma şi frecvenţa curentului alternativ. Amplitudinea acestei variaţii este proporţionala cu amplitudinea curentului alternativ utilizat.

În capitolul III.5.4. a fost prezentată o metodă de calcul a eficienţei condensării şi în următoarele determinări aceasta va fi utilizată. Dacă în determinările anterioare a fost prezentă pentru exemplificare şi valoarea condensării produse de cilindrul rece al reactorului în absenţa unui câmp electric, determinările următoare o vor elimina prin metoda de calcul prezentată (3).

Această condensare intrinsecă se va produce în continuare însă pentru o prezentare cât mai clară s-a optat pentru a fi eliminată păstrându-se doar creşterea adusă de câmpul electric şi descărcarea corona.

Utilizând o tensiune alternativă cu valoarea efectivă de 2,5 kV a fost efectuată o determinare a modificării umidităţii la ieşirea reactorului de condensare prin însumarea ei cu o tensiune continuă negativă. Caracteristica obţinută este prezentată în figura 30.

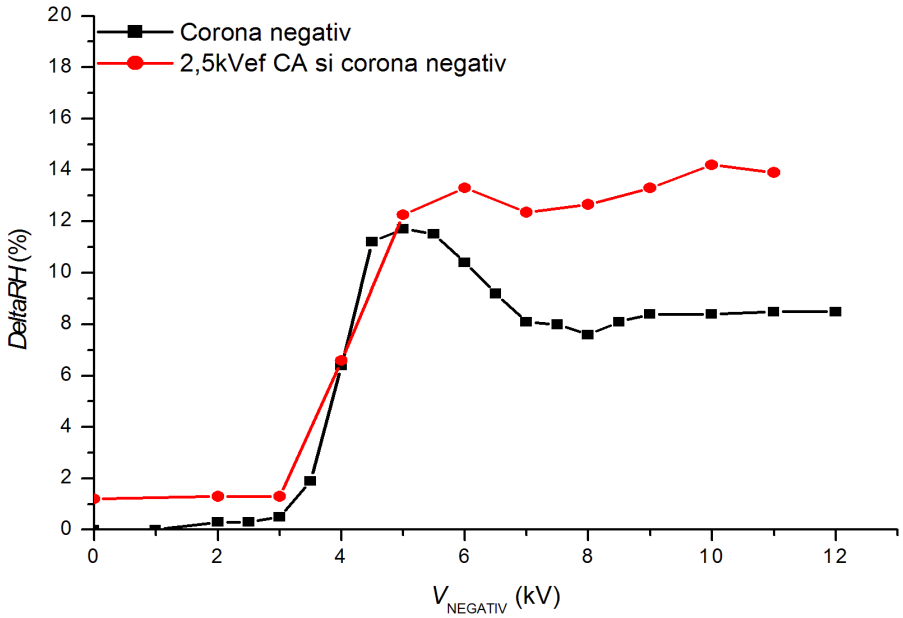


Figura 30. Caracteristica condensării vaporilor de apă în câmp electric produs de o tensiune alternativă efevtivă de 2,5 kV cu componentă continuă negativă, la viteza v = 17 cm/s.

