

**Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie**

ACTA AGROPHYSICA

41

Andrzej Sumorek

**WPŁYW POLA ELEKTRYCZNEGO
NA KONWEKCYJNE SUSZENIE
ZIARNA ZBÓŻ**

Monografia

Lublin 2001

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny - prof. dr hab. Jan Gliński, czł. koresp. PAN

Z-cy Redaktora Naczelnego:

prof. dr hab. Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN - fizyka środowiska

prof. dr hab. Bogusław Szot - fizyka materiałów roślinnych

prof. dr hab. Ryszard Dębicki - gleboznawstwo

Rada Redakcyjna

prof. dr hab. J. Haman, czł. rzecz. PAN - przewodniczący

prof. dr hab. T. Brandyk

prof. dr hab. I. Dechnik

prof. dr hab. D. Drozd

prof. dr hab. F. Dubert

prof. dr hab. J. Fornal

prof. dr hab. E. Kamiński

prof. dr hab. A. Kędziora

prof. dr hab. T. Kęsik

prof. dr hab. Cz. Koźmiński

prof. dr hab. J. Laskowski

prof. dr hab. P.P. Lewicki

prof. dr hab. S. Nawrocki, czł. rzecz. PAN

prof. dr hab. E. Niedźwiecki

prof. dr hab. J. Sielewiesiuk

prof. dr hab. W. Stępniewski

prof. dr hab. Z. Ślipek

prof. dr hab. S. Zawadzki, czł. rzecz. PAN

Redaktor tomu

Dr inż. Andrzej Sumorek

Opiniował do druku

Prof. dr hab. Roman Koper

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201
20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl

Publikacja indeksowana przez

Polish Scientific Journals Contents - Agric. & Biol. Sci. w sieci Internet
pod adresem <http://saturn.ci.uw.edu.pl/psjc/> lub <http://ciuw.warman.net.pl/alf/psjc>

Publikacja finansowana z Programu Leonardo da Vinci, projekt Nr 09112/99.
Sekretariat Generalny Komisji Wspólnoty Europejskiej DG XII nie przyjmuje
odpowiedzialności za treści zawarte w niniejszej publikacji.

This publication is supported from Leonardo da Vinci grant No 09112/99.
European Commission General Directorate DG XXII does not take responsibility
for the content of this publication.

© Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2001

ISBN 83-87385-56-5

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 150 egz. Ark. wyd. 9,7

Skład komputerowy: Irena Kulawiak

Druk: Zakład Usług Poligraficznych TEKST s.c., ul. Wspólna 19, 20-344 Lublin

SPIS TREŚCI

Przedmowa do serii wydawniczej Leonardo da Vinci	5
Preface for Leonardo da Vinci editorial series	6
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	7
1. WSTĘP	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.1.1. Aspekty praktycznego wykorzystania energii pola elektrycznego w suszarnictwie	14
1.2. Przegląd literatury	5
1.2.1. Dielektryk w polu elektrostatycznym	15
1.2.2. Charakterystyka badanego medium	20
1.2.3. Wpływ pola elektrycznego na wymianę ciepła w konwekcji swobodnej	25
1.2.4. Wpływ pola elektrycznego na wymianę ciepła i masy przy suszeniu konwekcyjnym	30
1.2.5. Wpływ ozonu na energochłonność suszenia konwekcyjnego	36
2. STANOWISKO BADAWCZE	39
2.1. Budowa i zasada działania stanowiska pomiarowego	39
2.2. Sposób prowadzenia pomiarów	45
3. WYNIKI BADAŃ	51
3.1. Suszenie konwekcyjne w jednorodnym polu elektrycznym	52
3.2. Suszenie konwekcyjne w polu elektrycznym z wiatrem jonowym	54
3.2.1. Suszenie przy zmiennej w czasie wartości prądu ulotu	54
3.2.2. Suszenie przy stałej wartości prądu ulotu	60
3.3. Suszenie konwekcyjne w polu elektrycznym powietrzem z dodatkiem ozonu	66
3.4. Zestawienie wyników badań	69
3.5. Oszacowanie wpływu pola elektrycznego na energochłonność suszenia konwekcyjnego	70
3.6. Analiza statystyczna błędów pomiarowych	74
3.7. Mechanizm oddziaływania pola elektrycznego z wiatrem jonowym na proces suszenia konwekcyjnego	93
4. LICZBY KRYTERIALNE PROCESU SUSZENIA	98

5. MATEMATYCZNE MODELE STOSOWANE W ZAGADNIENIACH PRZEWODZENIA CIEPŁA I WYMIANY MASY	105
5.1. Podstawowe równania przewodzenia ciepła i wilgoci w ciałach stałych	106
5.1.1. Warunki graniczne	107
5.2. Analityczne rozwiązanie równania suszenia ciała stałego	109
5.2.1. Założenia podstawowe	109
5.2.2. Równanie suszenia jednorodnej sferoidy wydłużonej	110
5.2.3. Równanie suszenia kuli o strukturze warstwowej	114
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	122
7. PIŚMIENNICTWO	124
8. STRESZCZENIE	127
9. SUMMARY	129

Przedmowa do serii wydawniczej Leonardo da Vinci

Istotnym sektorem gospodarki regionu środkowo-wschodniej Polski jest sektor agro-spożywczy i związany z nim przemysł przetwórstwa rolniczego. Dlatego wiele działań naukowych i edukacyjnych związanych z zagadnieniami znajdującymi zastosowanie w tych dziedzinach jest podejmowanych w takich ośrodkach akademickich: jak Politechnika Lubelska oraz Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie.

Znaczna liczba ich absolwentów znajduje zatrudnienie w zakładach przemysłowych tego regionu zarówno, m.in. u partnerów w projekcie Leonardo da Vinci jakimi są Elektromontaż Lublin S.A. oraz PZL Świdnik S.A., zakładach przetwórstwa rolnego oraz w jednostkach badawczo-rozwojowych wielu instytucji. Wielu absolwentów posiadających wykształcenie w zakresie elektrotechniki współuczestniczy często w realizacji zadań badawczych, projektowych i produkcyjnych ukierunkowanych na potrzeby regionu. Poszczególne pozycje serii wydawniczej mają na celu nie tylko prezentację wyników badań, ale także mają stanowić materiał źródłowy dla inżynierów elektryków zatrudnionych w regionie i zawodowo zainteresowanych tą tematyką. Natomiast, dla uczących się na poziomie akademickiego kształcenia zawodowego w dziedzinie elektrotechniki, wydawnictwa te mogą stanowić przykład opisu praktycznej realizacji procesu rozwiązywania trudnych problemów w szeroko rozumianej dziedzinie zastosowań elektrotechniki w wybranych przez twórców projektu zagadnieniach.

W skład serii wydawniczej wchodzi następujące tytuły:

1. Horyński M.: *Wpływ pola elektrostatycznego na właściwości elektryczne ziarna zbóż.*
2. Horyński M., Oleszek M.: *Praktyki zawodowe studentów Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej w Elektromontaż S.A. w Lublinie.*
3. Pietrzyk W.: *Modele ziarniaków zbóż stosowane w analizie elektrodynamicznej i termodynamicznej.*
4. Pietrzyk W. i inni: *Urządzenia bifilarne do odpylania w przemyśle rolno-spożywczym.*
5. Sumorek A.: *Wpływ pola elektrycznego na konwekcyjne suszenia ziarna zbóż.*
6. Walusiak S., Krygier A.: *Praktyki zawodowe studentów wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej w PZL Świdnik.*
7. Wójcicka-Migasiuk D.: *Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do analizy i projektowania instalacji słonecznych ciepłej wody.*

Preface for Leonardo da Vinci editorial series

Agri - food production and processing industry is most important sector in the central - eastern region of Poland. That is why many educational and scientific activities related to the problems applied in these sectors of industry is taken up in such academic centers as Lublin Technical University and Institute of Agrophysics Polish Science Academy in Lublin.

Many graduates from the regional tertiary vocational education institutes are employed also at Leonardo da Vinci project partners i.e.: Elektromontaż Lublin S.A. and PZL Świdnik S.A, in food processing companies and in Research & Development Units in many institutes and companies. Many graduates educated in electrical engineering often co-operate in realisation of research, design and production tasks directed towards the local needs.

Particular items in this editorial series are aimed not only at the presentation of test results but also can form the reference basis for electric engineers employed in the region who are professionally interested in this field. Nevertheless, students at the level of tertiary vocational training in electrical engineering can take advantage from the described examples of practical processes of solution to difficult problems in widely understood field of electrical engineering applications in areas selected by the authors of this project entitled "*Forging development in the system of students' practical training in electrical engineering sector in the aspect of qualification needs*".

Leonardo da Vinci editorial series contains the following titles (in Polish):

1. Horyński M.: *The influence of electrostatic field on electric properties of grain.*
2. Horyński M., Oleszek M.: *Vocational practical training for students from the Faculty of Electrical Engineering, Lublin Technical University at Elektromontaż S.A. in Lublin.*
3. Pietrzyk W.: *Grain models in electrodynamic and thermal dynamic analyses.*
4. Pietrzyk W. et al.: *Bifilar devices to dust control in agri-food industry.*
5. Sumorek A.: *The influence of electric field on convective drying of grain.*
6. Walusiak S., Krygier A.: *Vocational practical training for students from the Faculty of Electrical Engineering, Lublin Technical University at PZL Świdnik.*
7. Wójcicka-Migasiuk D.: *The application of node potential method for the analysis and design of solar hot water systems.*

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

- a - odległość, m;
 a_m - współczynnik dyfuzji masy wody, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;
 a_t - współczynnik dyfuzji cieplnej, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;
 A - pole powierzchni przekroju, m^2 ;
 c - ciepło właściwe, $\text{J} (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$;
 c_z - ciepło właściwe wilgotnego ziarna, $\text{J} (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}$;
 C - indeks oznaczający otaczające środowisko;
 C_S - stała Sutherlanda;
 d - wymiar liniowy, m;
 d_r - średnica równoważna, m;
 D - indukcja elektryczna, C m^{-2} ;
 E - natężenie pola elektrycznego, V m^{-1} ;
 f - częstotliwość, Hz;
 f_e - gęstość sił elektrostrykcyjnych, N m^{-3} ;
 f_i - funkcje określone przez układ współrzędnych, nie zależą od warunków brzegowych ani od stałych rozdzielania a_j ;
 F_s - siły elektrostrykcyjne, N;
 g - prędkość masowa, $\text{kg} (\text{m}^2 \text{s})^{-1}$;
 G_A - strumień masy, g s^{-1} ;
 J - gęstość prądu elektrycznego, A m^{-2} ;
 k - współczynnik przewodzenia ciepła, $\text{W} (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$;
 L - wymiar liniowy, m;
 m - masa, g;
 m_e - masa ładunku elektrycznego, g;
 m_S - masa ciała suchego, g;
 n - liczba całkowita;
 N_1, N_2 - liczebności prób x i y ;
 $p_A(\text{gazu})$ - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w gazie suszącym, Pa;
 $p_A(\text{pow})$ - ciśnienie cząstkowe pary wodnej na suszonej powierzchni, Pa;
 p_{im} - średnie ciśnienie cząstkowe gazu niedyfundującego, Pa;
 P - polaryzacja elektryczna, C m^{-2} ;
 P_i - moc wydzielona w jednostce objętości, W m^{-3} ;
 P_k - długość obwodu kanału zwilżanego przez płyn, m;
 $P'(t)$ - wartość prawdopodobieństwa, na poziomie którego można uznać obie wartości za różne;

- Q - ciepło, J;
 q_e - ładunek cząstki, C;
 $q\%$ - współczynnik oszczędności energii, %;
 r - promień, m;
 r_1 - jednostkowe ciepło potrzebne do odparowania jednostkowej masy wody przy suszeniu bez pola elektrycznego, $J \cdot g^{-1}$;
 r_2 - jednostkowe ciepło potrzebne do odparowania jednostkowej masy wody przy suszeniu w obecności pola elektrycznego, $J \cdot g^{-1}$;
 R_I, R_{II} - promienie współśrodkowych kul różniących się między sobą współczynnikiem dyfuzji wody a_m , m;
 s_{Δ} - estymator wariancji różnicy wartości średnich;
 s_x^2, s_y^2 - wariancje zmiennych x i y odpowiednio dla prób x i y ;
 $s_{\bar{x}}^2, s_{\bar{y}}^2$ - wariancje średnich z próby odpowiednio dla prób x i y ;
 S - wyznacznik Stäckela;
 Se - bezwymiarowa liczba Senftlebena;
 t - temperatura, K;
 t_S - zmienna rozkładu Studenta dla ilości stopni swobody zależnej od liczebności próbek;
 $|t_S|$ - wartość bezwzględna zmiennej rozkładu Studenta dla porównywanych wartości średnich;
 t'_{α} - wartość graniczna funkcji dla poziomu istotności α ;
 T - temperatura bezwzględna K;
 $T(\tau)$ - malejąca wykładniczo funkcja czasu;
 T_{max} - maksymalnie dopuszczalna temperatura nagrzania ziarna, C;
 u - zawartość wody, $kg \text{ H}_2\text{O} \cdot kg^{-1}$ suchej masy;
 u_0 - początkowa zawartość wody w suszonym ciele, $kg \text{ H}_2\text{O} \cdot kg^{-1}$ s.m.;
 u_1 - zawartość wilgoci w próbce nie poddawanej działaniu pola elektrycznego w czasie suszenia, $kg \text{ H}_2\text{O} \cdot kg^{-1}$ suchej masy;
 u_2 - zawartość wilgoci w próbce poddawanej działaniu pola elektrycznego w czasie suszenia, $kg \text{ H}_2\text{O} \cdot kg^{-1}$ suchej masy;
 u_r - równoważna zawartość wody, $kg \text{ H}_2\text{O} \cdot kg^{-1}$ s.m.;
 $u^1 = \eta, u^2 = \theta, u^3 = \psi$ - rzędne w układzie współrzędnych sferoidy wydłużonej;
 U^i - funkcje współrzędnych i stałych rozdzielania a_j ;
 v_e - prędkość ładunku w polu elektrycznym, $m \cdot s^{-1}$;
 V - napięcie pomiędzy elektrodami, V;
 V_C - objętość, m^3 ;