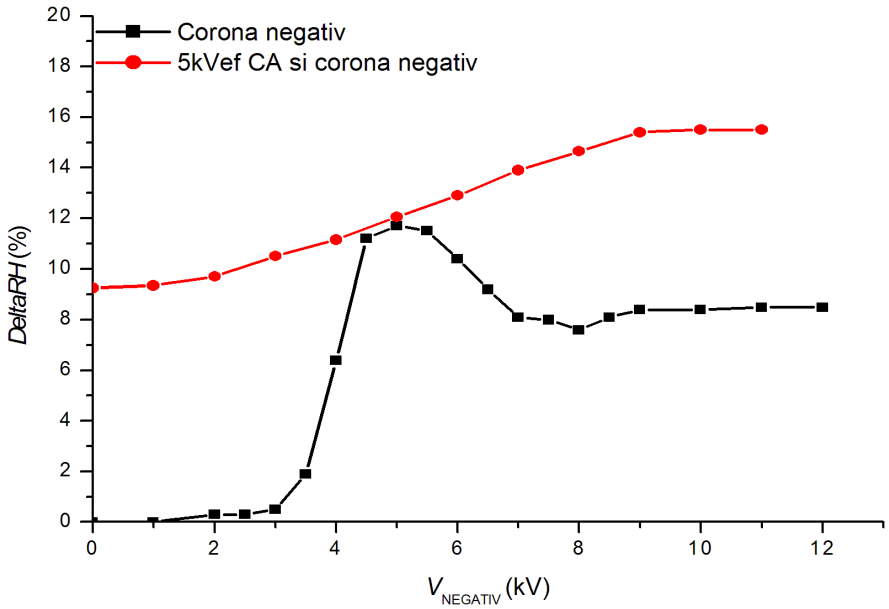


Figura 31. Caracteristica condensării vaporilor de apă în câmp electric produs de o tensiune alternativă efectivă de 5kV cu componentă continuă negativă, la viteza v = 17 cm/s.

Tot în acest grafic este trasată pentru comparare caracteristica similară obţinută prin utilizarea tensiunii continue negative fără însumare cu tensiunea alternativă.

În figura 31 este prezentată caracteristica obținută în condiții asemănătoare cu cele anterioare însă utilizând o tensiune alternativă cu valoarea efectivă de 5kV.

Rezultatele obținute relevă o liniarizare a efectului de îmbunătățire a condensării mai ales în cazul utilizării tensiunii alternative cu valoarea efectivă de 5 kV.

Panta descendentă observată în cazul utilizării efectului corona negativ (figurile 23 – 25) la tensiuni mai mari, este mult atenuată prin prezenţa tensiunii alternative. Acest efect este valabil atât pentru tensiunea alternativă efectivă de 2,5 kV cât şi pentru valoarea de 5 kV.

O îmbunătăţire a condensării este evidenţiată la valori mai mari ale tensiunii cu un maxim obţinut în jurul valorii de 11 kV curent continuu şi 5 kV curent alternativ, valoare efectivă.

Valoarea maximă de circa 15,5 puncte procentuale suplimentară condensării intrinseci, obţinută pe această cale, demonstrează că prin utilizarea câmpului electric şi efectului corona ca generator de purtători de sarcină, se poate îmbunătăţi substanţial condensarea vaporilor de apă comparativ cu un sistem clasic de răcire (cap I). În determinările efectuate pentru a se obţine caracteristicile din figurile 30 şi 31 condensarea intrinsecă produsă de cilindrul rece a avut valoarea de aproximativ 9,2 puncte procentuale, valoarea maximă a diferenţei de umiditate relativă măsurate fiind de 24,8.

Raportând valorile obţinute la condensarea produsă de cilindrul rece fără prezenţa unui câmp electric şi cele obţinute în prezenţa câmpului îmbunătăţirea este de 1,5 ori.

Folosind de această dată o tensiune continuă pozitivă s-au efectuat determinări în acelaşi mod ca şi cele expuse anterior obţinându-se rezultatele prezentate grafic în figurile 32 şi 33.

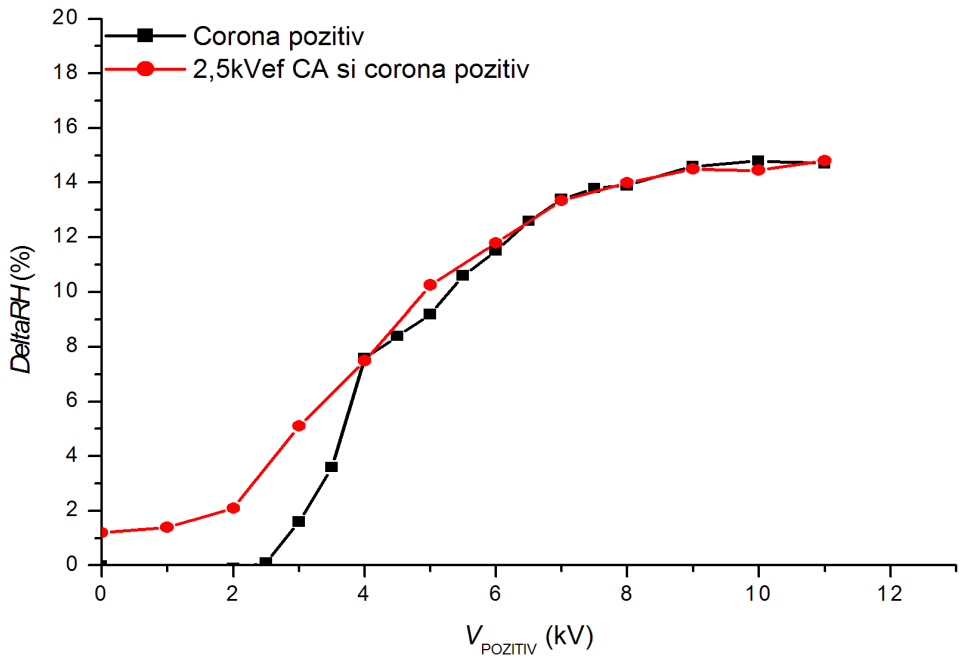


Figura 32. Caracteristica condensării vaporilor de apă în câmp electric produs de o tensiune alternativă efectivă de 2,5 kV cu componentă continuă pozitivă, la viteza v = 17cm/s.

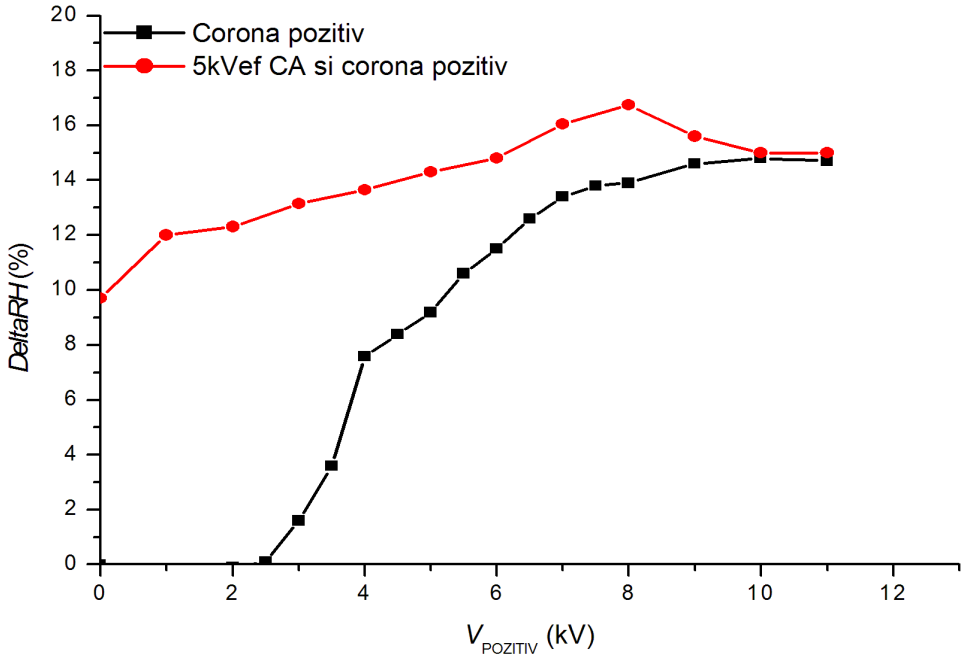


Figura 33. Caracteristica condensării vaporilor de apă în câmp electric produs de o tensiune alternativă efectivă de 5kV cu componentă continuă pozitivă, la viteza v = 17 cm/s.

Conform acestor grafice tendința de liniarizare a efectului este păstrată, ca şi în cazul determinărilor prezentate în figurile 30 – 31.

Efectul utilizării tensiunii alternative aici este mult pronunţat pentru cazul utilizări tensiunii alternative cu valoarea efectivă de 5 kV raportat la rezultatul prezentat în figura 31.

Deosebit este cazul prezentat în figura 33, în care a fost observată o creştere pronunţată a efectului în cazul în care valoarea tensiunii continue este aproximativ de 8 kV.