- V_0 - napięcie progowe ulotu, V;
 w - wilgotność próbki, %;
 w_1 - wilgotność próbki ziarna po suszeniu konwekcyjnym przy braku pola elektrycznego, %;
 w_2 - wilgotność próbki ziarna po suszeniu konwekcyjnym z udziałem pola elektrycznego, %;
 \bar{x} - ubytek masy wody przy braku oddziaływania pola elektrycznego lub ozonu, wartość średnia, g;
 \bar{x}, \bar{y} - wartości średnie z prób;
 \bar{y}_{ij} - wartość średnia ubytku masy wody przy oddziaływaniu pola elektrycznego o średnim natężeniu w kV cm^{-1} równym indeksowi i w danej temperaturze w $^{\circ}\text{C}$ równej indeksowi j , g;
 α - współczynnik wymiany ciepła, $\text{W (m}^2 \text{K)}^{-1}$;
 α_k - współczynnik układu elektrod;
 β - współczynnik ściśliwości, l K^{-1} ;
 β_A - współczynnik wnikania masy, $\text{g (m}^2 \text{s)}^{-1}$;
 χ - podatność elektryczna dielektryka;
 δ - kąt przesunięcia między wektorem przesunięcia elektrycznego D względem wektora natężenia pola elektrycznego E , $^{\circ}$;
 δ_w - grubość warstwy granicznej, m;
 δ_t - współczynnik termogradientny, $\% \cdot \text{K}^{-1}$;
 δ_{A_i} - dynamiczny współczynnik dyfuzji składnika A przez gaz obojętny, $\text{g (m} \cdot \text{s)}^{-1}$;
 Δ - różnica wartości;
 Δ_m - masa wody usunięta w czasie $\Delta\tau$, g;
 ΔT - różnica temperatur, K;
 $\Delta\pi_A$ - bezwymiarowy moduł napędowy;
 ε - przenikalność elektryczna, F m^{-1} ;
 ε_0 - przenikalność dielektryczna próżni, $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$;
 ε_f - współczynnik przemiany fazowej, $\varepsilon_f = du_f / du, 0 \leq \varepsilon_f \leq 1$;
 ε_r - przenikalność dielektryczna względna;
 Φ_{ij} - funkcje współrzędnych;
 γ - stała;
 η - dynamiczny współczynnik lepkości, g (m s)^{-1} ;
 η_0 - dynamiczny współczynnik lepkości w temperaturze 0°C , $\eta_0 = 17,168 \cdot 10^{-6} \text{ kg (m} \cdot \text{s)}^{-1}$;
 $\varphi(r)$ - funkcja opisująca rozkład wilgoci;
 λ - współczynnik przewodzenia ciepła, $\text{W (m} \cdot \text{K)}^{-1}$;

ν - lepkość kinematyczna płynu, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;

ρ - gęstość ciała, kg m^{-3} ;

σ - konduktywność, S m^{-1} ;

τ - czas, s;

ω - prędkość liniowa, m s^{-1} ;

ψ - kąt przesunięcia między wektorem polaryzacji P a wektorem natężenia pola elektrycznego E , $^\circ$.

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Suszenie konwekcyjne jest często spotykane w różnych procesach technologicznych. Należy ono do procesów bardzo energochłonnych. Każdy więc czynnik, który może przyspieszyć suszenie, a często tym samym ograniczyć zapotrzebowanie na energię, ma duże znaczenie. Zmniejszenie energochłonności można uzyskać przez wybór odpowiedniej metody suszenia, racjonalne zaplanowanie procesu suszenia lub wprowadzenie dodatkowych czynników wspomagających suszenie. Jednym z czynników mogących przyspieszyć proces wymiany ciepła i masy w procesie suszenia konwekcyjnego wydaje się być pole elektryczne.

Jednocześnie należy nadmienić, że praca nie jest prostym opisem zagadnienia suszenia za pomocą energii elektrycznej tj. zjawiska opierającego się na wydzielaniu ciepła bezpośrednio w suszonym materiale. W związku z tym w pracy nie zamieszczono opisu zagadnień prostego, elektrycznego nagrzewania rezystancyjnego, w którym ciepło wydzielane jest bezpośrednio w nagrzewanym (suszonym) materiale. Podobnie pominięto suszenie w polu elektrycznym przemiennym z zastosowaniem pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych $1 \div 100$ MHz (RF) oraz mikrofalowych (powyżej 500 MHz), już wykorzystywanych w przemyśle przetwórczym.

W zakresie głównego nurtu rozważań znalazł się wpływ pola elektrostatycznego, często pomijanego ze względu na trudności z zapewnieniem bezpieczeństwa przy przemysłowym wykorzystaniu pola oraz dającego mniej spektakularne efekty niż przy wytwarzaniu ciepła przy nagrzewie rezystancyjnym czy w polu przemiennym. Jednak przy wielkim zapotrzebowaniu na energię, tak jak ma to miejsce w przypadku procesów suszarniczych, nawet procentowo niewielkie oszczędności mogą mieć globalnie znaczące efekty. Jest to powodem umieszczenia w pracy opisu efektów eksperymentów z domieszkowaniem czynnika suszącego ozonem.

Innym szczególnym zagadnieniem jest sposób podejścia do suszonego materiału. Ziarno zbóż traktowane jest jako materiał dielektryczny. Dzięki temu możliwe jest rozszerzenie rozważań na inne materiały o podobnych właściwościach elektrycznych. W rozważaniach wzięto pod uwagę charakterystyczne właściwości budowy wewnętrznej i kształt suszonego materiału. Wszystkie opisane i przeprowadzone próby eksperymentalne dotyczą rzeczywistego materiału w postaci ziarna pszenicy. O ile przy rozważaniach teoretycznych stosowano podejście do ziarna zbóż jako materiału dielektrycznego, to eksperymenty uwzględniają

charakterystyczne wymagania suszenia materiałów dielektrycznych tj. stosowanie temperatur suszenia nie powodujących zaniku właściwości siewnych ziarna i wprowadzania uszkodzeń zewnętrznych.

Już w roku 1930 Senfleben [67] zaprezentował wyniki prac dotyczących wpływu pola elektrycznego i magnetycznego na przewodność cieplną gazów. Na podstawie swoich badań stwierdził, że przy przewodzeniu ciepła przez pary sodu, pole magnetyczne na ten proces nie wywiera wpływu lub jest on niezauważalny. W przypadku pola elektrycznego, przewodność cieplna gazu rośnie wraz z kwadratem natężenia pola elektrycznego.

Dalsze badania nad wpływem pola elektrycznego można podzielić na dwie grupy:

- pierwsza z nich zajmuje się wpływem pola elektrycznego na transport ciepła w gazach,

- druga, wpływem pola elektrycznego na przebieg procesów transportu ciepła i masy w procesie konwekcji w suszonym materiale i otaczającym go ośrodku.

Zaprezentowane w kolejnych rozdziałach szerzej, zsyntetyzowane informacje nasuwają kilka przesłanek, stanowiących podstawy do prowadzenia poszukiwań badawczych:

1. Wyniki analizy matematycznej rozkładu natężenia pola elektrycznego [63,64] i sił [3], wskazują na występowanie w dielektrykach niejednorodnych sił elektrostrykcyjnych. Badania próbki umieszczonej w polu elektrostatycznym w trakcie całego procesu suszenia mogłyby jednoznacznie zweryfikować hipotezę o wpływie tego pola na zmniejszenie zdolności zatrzymywania wilgoci przez dielektryki o kształcie sferoidalnym [73].

2. Wyniki analiz Klauznicera [30] i Lykoudisa [40] stworzone w oparciu o liczbę Senflebena sygnalizują oddziaływanie na wymianę ciepła sił elektrostrykcyjnych, ale nie uwzględniają możliwości przepływu prądu przez gaz.

3. Wyniki eksperymentów Sadka [65] i Wolnego [76,77] wskazujące na przyśpieszenie wymiany ciepła i masy posługują się wyidealizowanym modelem nie mającym praktycznego znaczenia.

Ponieważ istnieją teoretyczne podstawy do innego rodzaju wykorzystania energii elektrycznej przy suszeniu dielektryków niż aktualnie znane i stosowane można postawić tezę, że pole elektryczne może mieć wpływ na kinetykę wymiany masy w procesie suszenia dielektrycznych ciał stałych. W pracy podjęto próbę praktycznej możliwości wykorzystania nowych sposobów oddziaływania pola elektrycznego na suszone dielektryki. Główne zagadnienia, na których opiera się niniejsza publikacja to:

1. Wpływ sił elektrostrykcyjnych na kinetykę suszenia [73].

2. Weryfikacja hipotezy mówiącej, że wiatr jonowy może wspomagać proces suszenia konwekcyjnego [76].

Praktyczna weryfikacja wymienionych zagadnień została wykonana w eksperymentalnym stanowisku badawczym pozwalającym na kontrolowane utrzymywanie zadanych parametrów pola elektrycznego w czasie zdejmowania charakterystyk kinetyki wymiany masy. Na bazie pomiarów możliwe było wyznaczenie współczynników obniżenia energochłonności w wybranym zakresie badawczym. W związku z tym praca ma następującą strukturę.

Rozdział pierwszy zawiera przegląd informacji dokumentujących możliwość wykorzystania zjawisk występujących w dielektrykach i otaczającym je środowisku, będących wynikiem oddziaływania pola elektrycznego, które są przesłankami do obniżenia zapotrzebowania energii w procesie suszenia. W końcowej części rozdziału określono cel, tezę pracy oraz nakreślono jej zakres.

Drugi rozdział jest opisem stanowiska badawczego, które posłużyło do weryfikacji hipotez postawionych na podstawie przesłanek teoretycznych. Zamieszczono w nim opis budowy stanowiska, charakterystykę używanej aparatury pomiarowej, jak również opis procedury pomiarowej wraz z parametrami suszonego materiału.

Rozdział trzeci prezentuje pogrupowane wyniki eksperymentalnych prób suszenia w polu elektrycznym. Prezentacja wyników wykonana została w postaci wykresów krzywych suszenia, zaś szczegółowe dane uzyskane drogą pomiarów można dodatkowo analizować na podstawie zamieszczonej w końcowej części rozdziału analizy statystycznej. Analiza statystyczna (podrozdział 3.6) opiera się na zweryfikowaniu hipotezy o różnym przebiegu procesów suszenia przy braku pola elektrycznego i w jego obecności. Dodatkowo podrozdział 3.5 zawiera wyliczone wartości współczynnika oszczędności energii konwekcyjnej procesu suszenia wspomaganego polem elektrycznym w odniesieniu do klasycznego procesu suszenia konwekcyjnego.

W rozdziale czwartym przedstawiono reprezentację liczb kryterialnych zbadanego eksperymentalnie przebiegu procesu. Dzięki nim możliwe jest porównywanie otrzymanych wyników z przebiegami innych procesów z praktyki technologii inżynierii chemicznej i suszarnictwa.

Piąty rozdział stanowi próbę matematycznego opisu zagadnień transportu masy w procesie konwekcyjnego suszenia dielektryków o kształcie sferoidy wydłużonej i kuli o strukturze warstwowej. Jest on rozszerzeniem spotykanych w literaturze opisów zagadnień przewodzenia wody w ciałach stałych.

Ostatni rozdział jest syntetycznym zestawieniem otrzymanych wyników oraz weryfikacją hipotezy badawczej postawionej na wstępie pracy. Zawiera także wskazówki dotyczące praktycznych możliwości wykorzystania opracowanej przez autora metody.

1.1.1. Aspekty praktycznego wykorzystania energii pola elektrycznego w suszarnictwie

Zagadnienia związane z suszarnictwem, w tym z powszechnie spotykanym w przemyśle przetwórczym suszeniem konwekcyjnym, stanowią nieodłączny element, z którym spotykają się inżynierowie elektrycy. Z racji wykonywanych przez nich obowiązków, niekiedy związanych bezpośrednio z samym procesem suszenia, a często z aparaturą służącą do automatyzowania lub kontrolowania procesu, inżynierowie elektrycy już na poziomie projektowania urządzeń mają wpływ na kształtowanie ostatecznego mechanizmu działania sprzętu suszarniczego.

Problemy stanowiące podstawę tej publikacji nie są tak szeroko znane jak grzejnictwo oporowe czy mikrofalowe. Skupiają się na oddziaływaniach, które zawsze, mimo że często w ilościach śladowych, mają miejsce przy oddziaływaniu pola elektrycznego.

Bieżąca pozycja może być przykładem innego sposobu spojrzenia na zagadnienie minimalizacji zużycia energii przy zastosowaniu oddziaływania pola elektrycznego. Oprócz przeglądowej prezentacji niezbyt często spotykanych zagadnień wspomagania procesu suszenia, zamieszczono w niej efekty badań eksperymentalnych wraz z opisem stanowiska badawczego. Dzięki temu możliwe jest praktyczne odtworzenie stanowiska lub wprowadzenie jego kluczowych elementów do istniejących, czy projektowanych, urządzeń suszarniczych.

Uwzględnienie wybranych elementów już w fazie projektowej pozwoliłoby na minimalizację kosztów w stosunku do urządzenia suszarniczego wtórnice wyposażanego w takie elementy. Prezentowany w pracy sposób analizy energochłonności procesu może posłużyć do oceny efektywności projektowanego urządzenia.

Zarówno studenci wydziałów elektrycznych praktycznie stykający się z problemem suszarnictwa ziarna, jak i dyplomowani inżynierowie powinni pamiętać jak krytycznym odcinkiem łańcucha technologicznego jest zachowanie odpowiedniego sposobu dosuszania wilgotnego ziarna. Straty spowodowane niewłaściwym sposobem dosuszania ziarna mogą osiągać nawet 100% [58]. W związku z tym zagadnienie doboru odpowiedniego sposobu dosuszania

wilgotnego ziarna stanowi przedmiot zainteresowań nie tylko specjalistów z dziedziny technologii zbóż.

1.2. Przegląd literatury

1.2.1. Dielektryk w polu elektrostatycznym

Analizowanie konwekcyjnej wymiany ciepła i masy, co w praktyce oznacza suszenie konwekcyjne ciała stałego, wymaga również analizy zjawisk występujących w samym suszonym medium.

Na dielektryk umieszczony w polu elektrostatycznym mogą działać dwa rodzaje sił:

- siły ponderomotoryczne, dążące do wprowadzenia ciała w ruch;
- siły elektrostrykcyjne, usiłujące zdeformować pierwotną strukturę dielektryka.

Siły elektrostrykcyjne mogą wywoływać wewnątrz dielektryka deformacje poprzez ściskanie lub rozciąganie poszczególnych warstw. Deformacja z kolei prowadzi do zmiany gęstości dielektryka, co jest bezpośrednią przyczyną zmian jego przenikalności dielektrycznej. Wartość siły elektrostrykcji \overline{F}_s można wyznaczyć z wyrażenia [3]:

$$\overline{F}_s = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int_V \text{grad} \left(E^2 \frac{\partial \varepsilon_r}{\partial \rho} \rho \right) dV_C \quad (1.1)$$

gdzie: F_s - siły elektrostrykcyjne, N; E - natężenie pola elektrycznego, $V m^{-1}$; ε_0 - przenikalność dielektryczna próżni, $F m^{-1}$; ε_r - przenikalność elektryczna względna; ρ - masa właściwa, $kg m^{-3}$; $\partial \varepsilon / \partial \tau$ - zmiana względnej przenikalności dielektrycznej wywołana deformacją ciała; V_C - objętość, m^3 .

Autorzy analizy sił elektrostrykcyjnych [3,63] posługują się gęstością objętościową sił elektrostrykcji f_e :

$$f_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \text{grad} \left(E^2 \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right). \quad (1.2)$$

Wielkość sił elektrostrykcji zależy od gęstości ośrodka i zmian jego przenikalności dielektrycznej. Może ona powodować zmiany gabarytów dielektryków o budowie niejednorodnej. Najbardziej widoczne efekty ściskania i rozciągania obiektu powinny więc zachodzić w ciałach o strukturze warstwowej i właściwościach sprężystych. Problem obliczenia i analizy sił elektrostrykcyjnych

jest złożony, ponieważ już na wstępie należy znać zależność stałej dielektrycznej od deformacji.

Poglądową próbę wyjaśnienia fizyki zjawiska elektrostrykcji i określenia rodzaju sił elektrostrykcyjnych w ziarniaku podjął Taruszkina [73]. Ponieważ ziarniak jest ciałem o niewielkich rozmiarach geometrycznych i kształcie nieregularnym, a budowa wewnętrzna jest dość złożona - niejednorodna, to pomiar efektu elektrostrykcji w ziarniaku a nawet jego oszacowanie jest zadaniem bardzo trudnym. Rysując domniemany przebieg linii sił pola elektrycznego, wewnątrz umownie przyjętych trzech słoików ziarniaka, W.I.Taruszkina przeanalizował dwa przypadki (Rys. 1.1): a) $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ oraz b) $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 > \epsilon_3$.

Rysunki te pozwoliły Taruszkini na sformułowanie następujących wniosków:

1. Siły elektrostrykcyjne powodują ściskanie jednych słoików a rozciąganie innych. Ściskanie lub rozciąganie zależy od przenikalności elektrycznej poszczególnych warstw. W przypadku, kiedy $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ (Rys. 1.1a), siły elektrostrykcyjne powodują rozciąganie wewnętrznych słoików.

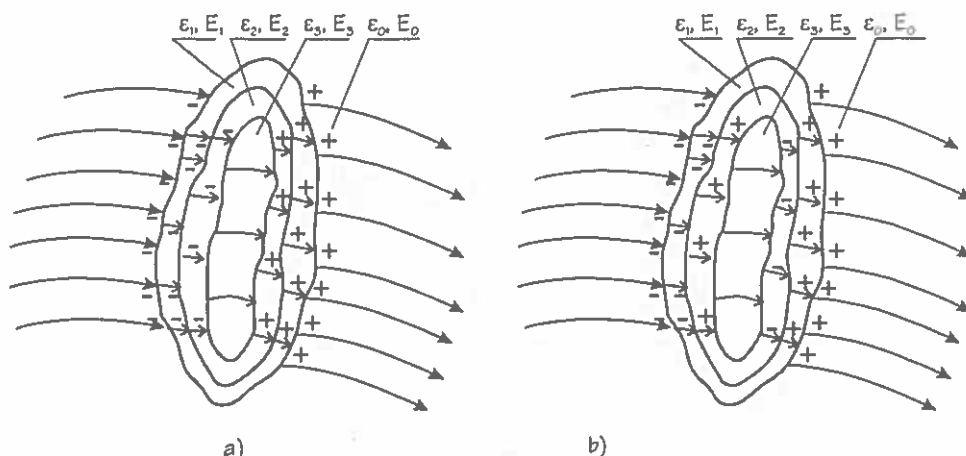
2. Wielkość siły elektrostrykcyjnej, zależy od przenikalności elektrycznej poszczególnych słoików ziarniaka. Wraz ze wzrostem różnic w przenikalnościach tych warstw, rośnie wielkość sił mechanicznych działających na nie.

3. Ściskanie i rozciąganie słoików ziarniaka prowadzi do zmiany zdolności do zatrzymywania wilgoci. Zmieniając natężenie pola elektrycznego można zmieniać te właściwości. Wykorzystanie tego zjawiska w procesie suszenia może istotnie obniżyć energochłonność procesu suszenia nasion kultur rolniczych oraz innych materiałów pochodzenia organicznego.

Wnioski są bardzo ogólne i dotyczą jedynie strony jakościowej zjawiska. Publikowane później prace [3,62,64] wykazują, że końcowa część wniosku pierwszego jest nieprawdziwa. W wewnętrznym obszarze ziarniaka ($\epsilon_0 = \epsilon_3$) siły nie występują, ponieważ jest tam pole jednorodne. Podobnie wniosek drugi jest nieuzasadniony. Obliczenia przeprowadzone w pracach [3,4] dowodzą, że wraz ze wzrostem różnic w przenikalnościach elektrycznych poszczególnych warstw, siły mogą dążyć do wartości ustalonych lub nawet do zera.

Sam Rys. 1.1 nie daje przesłanek do uogólnień zawartych we wniosku trzecim. Można go traktować jako hipotezę badawczą, której sprawdzenie wymaga badań.

Pełna analiza sił elektrostrykcyjnych występujących w dielektrykach została przeprowadzona dla ciała o kształcie sferoidy wydłużonej o strukturze warstwowej, w układzie współrzędnych sferoidy wydłużonej. W tych współrzędnych analizowana cząstka może zmieniać swój kształt od cienkiego pręta o skończonej długości, poprzez sferoidę wydłużoną, do kuli.



Rys. 1.1. Rozkład linii sił pola elektrycznego w ziarniaku, używany przez Taruszkina dla pszenicy a) $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$ oraz b) $\epsilon_0 < \epsilon_1 < \epsilon_2 > \epsilon_3$; 1, 2, 3 - słoje ziarniaka, 4 - ośrodek otaczający ziarniak (powietrze) [73].

Fig. 1. 1. Distribution of electric field in grain, used by Taruszkina [73].

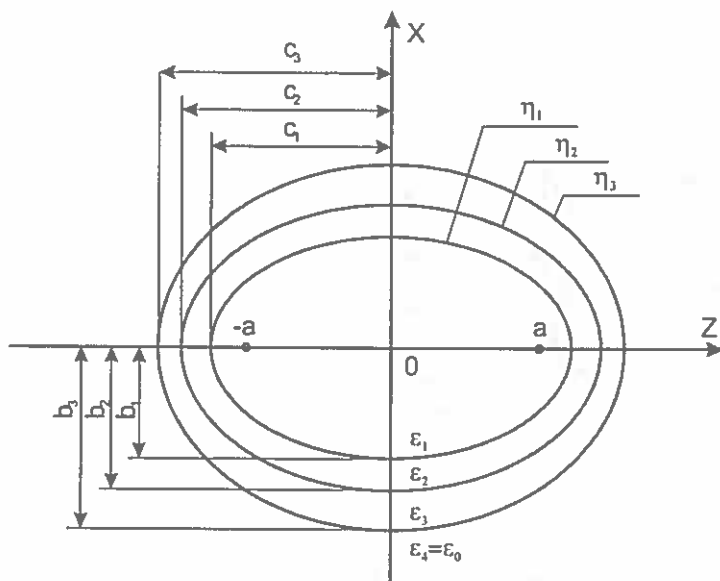
W warunkach naturalnych, ze względu na zmiany wilgotności, wraz ze zmianą rzędnej η (układ współrzędnych - Rys. 1.3), można każdy dielektryk rozpatrywać jako warstwowo niejednorodny.

Przyjęty model warstwowego dielektryka przedstawiono na Rys. 1.2. Zależność siły objętościowej f w funkcji odległości η od powierzchni sferoidy pokazano na Rys. 1.4 [3].

W przypadku dielektryka o strukturze warstwowej, na podstawie matematycznej analizy sił działających w poszczególnych warstwach, można wnioskować że:

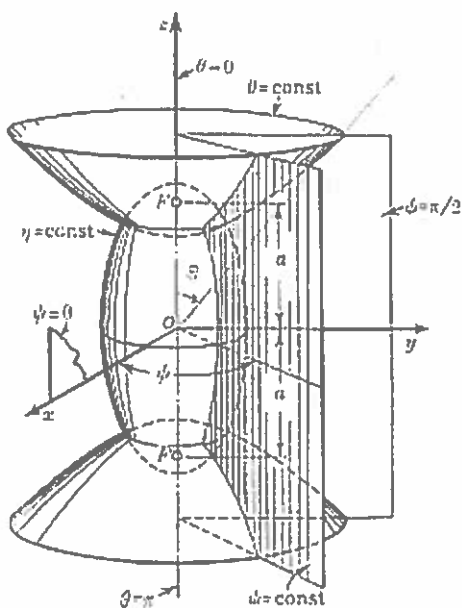
- siły elektrostrykcyjne działające na granicy warstw są skierowane do warstwy, która charakteryzuje się mniejszą przenikalnością dielektryczną;
- siły mogą rosnąć wraz z różnicą przenikalności dielektrycznych poszczególnych warstw,
- w jądrze sferoidy siły nie występują, ponieważ pole jest tam jednorodne.

Dzięki badaniom prowadzonym w Katedrze Elektrotechniki Ogólnej Politechniki Lubelskiej udało się eksperymentalnie określić charakter sił strykcyjnych na podstawie badań rezystancji próbek poddanych działaniu pola elektrycznego i działaniu sił zewnętrznych. W oparciu o porównanie charakteru zmian rezystancji próbek poddanych działaniu pola i próbek poddanych działaniu zewnętrznych sił ściskających można postawić hipotezę, że siły elektrostrykcyjne w dielektryku niejednorodnym mają charakter sił ściskających.



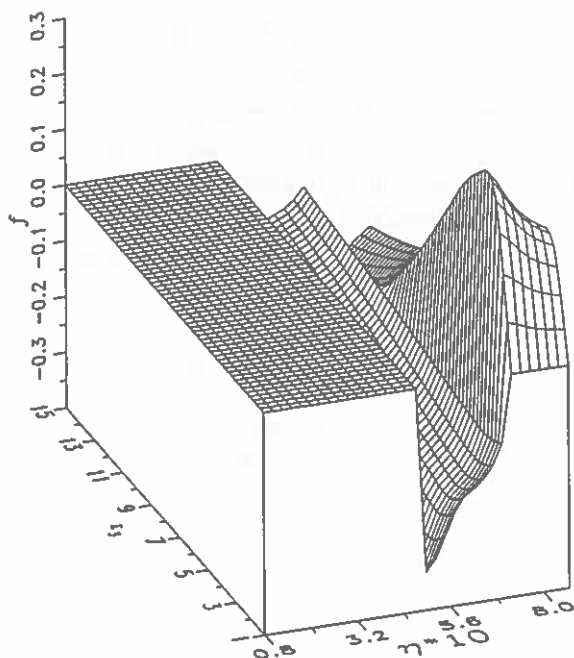
Rys. 1.2. Przekrój modelu dielektryka w formie sferoidy wydłużonej [3,62,63].

Fig. 1. 2. The cross-section of a dielectric model in the form of the elongated spheroid [3,62,63].



Rys. 1.3. Współrzędne sferoidy wydłużonej [44,45].

Fig. 1. 3. Elongated spheroid coordinates [44,45].



Rys. 1.4. Zależność gęstości sił ściskających f od współrzędnej stałej dielektrycznej ϵ_3 [3,4].

Fig. 1. 4. Dependence of volumetric stressing forces f on coordinate of dielectric constant ϵ_3 [3,4].

Taka hipoteza jest zgodna z wynikami badań analitycznych, które w swojej pracy doktorskiej zaprezentował Baran [3]. Na podstawie analizy matematycznej stwierdził on, że w dielektryku o kształcie sferoidy wydłużonej i strukturze warstwowej, poddanym działaniu pola elektrycznego, występują zewnętrzne siły ściskające, ale są one zbyt małe by spowodować makroskopową zmianę gabarytów ściskanego ciała.

Eksperymentalną ilustracją analizy matematycznej były u niego próby suszenia ziarna poddanego uprzednio działaniu pola elektrycznego. Na wstępie doświadczenia próbki umieszczano w płaskim kondensatorze podłączonym do zasilacza wysokiego napięcia i poddawano działaniu pola o natężeniu od 1 do 5 kV m⁻¹. Następnie próbki te były poddawane suszeniu w suszarce o konwekcyjnym ruchu powietrza wraz z próbkami odniesienia.

Krzywe suszenia próbek poddanych działaniu pola mieściły się w granicach odchylenia standardowego dla próbek nie poddanych działaniu pola. W związku z tym został wyciągnięty wniosek, że działanie pola nie wprowadziło zmiany w zdolności zatrzymywania wilgoci. Taki wniosek miał być potwierdzeniem tezy, że

wartość sił elektrostrykcyjnych jest zbyt niska, by powodować odkształcenie ciała w stopniu wywołującym zmianę zdolności ciała do zatrzymywania wilgoci.