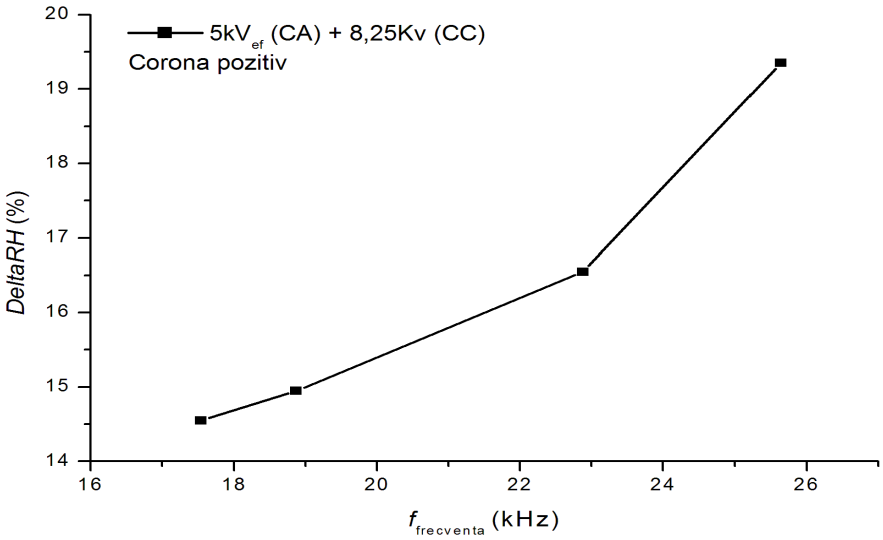


Figura 34. Caracteristica în frecvenţă a condensării vaporilor de apă în câmp electric produs de o tensiune alternativă de efectivă de 5 kV cu componentă continuă pozitivă de 8,25 kV, la viteza v = 17 cm/s.

Îmbunătăţirea obţinută în această zonă a fost de până la 16,4 puncte procentuale, mai bună faţă de cazul prezentat în figura 31 unde se utiliza descărcarea corona negativă. Pornind de la aceste valori determinate s-au efectuat experimentări repetate utilizând valori ale tensiunii continue în jurul valorii de 8 kV precum şi modificări ale frecvenţei curentului alternativ utilizat.

Graficul prezentat în figura 34 prezintă o îmbunătăţire a condensării din reactor cu până la 19,3 puncte procentuale faţă de condensarea ce se produce în absenţa câmpului electric. Raportul obţinut între condensarea intrinsecă a cilindrului rece şi creşterea suplimentară adusă de prezenţa câmpului electric variabil este de aproximativ două ori.

Această valoare a fost obţinută la o frecvenţă a curentului alternativ de 25,6 kHz, ce a fost considerată limita superioară a sursei de înaltă tensiune realizate pentru aceasta instalaţie experimentală.

De asemenea, au fost determinate pentru situaţia de mai sus formele de undă ale tensiuni şi intensităţii curentului alternativ ce parcurge reactorul de condensare.