Mimo negatywnych efektów doświadczeń przeprowadzonych przez Barana [3], nie można wykluczyć możliwości wpływu pola elektrycznego na zdolność zatrzymywania wilgoci. Autor ten bowiem poddawał swoje próbki działaniu pola przed suszeniem. Ewentualne naprężenia były eliminowane poprzez temperaturę (eliminacja naprężeń przez wygrzewanie) i dlatego ich wpływ mógł zostać nie uwzględniony poprzez krzywe suszenia.

1.2.2. Charakterystyka badanego medium

Ziarno zbóż jako ośrodek materialny z uwagi na swoje właściwości elektryczne zaliczany jest do dielektryków [5,63]. Podstawą dalszej szczegółowej klasyfikacji są zależności między wektorami E, D, J . Zależności między nimi opisują tzw. równania materiałowe [46].

$$D = \varepsilon E, \quad (1.3)$$

$$J = \sigma E, \quad (1.4)$$

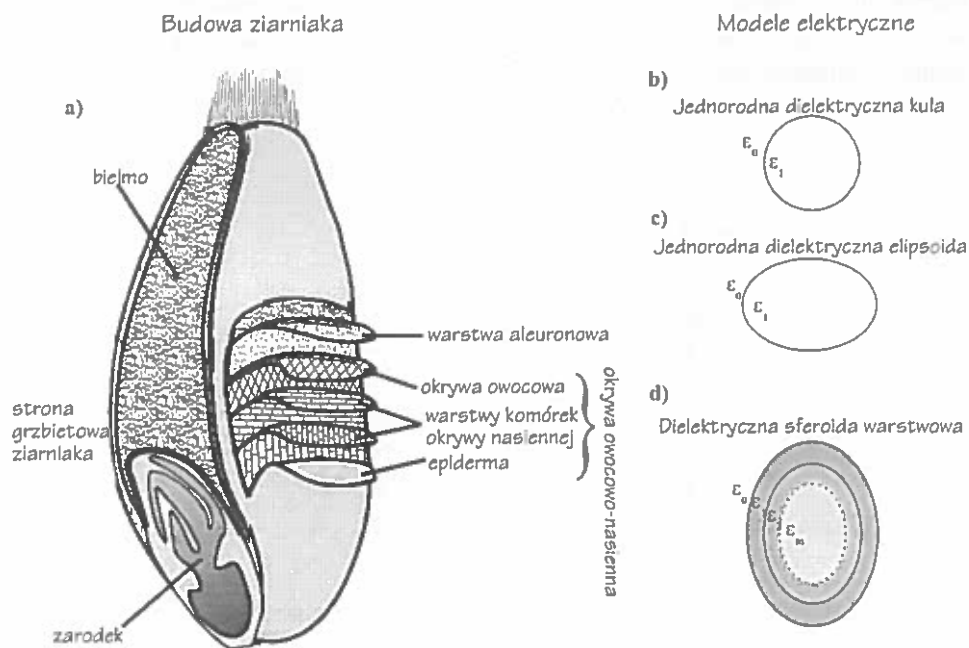
gdzie: D - indukcja elektryczna, $C\ m^{-2}$; E - natężenie pola elektrycznego, $V\ m^{-1}$; J - gęstość prądu elektrycznego, $A\ m^{-2}$; ε - przenikalność elektryczna, $F\ m^{-1}$; σ - konduktywność, $S\ m^{-1}$.

Ziarniak jest typowym przykładem ośrodka niejednorodnego. W pierwszym przybliżeniu makroskopowym jest ośrodkiem o strukturze warstwowej - niejednorodność nieciągła (Rys. 1.5d). Patrząc na niego od strony mikroskopowej, już przy niewielkim powiększeniu, można zaliczyć go do ośrodków składających się z substancji niedokładnie zmieszanych (Rys. 1.5a) [63].

Jak wykazały liczne badania, przenikalność elektryczna ziarniaków zależy również od natężenia pola elektrycznego [5,57,59]. Z tego też powodu zaliczamy je do ośrodków nieliniowych.

Przenikalność elektryczna ziarniaków zależy od częstotliwości przyłożonego pola elektrycznego [48]. Z tego punktu widzenia ziarniaki należą do ośrodków dyspersyjnych.

W rozwiązywaniu problemów elektrodynamicznych zakłada się na ogół liniowość, jednorodność, izotropowość i brak dyspersji ośrodka. W przypadku ziarn występuje jednocześnie nieliniowość, niejednorodność i dyspersyjność ośrodka. Dlatego teoretyczne opisy zjawisk powstających w ziarniaku umieszczonym w polu elektromagnetycznym napotykać na duże trudności matematyczne.



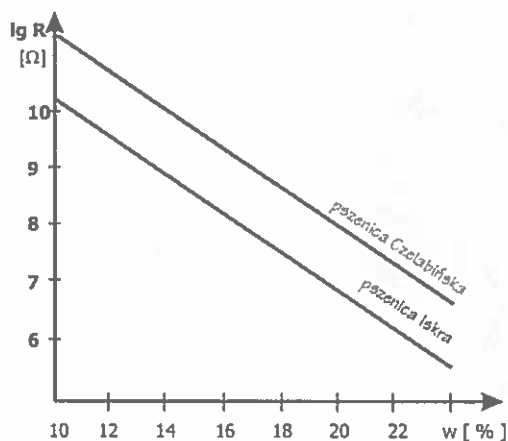
Rys. 1.5. Ważniejsze elementy budowy ziarniaka pszenicy i stosowane modele elektryczne [58,63].
 Fig. 1.5. More important elements of wheat grain structure and practical electric models [58,63].

Mimo pozornej mnogości publikacji z tego zakresu brak jest jednocześnie syntetycznego, matematycznego opisu dotyczącego opisu właściwości elektrycznych ziarna. Znane publikacje podają jedynie wyniki pomiarów najprostszych uśrednionych właściwości elektrycznych masy ziarna takich jak rezystywność, przenikalność elektryczna i tangens kąta stratności [63].

Rezystancja ziarna zależy od wielu czynników takich jak kultura roślinna, gatunek, wilgotność, natężenie zewnętrznego pola elektrycznego itp. (Rys. 1.6-1.8). Różnice w rezystancji obserwuje się nie tylko między ziarnami poszczególnych kultur, ale i pomiędzy gatunkami tej samej kultury (Rys. 1.6). Wraz ze wzrostem wilgotności rezystancja spada do wielkości rzędu $R = 10^6 \Omega$.

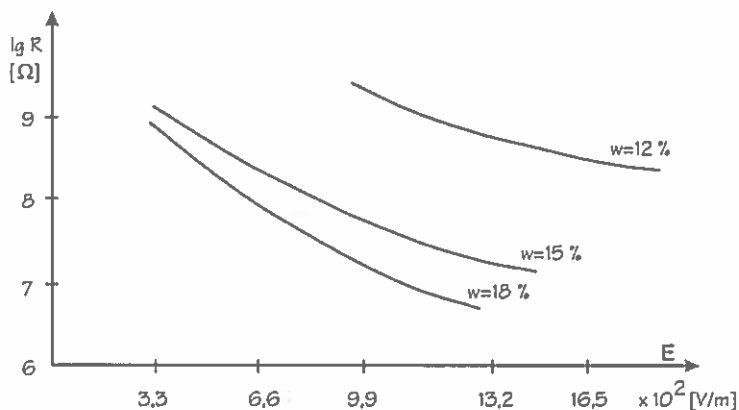
Do opisu właściwości dielektrycznych substancji, fizycy coraz częściej używają podatności elektrycznej χ , w miejsce stosowanej powszechnie przez inżynierów przenikalności elektrycznej ϵ [11]. W przypadku inżyniera interesujące jest tylko zachowanie się kondensatora w polu elektrycznym, a więc zależność między wektorem indukcji elektrycznej D i wektorem natężenia pola elektrycznego E :

$$D = \epsilon_r \epsilon_0 E \quad (1.5)$$



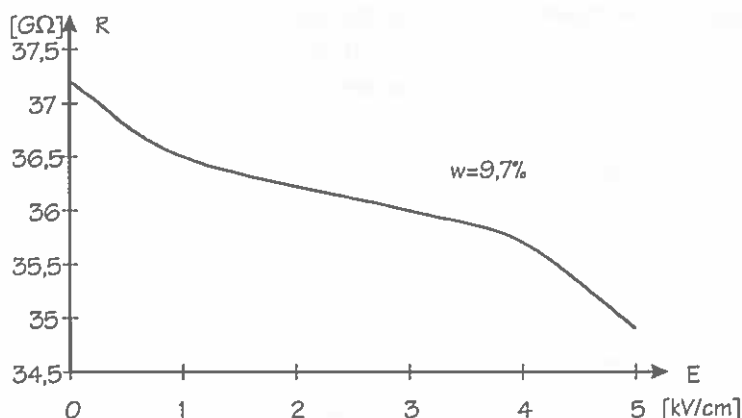
Rys. 1.6. Zależność rezystancji ziarna pszenicy od wilgotności [5].

Fig. 1.6. Dependence of resistance of wheat grain on moisture [5].



Rys. 1.7. Zależność rezystancji ziarna pszenicy od natężenia pola elektrycznego E [4].

Fig. 1.7. Dependence of resistance of wheat grain on electric field intensity E [4].



Rys. 1.8. Zależność rezystancji ziarniaka pszenicy Sigma od natężenia pola elektrostatycznego w układzie pomiarowym z przyklejonymi klejem przewodzącym elektrodami drutowymi wzdłuż dłuższej osi (przy wilgotności w = 9,7%).

Fig. 1.8. Dependence of resistance of Sigma wheat grain on electrostatic field intensity in tests with a conducting glue applied on wire electrodes along their longer axis (at moisture 9.7 %).

Dla fizyka ważny jest natomiast ośrodek znajdujący się między okładkami kondensatora. Tym ośrodkiem jest w naszym przypadku ziarno zbóż. Do opisu wielu fizycznych zjawisk, zachodzących w nim pod wpływem pola elektrycznego, istotne jest przesunięcie fazowe między wektorem polaryzacji P i wektorem natężenia pola elektrycznego E :

$$P = \chi \varepsilon_0 E, \quad (1.6)$$

gdzie: P - polaryzacja elektryczna, $C m^{-2}$; E - natężenie pola elektrycznego, $V m^{-1}$; ε_0 - przenikalność dielektryczna próżni, $F m^{-1}$; χ - podatność elektryczna dielektryka.

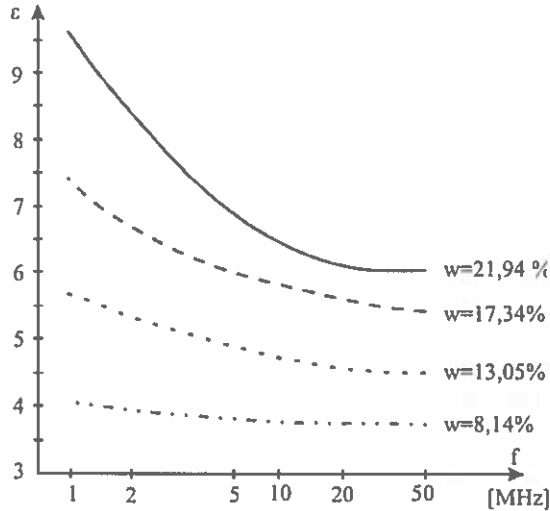
Wydaje się więc, że w przyszłych, bardziej szczegółowych badaniach właściwości elektrycznych ziarniaka, może być pożyteczne posługiwanie się podatnością elektryczną χ . Związek między podatnością elektryczną ε a przenikalnością elektryczną dielektryka jest następujący [11]:

$$\chi = \varepsilon_r - 1 \quad (1.7)$$

gdzie: ε_r - przenikalność dielektryczna względna, χ - podatność elektryczna dielektryka.

Zespolona podatność elektryczna opisuje makroskopowe właściwości dielektryka w polach elektrycznych o różnych częstotliwościach. W literaturze przedmiotu, dotyczącej badań właściwości dielektrycznych ziarniaków autorzy

posługują się jedynie przenikalnością elektryczną ϵ . Przykładowe wyniki pomiarów przenikalności elektrycznej pszenicy w funkcji częstotliwości pola elektrycznego oraz wilgotności ziarna przedstawiono na Rys. 1.9.



Rys. 1.9. Zależność względnej przenikalności elektrycznej ziarna pszenicy Solaris od częstotliwości pola elektrycznego [18].

Fig. 1.9. Dependence of relative electric permeability on electric field frequency for Solaris wheat grain [18].

W przypadku umieszczenia dielektryka (ziarna) w przemiennym polu elektrycznym wydziela się w nim energia cieplna, która jest efektem tzw. strat dielektrycznych. W fizyce dielektryków jako miary strat dielektryka używa się tzw. tangensa kąta stratności [11]:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\chi''}{\chi'}, \quad (1.8)$$

gdzie: ψ - kąt przesunięcia między wektorem polaryzacji P a wektorem natężenia pola elektrycznego E , χ' - składowa rzeczywista podatności elektrycznej, χ'' - składowa urojona podatności elektrycznej.

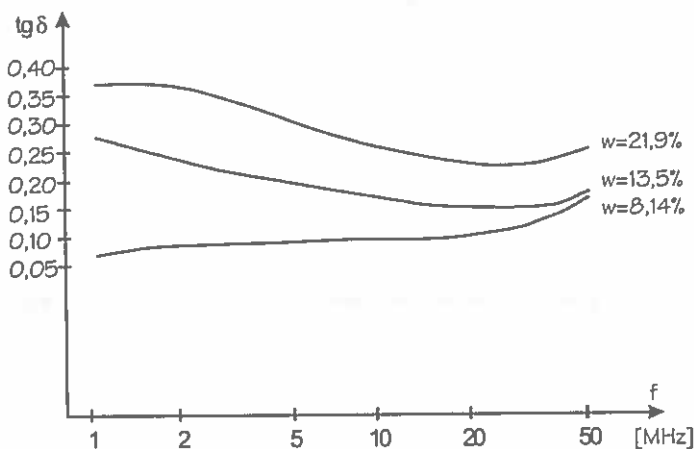
Związek między wektorem polaryzacji P i wektorem natężenia pola elektrycznego E , wyraża równanie (1.6) [11].

W technice częściej posługujemy się tangensem kąta strat [8]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \quad (1.9)$$

gdzie: δ - kąt przesunięcia między wektorem przesunięcia elektrycznego D względem wektora natężenia pola elektrycznego E , ϵ' - składowa rzeczywista przenikalności elektrycznej, ϵ'' - składowa urojona przenikalności elektrycznej.

Znajomość kąta stratności dielektrycznej nasion $\text{tg } \delta$ jest konieczna przy projektowaniu dielektrycznych urządzeń suszarniczych. Dokładne badania tej wielkości przeprowadzili Nelson i Stetson [48] oraz Hanzelik [18]. Wyniki ilustrują krzywe z Rys. 1.10.



Rys. 1.10. Zależność $\text{tg } \delta$ od częstotliwości f dla ziarn pszenicy Solaris [18].
Fig. 1.10. Dependence of $\text{tg } \delta$ on frequency f for Solaris wheat grain [18].

Jak widać, $\text{tg } \delta$ w przypadku pszenicy w niewielkim stopniu zależy od częstotliwości. W badanym przedziale częstotliwości (do 50 MHz) zmienia się w granicach od 0,05 do 0,37.

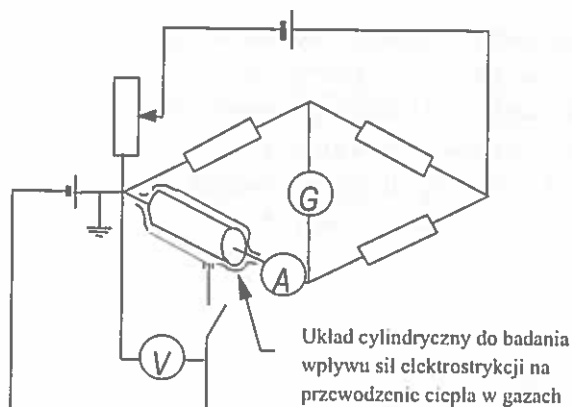
Wymienione właściwości elektryczne pozwalają zaliczyć ziarno zbóż do grupy dielektryków.

1.2.3. Wpływ pola elektrycznego na wymianę ciepła w konwekcji swobodnej

Przy badaniu zagadnień opisujących wpływ pola elektrycznego na wymianę ciepła w konwekcji swobodnej powstały dwa charakterystyczne układy.

W pierwszym, źródłem pola termicznego i elektrycznego są te same elementy układu, przez które przepływa prąd elektryczny (Senftleben [67], Lykoudis, Yu [40], Ashmann, Kronig [2], DeHann [12]) (Rys. 1.11).

W drugim źródło ciepła jest oddzielone od źródła pola elektrycznego (Sadek i inni [65], Klauznicer i inni [30]) (Rys. 1.13-1.15).



Rys. 1.11. Układ modelu analizowanego przez Senflebena [67], Lykoudisa [40], Ashmanna [2] i DeHanna [12].

Fig. 1.11. Model analyzed by Senfleben [67], Lykoudis [40], Ashmann [2] and DeHann [12].

Badacze [2,12,40,67] opierali się na teorii elektryczności i magnetyzmu, w której "naprężenia Maxwella" powodują uzupełnienie podstawowych sił poniższymi składnikami: elektrostatycznym (w odniesieniu do swobodnych ładunków elektrycznych); ponderomotorycznym (makroskopowa suma pojedynczych sił Lorentz'a w stosunku do naładowanych cząsteczek); elektrostrykcyjnym (w przypadku, kiedy stała dielektryczna jest funkcją gęstości masy); siłą spowodowaną niejednorodnością dielektryczną i jej magnetycznym odpowiednikiem; siłą magnetostrykcyjną powstającą w przypadku, kiedy przenikalność magnetyczna jest funkcją masy właściwej.

Okolo 1930 Senfleben i Brown [68] odkryli, że kiedy zostaje przyłożone radialne pole elektryczne pomiędzy poziomo położonym podgrzewanym przewodem i cylindrem, szybkość wymiany ciepła rośnie do 50%, pod warunkiem zastosowania gazu paraelektrycznego (gaz, którego cząsteczki posiadają stały moment elektryczny). Autorzy tłumaczyli ten wzrost dodatkowym termicznym przepływem wywołanym siłami elektrostrykcyjnymi. Rys. 1.11 pokazuje ogólny schemat tego doświadczenia.

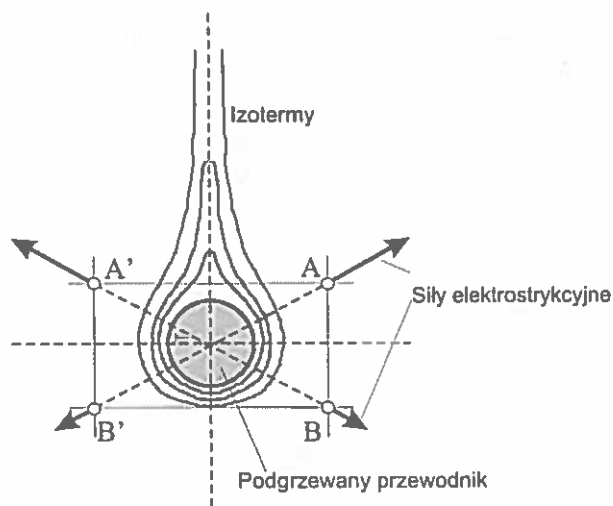
Według teorii elektrycznej polaryzacji Debey'a zmienna podatność elektryczna gazów rośnie z dwóch powodów:

- obecności pola elektrycznego - nawet w symetrycznych molekułach zaindukuje się moment dipolowy (polaryzacja elektryczna),
- jeśli dipole posiadają stały moment dipolowy (niesymetryczne molekuły), to dążą do ustawienia się zgodnie z polem elektrycznym.

Zmiana podatności elektrycznej z pierwszego powodu jest proporcjonalna do masy właściwej i odwrotnie proporcjonalna do temperatury bezwzględnej. Mechanizm ten miałby potęgować wymianę ciepła w przypadku konwekcji swobodnej w niejednorodnym polu elektrycznym.

W prezentowanym układzie przewód (źródło ciepła i pola elektrycznego) umieszczony był w cylindrze. Każdorazowo obserwowany był wzrost intensywności wymiany ciepła pomiędzy przewodem a cylindrem, w porównaniu z przypadkiem braku występowania pola elektrycznego. Analizę zjawiska oparto o założenie istnienia w otoczeniu cienkiego przewodu „pierścienia przewodzącego ciepło”. Ruch ciepła wewnątrz pierścienia opiera się nie o konwekcję, ale o przewodzenie.

Wzrost strumienia ciepła przypisywano siłom elektrostrykcyjnym działającym w gazie otaczającym źródło ciepła. Mechanizm działania sił elektrostrykcyjnych w gazie w przypadku konwekcji swobodnej pokazuje Rys. 1.12. Siły elektrostrykcyjne F_e działają promieniowo w kierunku na zewnątrz przewodnika. Siły w punktach A i A' są większe od występujących w punktach B i B' ze względu na to, że przez punkty A i A' przechodzą izotermy o większych wartościach.

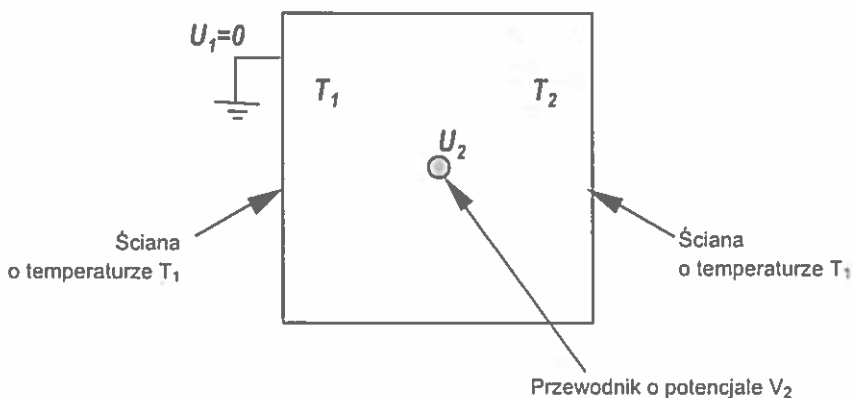


Rys. 1.12. Mechanizm wpływu sił elektrostrykcyjnych przy naturalnej konwekcji termicznej [40].
Fig. 1.12. Mechanism of ponderomotive forces influence a natural thermal convection [40].

Analizowany przez Lykoudisa [40], Ashmanna [2] i DeHanna [12] model przewodzenia ciepła w gazach, który uprzednio zaproponował Senftleben, posiada pewne braki. Mianowicie w badanym doświadczalnie przez siebie przypadku, nie zwrócono uwagi na możliwość występowania prądu ulotu pomiędzy badanym

przewodnikiem a otaczającym go układem, zaś cały wpływ pola elektrycznego na zmianę szybkości wymiany ciepła przypisano siłom elektrostrykcyjnym w gazie. Wprowadzona do analizy bezwymiarowa liczba Senftlebena, która (jeżeli chodzi o wielkości ważne przy analizie pola elektrycznego) zawiera jedynie wartość natężenia pola i średnicę nagrzewanego przewodu. Nie uwzględnia natomiast możliwości przepływu prądu przez ośrodki gazowe. W opisie układu badawczego Senftlebena i Brauna [67], zamieszczono informację, że wewnętrzny przewód miał średnicę 0,03 mm, cylinder, który otacza przewód, miał średnicę 34 mm. W cylindrze znajdował się gaz (argon, tlen, chlorek etylu) pod ciśnieniem $87 \div 740$ mm Hg poddany działaniu pola elektrycznego o natężeniu od 42 do 108 kV cm^{-1} na powierzchni przewodu. Już samo porównanie średnic przewodu i cylindra pokazuje, że współczynnik niejednorodności pola elektrycznego osiąga wartość około 160 [16]. Wartość natężenia pola elektrycznego oraz jego niejednorodność stwarzają warunki pojawienia się zjawiska ulotu, a nawet przeskoku. Podobne warunki występują także w przypadku doświadczenia Ashmanna i Kroniga [2]. Średnica nagrzewanego drutu wynosi $20 \mu\text{m}$, średnica cylindra 4 cm, a napięcie pomiędzy nimi jest rzędu 500 V.

Innym znanym układem jest taka konfiguracja źródła ciepła, aby nie było ono równocześnie źródłem pola elektrycznego. W przypadku prezentowanym na Rys. 1.13 konwekcja zachodzi w zamkniętej szczelinie pionowej o przekroju kwadratowym. W środku szczeliny umieszczony jest przewód o potencjale U_2 , zaś obudowa szczeliny jest uziemiona. Taki układ wytwarza niejednorodne pole elektryczne, symetryczne względem osi przechodzących przez środek przewodnika.



Rys. 1.13. Układ modelu analizowanego przez Klauznicera [30].

Fig. 1.13. Model analyzed by Klauznicer [30].

Powierzchnie pionowe ograniczające układ są izotermiczne. Temperatura jednej - T_1 jest większa niż temperatura drugiej - T_2 . Na powierzchniach poziomych temperatura zmienia się w sposób liniowy.

Przeprowadzona przez Klauznicera [30] analiza numeryczna procesu wymiany ciepła pomiędzy płaszczyznami również wskazuje na możliwość zwiększenia intensywności wymiany ciepła w przypadku występowania pola elektrycznego. Podobne wnioski wysnuli O'Brien i Shine [50] bazując na wynikach eksperymentalnego badania konwekcji swobodnej wokół pionowej płyty. W przypadku O'Brien'a i Shine'a, pole elektryczne skierowane było prostopadle do płyty, zaś gazem omywającym płytę było powietrze, dwutlenek węgla i azot.

Wyniki symulacji numerycznych Klauznicera nie mają bezpośredniego odpowiednika w postaci wyników badań eksperymentalnych. Sama metoda analizy od razu zakłada wpływ pola elektrycznego przez wprowadzenie do obliczeń bezwymiarowej liczby Senftlebena (Se), charakteryzującej wpływ pola elektrycznego, analogicznej do liczby Grashoffa charakteryzującej wpływ pola grawitacyjnego. Liczbę Senftlebena określa zależność [30,40]:

$$Se = \frac{\beta \gamma \Delta T E^2 L^2}{\nu^2}, \quad (1.10)$$

gdzie: Se - bezwymiarowa liczba Senftlebena, β - współczynnik ściśliwości, 1 K^{-1} ; γ - stała określająca zależność od podatności elektrycznej płynu χ ; ΔT - różnica temperatur, K; E - natężenie pola elektrycznego, V m^{-1} ; L - wymiar liniowy (np. szerokość szczeliny), m; ν - lepkość kinematyczna płynu, $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Przy obliczeniach od razu założono istnienie wpływu pola elektrycznego. Obliczana numerycznie wartość liczby Nusselta (liczba kryterialna charakteryzująca wymianę i przewodzenie ciepła) była funkcją, w której jeden ze składników był liczbą Senftlebena. Przeprowadzona analiza ujawniła w efekcie założoną przez autorów [30] ogólną intensyfikację wymiany ciepła oraz pewne szczególne warunki, w których może dojść do obniżenia szybkości wymiany ciepła w obecności pola elektrycznego (przy równoczesnej kombinacji liczb Rayleigha rzędu 20000 ÷ 60000 i Senftlebena 100 ÷ 600).

Przytaczane prace Senftlebena [67], Lykoudisa [40], Ashmanna [2], DeHanna [12], O'Brien'a [50] i Klauznicera [30] zajmują się zagadnieniem wpływu pola elektrycznego przy przenoszeniu ciepła w konwekcji swobodnej. Prawie każdorazowo sygnalizowana jest intensyfikacja wymiany ciepła w obecności pola elektrycznego. Intensyfikacja wymiany ciepła przypisywana jest występowaniu sił elektrostrykcyjnych w gazach, co powoduje dodatkową cyrkulację przyspieszającą przekazywanie ciepła.

Niestety ani dane opublikowane przez wymienionych wcześniej badaczy, pochodzące z eksperymentów ani z symulacji numerycznej, nie uwzględniają zjawisk wyładowań w gazach, które mogą wystąpić w stosowanych układach pomiarowych.