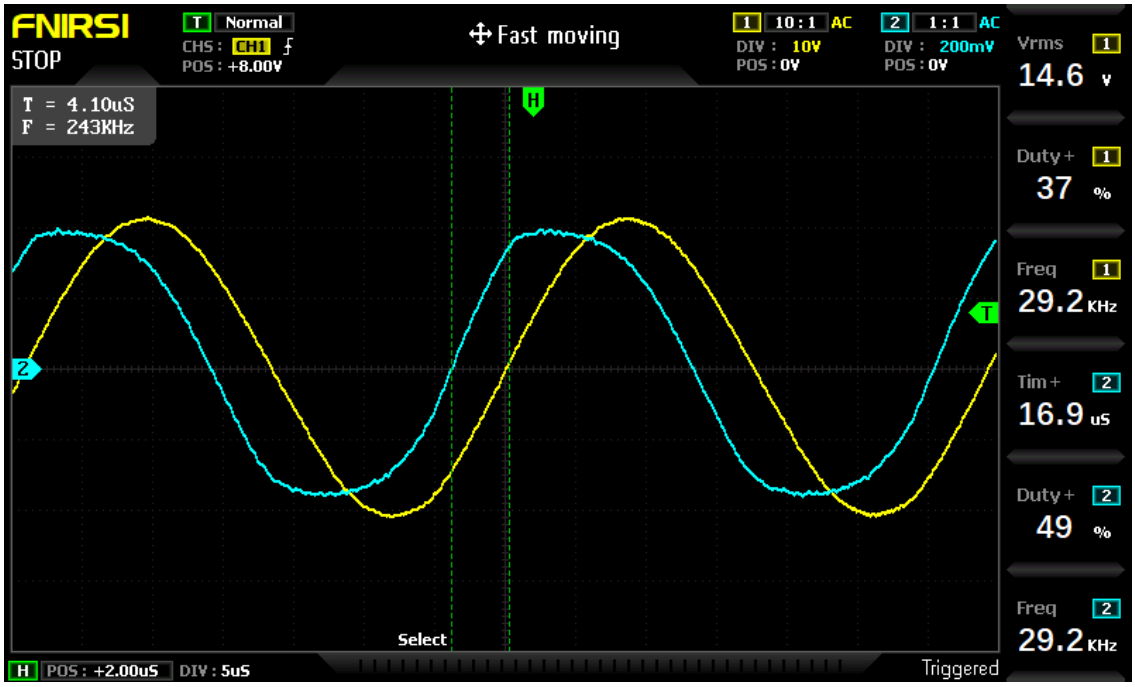


Figura 35. Formele de undă ale curentului aplicat reactorului de condensare pentru tensiune (galben) şi intensitate (albastru) la 8,25 kV cu componentă alternativă de 5 kV valoare efectivă şi umiditatea de intrare RH94%.

Determinarea a fost realizată cu ajutorul unui osciloscop cu achiziţie utilizând sonda Tektronix P6015A pentru tensiune, iar pentru a măsura intensitatea curentului a fost realizat un şunt de măsură cu rezistenţa electrică de 150Ω.

Prin această determinare specifică s-a măsurat o intensitate a curentului alternativ de 1,61mA şi un defazaj al curentului în faţa tensiunii aplicate de $\varphi=43^{o}$. Se observă caracterul capacitiv al reactorului de condensare ce în prezenţa vaporilor de apă cu ε_r ridicat faţă de cel al aerului din amestec manifestă un defazaj evident. Puterea aparentă absorbită de reactorul

de condensare pentru componenta alternativă este de 8,05 VA. Această putere determinată este parte din puterea absorbită de sistemul electrostatic, conform determinărilor anterioare din punct de vedere al componentei continue puterea absorbită este de $9{,}7 \cdot 10^{-1}$ W (8,25 kV şi 120 μA). De asemenea, a fost reţinută uşoara oscilaţie a curentului ce parcurge reactorul de condensare în zonele de intensitate maximă şi care s-au manifestat numai în cazul fenomenului corona pozitiv. Aceste mici oscilaţii pot fi asociate atât neuniformităţii descărcărilor corona pozitive cât şi impulsurilor *Trichel* [17 – 18] caracteristice descărcării corona. În încercarea de a determina frecvenţa acestor oscilaţii s-a obţinut un maxim de intensitate în jurul valorii de 1,21 MHz, oscilaţiile având o perioadă de cca 820 ns. Impulsurile Trichel caracteristice descărcărilor corona au o durată de ordinul μs iar în cazul determinărilor de faţă micile oscilaţii înregistrate au durate asemănătoare.

IV.2. Concluzii

Tema primordială a tezei de doctorat a vizat în principal studiul fenomenului de condensare a apei într-un reactor special, în prezenţa câmpului electric intens şi a sarcinii spațiale produsă de descărcările corona. În principal efortul s-a îndreptat în direcția realizării unei instalații de laborator speciale, adaptate temei propuse, elaborării unor metode şi proceduri experimentale, efectuării unui număr foarte mare de măsurători şi, nu în ultimul rând, prelucrării şi interpretării datelor experimentale obținute.