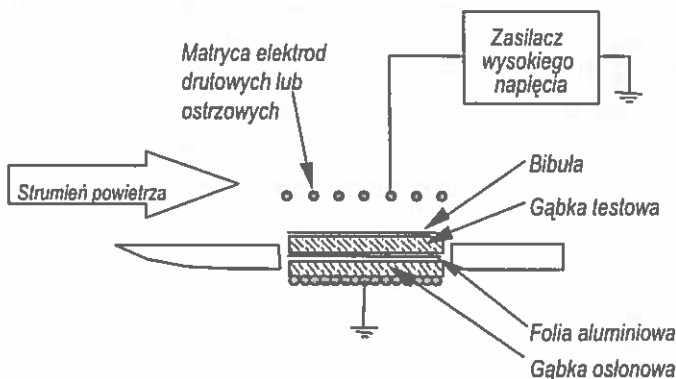
Dodatkowo analiza dotyczy konwekcji swobodnej czyli przypadku praktycznie niespotykanego w praktyce suszarniczej dielektryków pochodzenia roślinnego. Praktycznie korzysta się z wymuszonego obiegu czynnika suszącego o temperaturze znacznie wyższej w stosunku do temperatury suszonego wsadu.

1.2.4. Wpływ pola elektrycznego na wymianę ciepła i masy przy suszeniu konwekcyjnym

Wyniki badań wpływu pola elektrycznego na zjawiska towarzyszące konwekcyjnemu usuwaniu wody z powierzchni ciał płaskich (Rys. 1.14) i o kształcie walcowym (Rys. 1.15) można znaleźć w pracach Sadka [65], Wolnego [76] i Wolnego, Kaniuka [77].

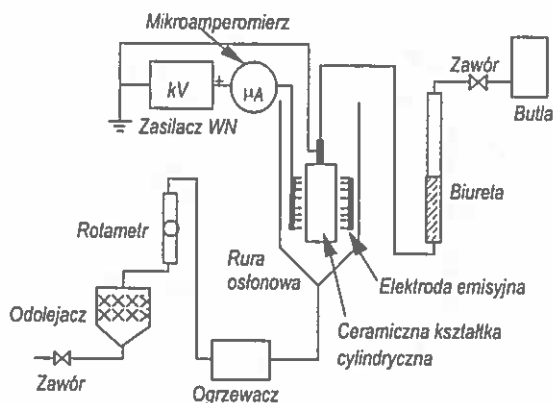
Stanowiska badawcze były tak skonstruowane, że z góry stworzono warunki do występowania wyładowań niezupełnych. Dodatkowo oprócz napięcia pomiędzy elektrodami mierzony był prąd ulotu. Wykonywano badania porównawcze: jedna seria badań prowadzona była w obecności pola elektrycznego z ulotem, druga porównawcza, bez takiego oddziaływania.

Układy elektryczne stosowane w tych przypadkach można zakwalifikować do grupy układów typu ostrze- płyta. Taka klasyfikacja wydaje się być poprawna zarówno przy analizie odparowywania wody z powierzchni płaskiej, jak



Rys. 1.14. Schemat stanowiska do badania wpływu wiatru jonowego na szybkość odparowania wody z powierzchni płaskiej [65].

Fig. 1.14. Test stand for the influence of ionic wind on water vaporization speed from flat surface [65].



Rys. 1.15. Schemat stanowiska do badania wpływu wiatru jonowego na szybkość odparowania wody z powierzchni cylindrycznej [76].

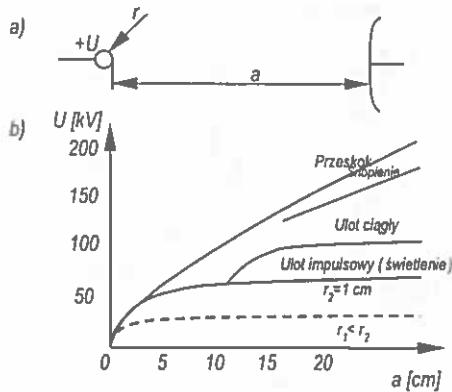
Fig. 1.15. Test stand for the influence of ionic wind on water vaporization speed from cylindrical surface [76].

i cylindrycznej. Powierzchnię cylindryczną można w przybliżeniu rozpatrywać jako płaską z powodu jej małego promienia krzywizny (25 mm) w porównaniu z krzywizną ostrzowych elektrod emisyjnych (0,05 mm).

W układzie ostrze-płyta o polu bardzo niejednorodnym napięcie początkowe U_o (U_o - napięcie krytyczne powodujące wystąpienie pola elektrycznego o natężeniu E_o , które w polu jednorodnym inicjuje wyładowanie) jest mniejsze od napięcia przeskoku U_p [16]. Napięcie przeskoku U_p w układzie o polu niejednorodnym jest mniejsze od napięcia przeskoku w polu jednorodnym przy takim samym odstępnie międzyelektrodowym. Jeżeli do układu (Rys. 1.16a) zostanie doprowadzone napięcie utrzymujące się pomiędzy napięciem krytycznym U_o , a napięciem przeskoku U_p , to w przestrzeni międzyelektrodowej wystąpi przejściowe lub ustalone wyładowanie niezupełne. Wyładowanie to ogranicza się do obszaru o największym natężeniu pola i nazywane jest wyładowaniem ulotowym lub koronowym.

Rozwój wyładowania zależy od biegunowości elektrody ulotowej. Jeżeli więc w układzie ostrze-płyta napięcie utrzymywane będzie pomiędzy napięciem początkowym, a napięciem przeskoku, to elektrony swobodne, jony powstające w wyniku zderzeń elektronów z cząsteczkami oraz jony będące wynikiem zjonizowania gazu w otoczeniu elektrody ostrzowej będą przemieszczane w kierunku elektrody o przeciwnym znaku.

Gęstość sił elektrycznych działających w ośrodku dielektrycznym jest ogólnie sumą sił Coulomba i polaryzacji. Siły Coulomba są wynikiem wzajemnego oddziaływania



Rys. 1.16. Układ ostrze- płyta i typy wyładowań w funkcji promienia i odl. elektrod [16].

Fig. 1.16. Pin and flat electrode systems and types of discharge versus radius and the distance between electrodes [16].

ładunków swobodnych z występującym polem elektrycznym, przez co ładunki indywidualnie przekazują swoje siły do neutralnego ośrodka. Siły polaryzacji pojawiają się w przypadku, kiedy do ośrodka przekazywane są siły elektryczne pochodzące od par ładunków (dipoli). Klasyfikacja sił polaryzacji zależy od tego, czy wynikają z niejednorodności polaryzowalności ośrodka czy z koncentracji polaryzowalności wywołanej występowaniem ładunkiem objętościowym (siły elektrostrykcyjne) [65].

Kiedy do elektrody składającej się z matrycy przewodów lub ostrzy zostanie przyłożony potencjał V , gaz w otoczeniu elektrody zostanie zjonizowany. Wygenerowane jony będą przyśpieszane siłami Coulomba w kierunku elektrody o przeciwnej biegunowości. W trakcie ruchu jony zderzają się z niezjonizowanymi cząsteczkami gazu, z którymi wymieniają pęd. Zjawisko generowania jonów w polu elektrycznym o wysokim natężeniu oraz ich ruch z wymianą pędu z innymi cząstkami nosi nazwę wiatru jonowego. Siła F_c intensyfikująca przebieg procesu suszenia, pochodząca od wiatru jonowego, opisywana jest przez autorów [65,76] równaniem:

$$F_c = \alpha_k \epsilon A \left(\frac{V - V_o}{a} \right)^2, \quad (1.11)$$

gdzie: α_k - współczynnik układu elektrod ($\alpha_k = 8/9$ dla elektrod równoległych); ϵ - przenikalność elektryczna powietrza, $F m^{-1}$; A - powierzchnia elektrody płaskiej, m^2 ; V - napięcie pomiędzy elektrodami, V; V_o - napięcie progowe ulotu, V; a - odległość pomiędzy elektrodami, m.

Napięcie V_0 jest napięciem progowym, przy którym prąd ulotu jest nieznaczący. W dowolnym układzie elektrod napięcie progowe V_0 można wyznaczyć przez wykreślenie wartości pierwiastka z prądu ulotu w funkcji wartości różnicy potencjałów między elektrodami V . Wartość progowa napięcia wyznaczona jest w punkcie przecięcia ekstrapolowanej krzywej z zerowym prądem ulotu [65].

Dla porównania, w układzie elektrod równoległych, w którym występuje strefa niejednorodności gazu (w przypadku, gdy warstwa graniczna gazu sąsiaduje z suszonym materiałem umieszczonym na uziemionej elektrodzie) siła polaryzacji F_p wynosi [65]:

$$F_p = \frac{-A\delta_w}{2} \left(\frac{V^2}{a^2} \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_\alpha}{\delta_w} \right), \quad (1.12)$$

gdzie: δ_w - grubość warstwy granicznej, m, ε - przenikalność elektryczna powietrza, i - w warstwie granicznej, α - w powietrzu atmosferycznym, $F \text{ m}^{-1}$; A - powierzchnia elektrody płaskiej, m^2 ; V - napięcie pomiędzy elektrodami, V; a - odległość pomiędzy elektrodami, m.

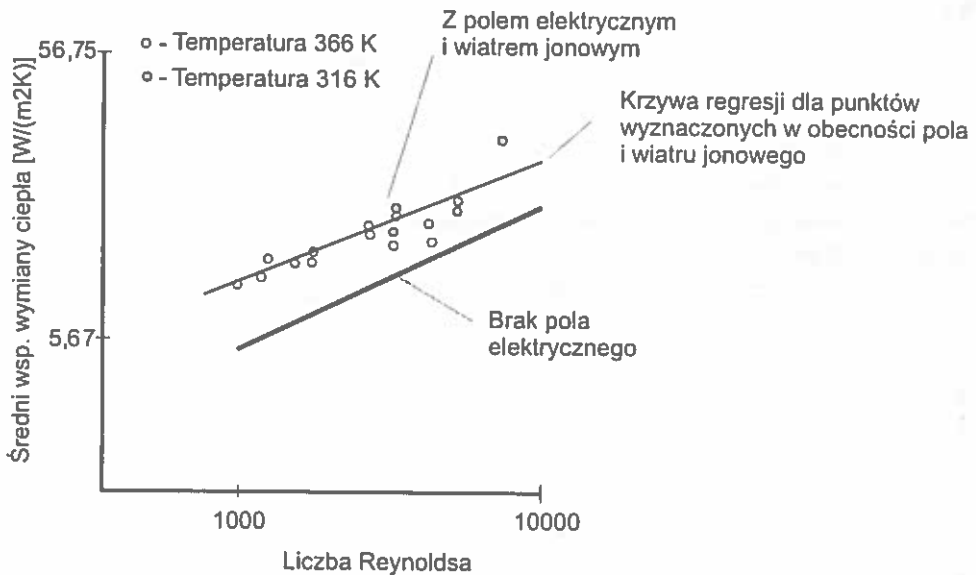
Ponieważ przenikalność elektryczna większości gazów tylko nieznacznie zmienia się w zależności od temperatury, dlatego siła polaryzacji, wywołana zmianą tej przenikalności w warstwie granicznej, jest bardzo mała. W związku z tym przy napięciach większych niż progowe V_0 , siła przyciągania jonowego F_c jest znacznie większa od siły polaryzacji F_p .

Opierając się na sile F_c , jako czynniku intensyfikującym przebieg procesów, badacze analizowali przekazywanie ciepła i masy w układzie płaskim (Rys. 1.14) i cylindrycznym (Rys. 1.15). Oprócz różnic kształtu powierzchni, z których odparowywana była woda, układy różniły się kierunkiem przepływu powietrza suszącego.

Suszenie powierzchni płaskiej (Rys. 1.14) wykonywano przy jej horyzontalnym ułożeniu i strumieniu powietrza stycznym do suszonej powierzchni [65]. Suszonym materiałem była płaska gąbka celulozowa umieszczona w tunelu o przekroju kwadratowym. Maksymalna prędkość suszącego powietrza wynosiła $1,58 \text{ m s}^{-1}$, zaś maksymalna temperatura suszącego powietrza osiągała wartość 394 K.

Źródłem pola elektrycznego i wiatru jonowego były dwa typy elektrod umieszczone w odległości 2,54 cm od suszonej powierzchni. Jeden z typów elektrod to elektroda skonstruowana w postaci zestawu równolegle zainstalowanych, w jednej płaszczyźnie, drutów. Drugą elektrodę stanowił zestaw pojedynczych elektrod ostrzowych skierowanych do suszonej powierzchni. Maksymalna wartość napięcia stałego do zasilania układu dochodziła do 18 kV i każdorazowo określany był prąd ulotu.

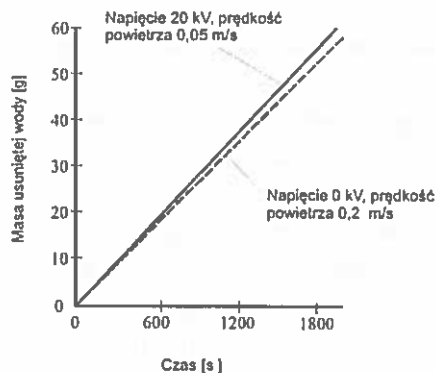
Rezultaty testów potwierdziły hipotezę o możliwości zwiększenia współczynników wymiany ciepła i masy wywołanej wprowadzeniem dodatkowych sił przyciągania jonowego występującym dzięki zastosowaniu w układzie elektrod drutowych (o małych średnicach drutu) lub elektrod ostrzowych. Na Rys. 1.17 zaprezentowano wpływ pola elektrycznego z ulotem w oparciu o porównanie średnich wartości współczynnika wymiany ciepła uzyskanych na drodze obliczeń w przypadku braku pola elektrycznego i otrzymanych eksperymentalnie przy suszeniu powierzchni płaskiej z ulotem.



Rys. 1.17. Średni współczynnik wymiany ciepła w funkcji liczby Reynoldsa (linia ciągła - brak pola elektrycznego z ulotem, punkty - wartości przy zastosowaniu pola) [65].

Fig. 1.17. Average coefficient of heat transfer versus Reynolds' number (continuous line - no electric field, dots line - with electric field) [65].