O prima concluzie importantă, ce are la bază rezultatele experimentale prezentate în lucrare, se referă la faptul că aportul adus de prezenţa descărcărilor corona (indiferent de polaritatea acestora) asupra fenomenului de condensare este unul deosebit de important. Aşa cum s-a menționat mai sus, acesta se explică prin faptul că prezenţa câmpului electric intens şi sarcina electrică spațială determină apariția acțiunilor ponderomotoare de natură electrostatică şi a forțelor de dielectroforeză care se exercită asupra particulelor cu sarcină electrică şi, respectiv, a microparticulelor şi moleculelor de apă. De asemenea, prezenţa ionilor contribuie în mod deosebit la intensificarea fenomenului de nucleație. Nu în ultimul rând, fenomenele de natură electroaerodinamică induse de descărcările corona joaca un rol important în producerea şi intensificarea fenomenului de condensare.

O alta observație importantă, care se desprinde în mod foarte clar din datele experimentale prezentate, indica faptul că în cazul aplicării unei tensiuni pozitive electrodului corona, eficienţa condensării este superioară aceleia înregistrate în cazul aplicării unei tensiuni negative. Explicațiile unui astfel de comportament au la bază natura ionilor generați de efectul corona, dar şi caracterul puternic neuniform al descărcărilor corona pozitive care se traduce practic prin existenţa unor puncte de injecție discrete situate de-a lungul firului metalic. S-a constatat că eficienţa maximă a condensării în cazul aplicării unei tensiuni continue pozitive a fost de aproximativ o dată şi jumătate mai mare în comparație cu eficienţa condensării intrinseci. În cazul descărcării negative a fost evidențiată o scădere considerabilă a eficienţei procesului de condensare pentru potențiale electrice mai mari dar şi o uşoară creştere a temperaturii de ieşire cauza probabilă fiind efectului Joule, corespunzător descărcării corona.

De asemenea, rezultatele obținute evidențiază influența vitezei de curgere a aerului umidificat prin reactorul de condensare. Odată cu creşterea vitezei de curgere a aerului este observată o diminuare progresivă a eficienţei de condensare în prezenta câmpului electric, indiferent de polaritatea potențialului electric aplicat. Desigur, acest lucru se datorează faptului că, odată cu creșterea vitezei de curgere, intervalul de timp în care aerul traversează reactorul scade.

În ceea ce priveşte utilizarea unei tensiuni alternative cu componentă continuă, rezultatele obținute indică o creștere sensibilă a eficienţei de condensare. Așa cum s-a prezentat în lucrare, ținând cont de faptul că legăturile realizate de molecula de apă sunt de natură electrostatică şi că acestea prezintă o oarecare elasticitate, aplicarea unui câmp electric variabil în timp influenţează într-o măsură importantă fenomenul de nucleaţie. Posibila explicaţie constă în elasticitatea legăturilor de hidrogen, mai slabe decât cele covalente, tipice moleculei de apă. Rezultatele obținute marchează premisele unor studii experimentale viitoare care să fie dedicate influenţei frecvenţei componentei alternative a câmpului electric asupra fenomenului de condensare. Pentru un astfel de demers, se poate anticipa nevoia generării unor câmpuri electrice de frecvenţe înalte (cu până la două ordine de mărime superioare valorii maxime utilizată în cadrul acestei lucrări).

În cele din urmă, rezultatele experimentale obținute în cadrul acestui studiu pun în evidență faptul că dezvoltarea unor instalații de control a umidității aerului sau, după caz, de recuperare a apei din procesele industriale sau din atmosfera, care sa includă elemente generatoare de câmp electric intens şi sarcină spațială reprezintă un demers corect, care poate aduce beneficii importante în ceea ce privește eficienţa de funcționare.

IV.3. Contribuţii originale

În prezenta lucrare au fost menționate mai multe elemente de noutate şi originalitate în legătură cu tema propusă, instalația de laborator realizată, procedurile experimentale şi, mai ales, rezultatele obținute.

Sintetizând, se pot menționa contribuțiile originale rezultate în urma întregii activități de cercetare efectuate pe parcursul studiilor doctorale şi concretizate prin prezenta teză:

1. Realizarea unei instalaţii experimentale de laborator pentru studiul condensării vaporilor de apă în prezenţa câmpului electric şi a sarcini spațiale. Instalaţia a fost concepută şi realizată prin mijloace proprii fără utilizarea unor module sau componente fabricate de producători industriali;
2. Realizarea unui reactor de condensare corona de construcţie originală echipat cu un sistem de răcire termostatat, ce permite studiul fenomenului de condensare un timp îndelungat (de ordinul orelor);
3. Realizarea unui sistem de producere a aerului umed saturat la temperatura ambiantă, fără utilizarea procesului de fierbere a apei;
4. Realizarea unui sistem de reglaj automat ce permite obţinerea diferitelor valori ale umidităţii relative a aerului utilizat în cadrul experimentărilor;

5. Realizarea unui sistem de măsură ce permite evaluarea exactă a eficienţei de condensare a reactorului corona utilizat în experimentări;
6. Realizarea unei surse de alimentare cu înaltă tensiune pentru obţinerea unor tipuri de înalta tensiune electrică cu amplitudine stabilizată;
7. Realizarea unor determinări ale influenţei câmpului electric intens şi a sarcinii spațiale asupra condensării vaporilor de apă în cazul aplicării unei tensiuni electrice cu frecvenţă ridicată;
8. Realizarea unor determinări experimentale referitoare la influenţa frecvenţei tensiunii electrice aplicate asupra eficienţei de condensare;
9. Realizarea şi utilizare practică a unor sisteme de monitorizarea a parametrilor electrici ai reactorului de condensare implementate în cadrul sursei de înaltă tensiune proiectate şi realizate în laborator;
10. Demonstrarea faptului că în prezenţa câmpului electric alternativ cu componentă continuă eficienţa de condensare a unui reactor corona înregistrează creșteri semnificative.
11. Trasarea caracteristicilor de eficientizare a condensării în funcţie de valorile tensiunii, frecvenţei şi polarităţii utilizate.

IV.4. Lista articolelor publicate de autor

1. S. -A. Vasiliu, C. -L. Popescu, A. Stanescu and L. M. Dumitran, "Efficiency of Water Extraction în an Electrostatic Wire-Cylinder System," 2023 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISFEE60884.2023.10637018.
2. Alex-Ştefan Vasiliu, Laurentiu Marius Dumitran, “Effect of Superimposed DC and AC Electric Fields on Water Vapor Condensation în a Corona Reactor”, Revue Roumaine Des Sciences Techniques — Série Électrotechnique Et Énergétique 70, No. 3 (August 30, 2025): 403–408. Accessed September 4, 2025. doi: 10.59277/RRST-EE.2025.3.20. Online: https://journal.iem.pub.ro/rrst-ee/article/view/1638.

IV.5. Perspective

Având în vedere doar aspectele expuse în capitolul introductiv al acestei teze de doctorat, se poate considera că subiectul abordat este unul de mare actualitate. Rezultatele experimentale obţinute pot constitui germenii unor studii asemănătoare viitoare.

Una dintre direcțiile viitoare ce poate fi dezvoltată (care nu a fost suficient investigată până în prezent) este influenţa frecvenţei câmpului electric asupra fenomenului de condensare. Este cunoscut faptul că datorită elasticității legăturilor de hidrogen, molecula de

apă prezintă un fenomen de rezonanţă la anumite frecvenţe de excitaţie. Dezvoltarea unui generator de înaltă tensiune, care să atingă frecvențe ale tensiunii alternative de ordinul MHz ar putea oferi răspunsurile la aceasta problemă.

De asemenea, dezvoltarea unor modele numerice care sa permită simularea fenomenelor complexe care au loc în astfel de reactoare, poate constitui o cale eficientă de analiză şi optimizare a eficienței acestora.

Bibliografie selectivă

[1] Krishnamachari, Badrinarayan & Mclean, James & Cooper, Barbara & Sethna, James. (1996). Gibbs-Thomson formula for small island sizes: Corrections for high vapor densities, Phys. Physical review. B, Condensed matter. 54. 8899-8907. 10.1103/PhysRevB.54.8899

[2] Parker, K.R. (1997) “Applied Electrostatic Precipitation”. First Edition, Springer, Dordrecht, 375-376. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1553-4_1

[3] Parker, K. R. (2003). Electrical operation of electrostatic precipitators (No. 41). IET.