Podobny eksperyment suszenia powierzchni płaskiej, przeprowadzony przez Wolnego i Kaniuka [77], dotyczył suszenia wilgotnej gliny i odparowywania wody z naczynia. Wyniki eksperymentu potwierdzają występowanie zjawiska potęgowania wymiany ciepła i masy, opisanego przez Sadka [65]. Do matrycy elektrod ostrzowych oddalonych od suszonej powierzchni o 0,026 m podłączano napięcie o maksymalnej wartości równej 20 kV. Wpływ pola elektrycznego można również rozpatrywać w oparciu o wykres czasowy masy wody odparowanej przy suszeniu w obecności pola elektrycznego i przy jego braku (Rys. 1.18).



Rys. 1.18. Ubytek masy wody z glinki ceramicznej w funkcji czasu suszenia przy braku i występowaniu pola z ulotem

Fig. 1.18. Loss of water from pottery-clay versus time of drying at no electric field and with electric field and corona wind.

Różnica mas wody odparowanej po 900 sekundach suszenia przy różnych prędkościach czynnika suszącego wynosi tylko około 1 g (Rys. 1.18). Różnica ta stanowi jedynie kilka procent całkowitej masy odparowanej wody, mimo że prędkość powietrza suszącego została zmniejszona cztery razy. Wyniki wskazują więc, że podobny rezultat suszenia można uzyskać nawet przy czterokrotnym zmniejszeniu szybkości strumienia czynnika suszącego (z $0,2 \text{ m s}^{-1}$ do $0,05 \text{ m s}^{-1}$), o ile zostanie wprowadzony dodatkowy czynnik intensyfikujący wymianę masy. Takim czynnikiem jest pole elektryczne o natężeniu większym od wartości progowej, przy której zaczyna występować ulot.

Grupę doświadczeń z suszeniem powierzchni płaskiej uzupełniają badania suszenia powierzchni cylindrycznej wykonywane przez Wolnego [76]. Potwierdzają one wyniki osiągnięte przy suszeniu powierzchni płaskich. W badaniach Wolnego, suszeniu porowatki o średnicy zewnętrznej 25 mm w temperaturze od 30 do 60°C towarzyszył ulot z matrycy elektrod ostrzowych. Do elektrod ostrzowych oddalonych od suszonego materiału o 13 mm przykładano napięcie o maksymalnej wartości 8 kV. Wartość przyłożonego napięcia każdorazowo była wystarczająca do wywołania prądu ulotu.

Na podstawie badania suszenia powierzchni cylindrycznych wyciągnięto dwa wnioski:

- pole elektryczne z ulotem może nawet dwukrotnie zwiększyć wymianę ciepła i masy,
- wraz ze wzrostem temperatury rośnie oddziaływanie wiatru jonowego na procesy transportowe.

Reasumując, autorzy badań wpływu pola elektrycznego z wiatrem jonowym na przebieg suszenia, pamiętając o występowaniu w czynniku suszącym sił elektrostrykcyjnych, wyciągnęli wniosek, że w badanych przypadkach pole elektryczne intensyfikuje wymianę ciepła i masy w trakcie suszenia konwekcyjnego.

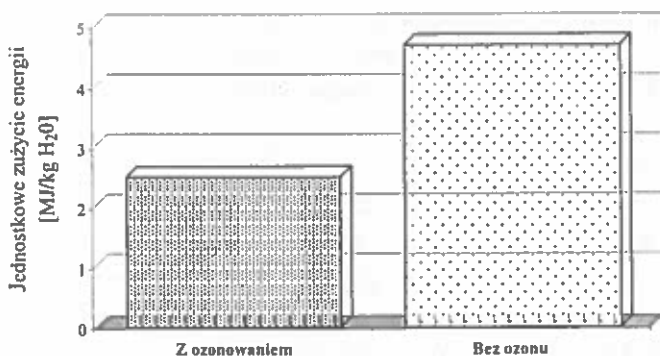
Jednak wymienione powyżej przypadki analizy wymiany ciepła i masy zakładały idealną sytuację, gdy wymiana odbywa się bezpośrednio na powierzchni styku suszącego medium z wodą. W praktyce przemysłowej taka sytuacja nie występuje. Zazwyczaj woda zawarta jest wewnątrz suszonego materiału, przez co oddziaływanie wiatru jonowego bezpośrednio na zawilgocony materiał jest utrudnione.

1.2.5. Wpływ ozonu na energochłonność suszenia konwekcyjnego

Pomiary zużycia energii przy zastosowaniu ozonowania w trakcie procesu suszenia [33-36] sygnalizują, że ozon może mieć wpływ na obniżanie zapotrzebowania na energię potrzebną do suszenia. Jego właściwości fizykochemiczne nie wskazują na możliwość oddziaływania na przebieg wymiany ciepła i masy przy suszeniu, zwłaszcza że ozon jest gazem nietrwałym, łatwo ulegającym rozkładowi, a jego zawartość w powietrzu atmosferycznym wynosi $1 \cdot 10^{-7}$ % objętości, kiedy zawartość tlenu O_2 ma wartość 20,946 %.

Krejmeric przeprowadził próby suszenia jęczmienia "Roland" powietrzem domieszkowanym ozonem [35,36]. Próbkę poddawana suszeniu z dodatkiem ozonu miała masę 40 t i ułożona była w warstwie o grubości 3 m. Początkowa wilgotność próbki jęczmienia wynosiła 25 %. Jęczmień suszono do wymaganej wilgotności przez 220 godzin w ciągu 22 dni. Wydajność nawiewu powietrza wynosiła $150 \div 180 \text{ m}^3(\text{h} \cdot \text{t})^{-1}$. Stężenie mieszanki ozonowo-powietrznej na wylocie ozonatora miało wartość $15 \div 30 \text{ mg m}^{-3}$ przy stężeniu ozonu w suszonym ziarnie $10 \div 15$ razy mniejszym. Ozon podawany był codziennie przez $1 \div 2$ h. Próbkę porównawczą o takiej samej masie suszona była początkowo w warstwie o grubości 1,5 m. Po osiągnięciu wilgotności $17 \div 19$ % umieszczono ją w warstwie o grubości 3 m. Jednostkowe zużycie energii potrzebnej do usunięcia wody osiągnęło wartość $2,5 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ przy ozonowaniu i $4,7 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ przy braku ozonu. Wskazuje to, że w sytuacji domieszkowania powietrza ozonem zużycie energii zmniejsza się 1,86 razy.

Innego typu badaniami były próby suszenia ziarna w regionach geograficznych o różnych stężeniach ozonu. O ile średnia procentowa zawartość ozonu w powietrzu atmosferycznym wynosi $1 \cdot 10^{-7}$ %, to nad poziomem morza zwiększa się ona do $7 \cdot 10^{-6}$ % latem i $2 \cdot 10^{-6}$ % zimą [51]. Próby suszenia ziarna podgrzanym powietrzem z dodatkiem ozonu, wykazały, że dla czterech wybranych regionów Litwy

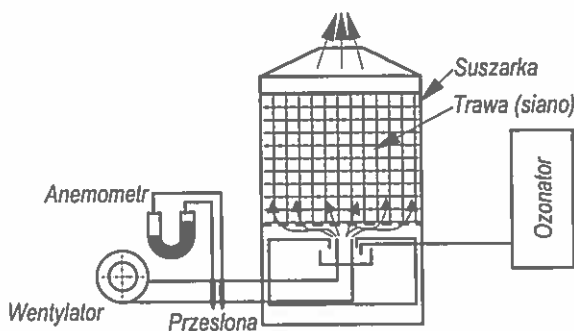


Rys. 1.19. Jednostkowe zużycie energii dla odparowania wody z próbki jęczmienia [36].

Fig. 1.19. Elementary energy consumption for water vaporization from barley sample [36].

położonych coraz dalej od morza zapotrzebowanie na energię zwiększa się 1,26; 1,48; 1,77 i 2,17 razy w porównaniu z suszeniem podgrzany powietrzem bez dodatku ozonu [34]. Domieszkowanie ozonem wykazuje na możliwość zaoszczędzenia do 20 % energii w rejonach nadmorskich i około 54 % w rejonach Wilna. Większa wilgotność początkowa ziarna daje możliwość zaoszczędzenia większych ilości energii.

Przy konserwacji traw (zabezpieczania przed działaniem pleśni i zapewniania w ten sposób wysokiej jakości) za pomocą ozonu również zaobserwowano możliwość obniżenia zapotrzebowania na energię. Próby prowadzone były dla świeżo skoszonej trawy o wilgotności większej niż 50 %. Doświadczenia wykonywano w suszarce o pojemności 8 m³ (Rys 1.20). Na wlocie powietrza do suszarki został umieszczony ozonator. Stężenie ozonu zmieniano w granicach 15÷25 mg m⁻³.



Rys. 1.20. Schemat suszarki do aktywnego suszenia mieszanką ozonowo-powietrzną [33].

Fig. 1.20. Active drying with ozone-air mixture - drier layout [33].

Przebieg procesu suszenia pokazują krzywe na Rys. 1.21. Większe nachylenie krzywej opisującej suszenie powietrzem z dodatkiem ozonu wskazuje na mniejsze zużycie energii, a co za tym idzie możliwość skrócenia czasu suszenia.

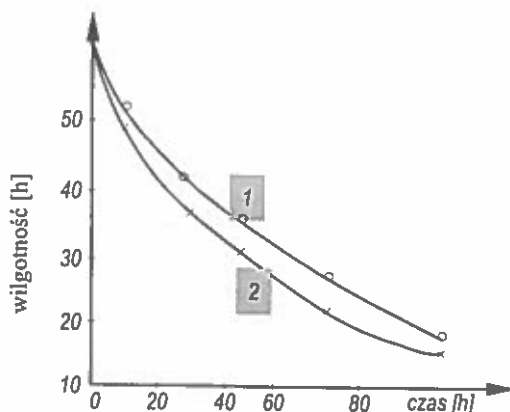
Bardziej szczegółowe parametry suszenia traw w obu przypadkach zamieszczono w Tabeli 1.1.

Na podstawie Tabeli 1.1 widać, że przy takich samych czasach suszenia procesy różniły się domieszkowaniem ozonu, a w poszczególnych próbach zastosowano różne natężenie czynnika suszącego. Przy obu szybkościach przepływu podgrzanego powietrza, w przypadku ozonowania, otrzymano mniejsze jednostkowe zużycie energii na suszenie. Dodatkowo uzyskano niższą końcową wilgotność siana. Oszczędności energii w obu przypadkach są rzędu 10 %.

T a b e l a 1.1. Podstawowe porównawcze parametry procesu suszenia trawy [33]

T a b l e 1.1. Basic comparative parameters of grass drying process [33]

Sposób suszenia	Numer próbki	Wilgotność (%)	Strumień powietrza ($\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{t}$)	Czas trwania (h)		Energia jednostkowa ($\text{MJ kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)
				Suszenia	Ozono-wania	
Zebrane na polu	1	60	5750			
	2	61	3750			
Aktywnie bez ozonu	1	19	5750	103	-	2,0
	2	23	3750	150	-	1,7
Aktywnie z ozonem	1	15	5750	103	11,5	1,8
	2	17	3750	150	10,0	1,6



Rys. 1.21. Dynamika suszenia trawy przy ozonowaniu (2) i bez (1) [33].

Fig. 1.21. Grass drying dynamics with ozone (2) and without (1) [33].

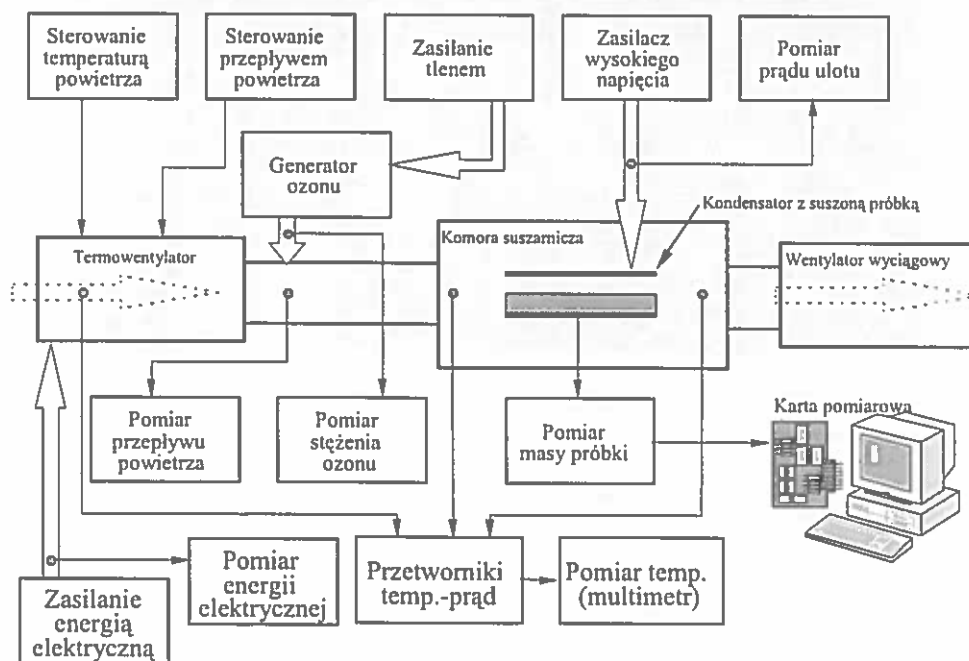
2. STANOWISKO BADAWCZE

2.1. Budowa i zasada działania stanowiska pomiarowego

Stanowisko badawcze skonstruowano w oparciu o sprzęt zakupiony w firmach specjalistycznych oraz urządzenia wykonane specjalnie w celu prowadzenia badań.

Pierwszym krokiem w badaniach było wstępne określenie stopnia wilgotności posiadanego materiału. Wilgotność wstępną, tak samo jak wilgotność próbki po nawilżeniu mierzono miernikiem wilgotności ziarna. Dane techniczne miernika wilgotności:

typ	Grainer II PM-300,
zakres pomiarowy	1,0 ÷ 40,0 %,
dokładność	0,2 ÷ 0,5 %,
masa próbki	20 ÷ 180 g.