[4] Petrescu Emil, “Fizica1, Curs 7”, Facultatea de STIINTE APLICATE (F.S.A.), Universitatea Nationala de Stiinta si Tehnologie POLITEHNICA Bucuresti, online : http://www.physics.pub.ro/Cursuri/Fizica_1_(2017)/C_07.pdf

[5] M. Reznikov, "Electrically enforced condensation related to effects of the corona discharge," 2012 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, NV, USA, 2012, pp. 1-4, doi: 10.1109/IAS.2012.6373978.

[6] IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 51, NO. 2 - Electrically Enhanced Condensation I/II, Matthew Salazar, Koiyro Minakata, and Michael Reznikov; 2015

[7] Reznikov, Michael & Salazar, Matthew & Lopez, Martin & Rivera-Sustache, Melixa. (2015). Electrically Enhanced Harvesting of Water Vapor from the Air.

[8] Yu, Fangqun. (2005). Modified Kelvin-Thomson equation considering ion-dipole interaction: Comparison with observed ion-clustering enthalpies and entropies. The Journal of chemical physics. 122. 84503. 10.1063/1.1845395

[9] Shchekin, Alexander & Podguzova, Tatyana. (2011). WITHDRAWN: The modified Thomson equation in the theory of heterogeneous vapor nucleation on charged solid particles. Atmospheric Research. 101. 493-502. 10.1016/j.atmosres.2010.10.006.

[10] Bakhtar, F & Young, J & White, Alexander & Simpson, DA. (2005). Classical Nucleation Theory and Its Application to Condensing Steam Flow Calculations. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part C-journal of Mechanical Engineering Science - PROC INST MECH ENG C-J MECH E. 219. 1315-1333. 10.1243/095440605X8379.

[11] M. Reznikov, M. Salazar, M. Page and M. Rivera-Sustache, "Further Progress in the Electrostatic Nucleation of Water Vapor," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 1, pp. 591-598, Jan.-Feb. 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2755579.

[12] Chen, J., Davidson, J.H. Electron Density and Energy Distributions in the Positive DC Corona: Interpretation for Corona-Enhanced Chemical Reactions. Plasma Chemistry and Plasma Processing 22, 199–224 (2002). https://doi.org/10.1023/A:1014851908545

[13] Lin, Y. (2008). Modeling of dielectrophoresis in micro and nano systems (Doctoral dissertation, KTH). ISBN: 978-91-7415-008-7 (print)

[14] Chia-Fu Chou, Jonas O. Tegenfeldt, Olgica Bakajin, Shirley S. Chan, Edward C. Cox, Nicholas Darnton, Thomas Duke, Robert H. Austin, "Electrodeless Dielectrophoresis of Single- and Double-Stranded DNA," Biophysical Journal, Volume 83, Issue 4,2002,Pages 2170-2179,ISSN 0006-3495, online: https://doi.org/10.1016/S0006-3495(02)73977-5.

[15] Miljkovic, Nenad & Preston, Daniel & Enright, Ryan & Wang, Evelyn. (2013). Electric-Field-Enhanced Condensation on Superhydrophobic Nanostructured Surfaces. ACS nano. 7. 10.1021/nn404707j.

[16] Ying Sun, Zhao-Xue Chen and Ying Ye, "Auto-detection of dew point using wavelet transformation," 2008 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Hong Kong, 2008, pp. 535-540, doi: 10.1109/ICWAPR.2008.4635838.

[17] Baksht, Evgeniy & Tarasenko, Victor. (2024). Instability of the Trichel Pulse Mode in a Corona Discharge. Russian Physics Journal. 67. 10.1007/s11182-024-03240-y.

[18] Shang, Kefeng & Xue, Xiangxin & Wang, Xiaochen. (2011). Trichel Pulse Characteristics in Negative dc Corona Discharge. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC. 1-4. 10.1109/APPEEC.2011.5748682.