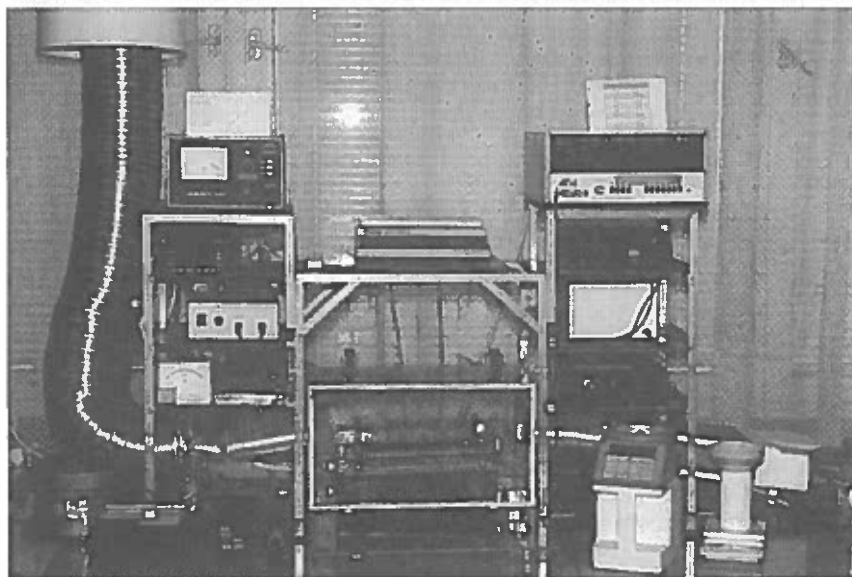
Rys. 2.1. Schemat blokowy stanowiska badawczego.

Fig. 2.1. Block diagram of test stand.

Na około 72 godziny przed przeprowadzeniem próby suszenia, próbki były nawilżane w komorze klimatyzacyjnej. Dane techniczne komory:

typ	KPW-1,
zakres regulacji temperatury	288 ÷ 343 K,
zakres regulacji wilgotności	20 ÷ 98 %.

Suszona próbka umieszczana była na dolnej okładce kondensatora pomiarowego w komorze suszarniczej stanowiska badawczego. Schemat blokowy stanowiska stosowanego w prowadzonych badaniach pokazuje Rys. 2.1, a widok ogólny Rys. 2.2.



Rys. 2.2. Widok ogólny stanowiska badawczego.
Fig. 2.2. General view of test stand.

Głównym elementem stanowiska badawczego jest komora suszarnicza. W niej umieszczany był kondensator pomiarowy z badaną próbką. Strumień powietrza o zadanej temperaturze wytwarzał termowentylator umieszczony na wlocie komory. Grzałka termowentylatora zasilana była przez układ stabilizacji temperatury oparty na przetwornikach temperatura-prąd (B111). Dzięki niemu możliwe było utrzymywanie temperatury czynnika suszącego niezależnie od temperatury panującej w laboratorium z dokładnością ± 1 K. Energię pobieraną przez termowentylator mierzono licznikiem energii prądu jednofazowego. Dane techniczne miernika:

typ	MOD A5,
napięcie znamionowe	220 V,
prąd znamionowy	2,5 (12,5) A,
klasa	3%.

Pomiar temperatury na wlocie i wylocie z komory, dokonywany był przy pomocy przetworników temperatura-prąd. Umożliwiały one pomiary w komorze z rozdzielczością do $\pm 0,1$ K. Odczyty temperatury były wykonywane za pomocą woltomierza cyfrowego. Czujniki temperatury były okresowo wzorcowane na podstawie wskazań termometru rtęciowego.

Okresowo sprawdzano prędkość powietrza w komorze. Kontrolę wykonywano za pomocą anemometru. Dane techniczne anemometru:

typ	N-194,
zakres mierzonych prędkości przepływu gazu	$\left\{ \begin{array}{l} 0,1 \div 30 \text{ m s}^{-1} - \text{czujnik N-194,0,} \\ 0,3 \div 30 \text{ m s}^{-1} - \text{czujnik N-194,1,} \end{array} \right.$
uchyb pomiaru	$0,01 \text{ m s}^{-1}$ (początek zakresu), $0,5 \text{ m s}^{-1}$ (koniec zakresu) - czujnik N-194,0,
temperatura pracy czujnika	$5 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$,
zakres kompensacji temp.	$10 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Układ zasilania stanowiska ozonem składał się z trzech elementów: generatora ozonu, analizatora zawartości ozonu i butli tlenowej. Najważniejszy z nich - generator ozonu, miał możliwość wytwarzania ozonu z powietrza atmosferycznego lub z tlenu. Zdecydowano się na drugie z rozwiązań, tzn. wytwarzanie ozonu z tlenu, ze względu na stabilniejszą pracę układu oraz mniejsze zużycie elektrod ozonatora. Dane techniczne generatora ozonu:

typ	5G,
wydajność	$5 \text{ (z powietrza)} \div 15 \text{ (z tlenu)} \text{ g O}_3 \text{ h}^{-1}$,
chłodzenie wodą	$2,5 \div 5,0 \text{ l min}^{-1}$,
zasilanie	220 V, 50 Hz.

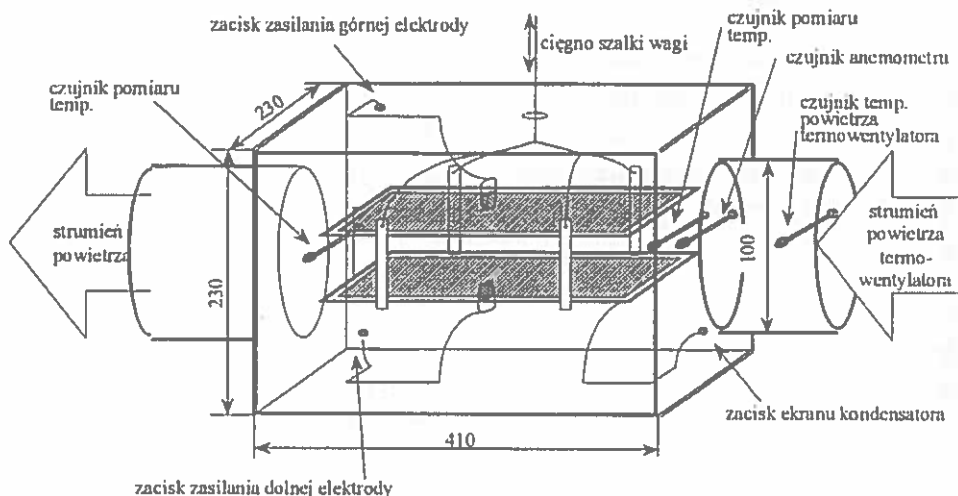
Ilość ozonu wprowadzanego do układu była określana na podstawie zawartości ozonu w mieszance tlenowo-powietrznej opuszczającej generator (przy kontrolowanym przepływie tlenu zasilającego generator). Dane techniczne miernika stężenia ozonu:

typ	Ozone Analyzer BMT 961,
maksymalny zakres pomiaru	5 g m^{-3} ,
dokładność	1,5 %.

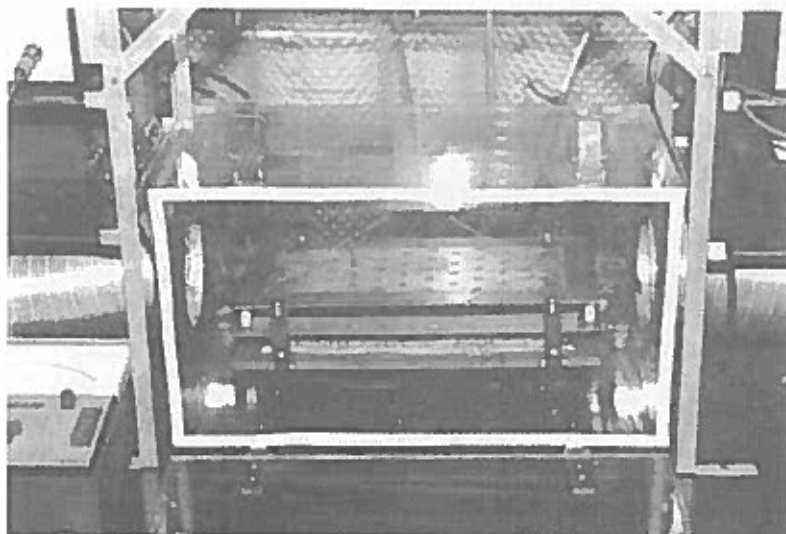
Schemat komory suszarniczej zaprezentowano na Rys. 2.3, zaś wygląd na Rys. 2.4. Komora wykonana została ze szkła organicznego. Przednia ściana komory jest demontowalna. Dzięki temu uzyskuje się pełny dostęp do wszystkich jej czujników i zacisków.

Przed rozpoczęciem procesu suszenia (umieszczeniem w komorze kondensatora z suszoną próbką i uruchomieniem programu komputera) wykonywano wygrzewanie komory i pomiar wilgotności powietrza suszącego. Pomiar wilgotności powietrza realizowany był termohigrometrem. Dane techniczne termohigrometru:

typ	P570,
zakres pomiaru wilgotności	$0 \div 98 \text{ \% rH}$,
zakres pomiaru temperatury	$-30 \div +80 \text{ C}$,
rozdzielczość dla wilgotności	$0,1 \text{ \% rH}$,
rozdzielczość dla temperatury	$0,1 \text{ }^\circ\text{C}$,
dokładność dla wilgotności	$\pm 1 \text{ \% rH}$,
dokładność dla temperatury	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.



Rys. 2.3. Budowa komory suszarniczej.
Fig. 2.3. Construction of drying chamber .



Rys. 2.4. Widok komory suszarniczej.

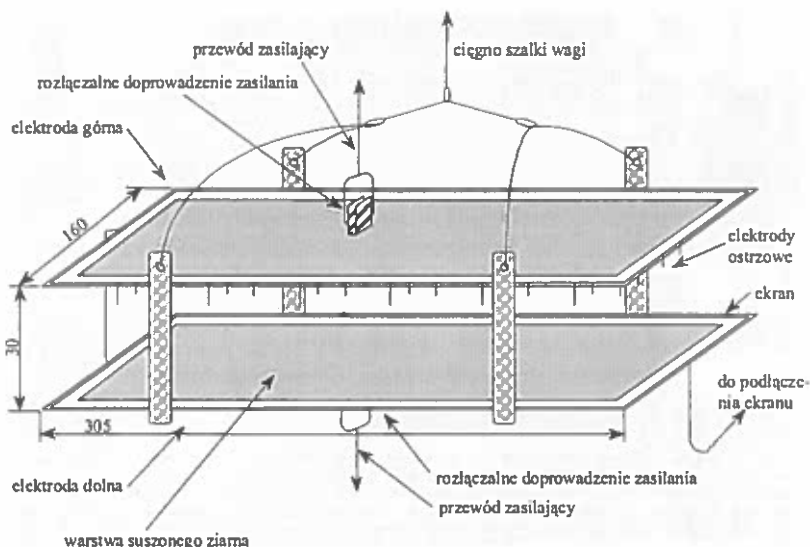
Fig. 2.4. Drying chamber.

Zasypywanie kondensatora obejmuje odważenie próbki ziarna o zadanej masie i umieszczenie jej w postaci pojedynczej warstwy na dolnej okładce kondensatora. Na czas suszenia kondensator był umieszczany w komorze suszarniczej. Pomiar masy próbki przed suszeniem oraz bieżąca kontrola ubytku masy próbki w trakcie suszenia, realizowana jest przez cyfrową wagę laboratoryjną. Dane techniczne wagi laboratoryjnej:

typ	Precisa 5000 D - 12000 G,
zakres pomiarowy	12400 g,
dokładność	0,1 g.

Do eksperymentów stosowano kilka typów kondensatorów suszarniczych. Pierwszy z nich, do pomiarów z polem jednorodnym bez ulotu, wykonany był z dwóch płyt z laminatu o powierzchni przewodzącej umieszczonej na zewnątrz kondensatora. Ogólny widok takiego kondensatora pomiarowego pokazano na Rys. 2.5.

W kondensatorze do pomiarów w polu niejednorodnym (Rys. 2.6b i c), z ulotem z górnej elektrody, zainstalowano zestaw elektrod ostrzowych. Wewnętrzna strona dolnej elektrody, na której umieszczana jest suszona próbka ziarna jest pokryta warstwą miedzi. Wymaganą polaryzację okładzin kondensatora uzyskuje się przez dołączenie przewodów zasilacza wysokiego napięcia do jego zacisków. Dane techniczne układu polaryzacji kondensatora:



Rys. 2.5. Budowa kondensatora suszarniczego.

Fig. 2.5. Construction of drying capacitor.

napięcie stałe,
zakres napięć
pomiar napięcia

o regulowanej wartości,

0 ÷ 30 kV,

multimetr V 640,

+ sonda wysokiego napięcia P233 V 40.23,

± 1,5 %,

dokładność pomiaru napięcia

zakres pomiaru prądu

0 ÷ 1000 μ A,

pomiar prądu

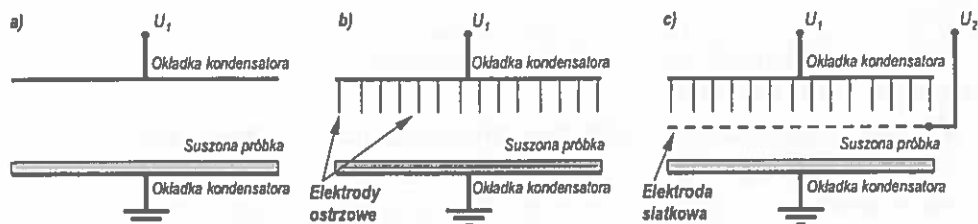
mikroamperomierz MK-2A,

dokładność pomiaru prądu

± 1,5 %.

Do badań wpływu pola na przebieg procesu suszenia stosowano kondensator z elektrodą siatkową. Jego dolna okładka była płaską powierzchnią pokrytą warstwą miedzi. Górna okładka uzbrojona była w zestaw elektrod ostrzowych. Pomiędzy nimi została zainstalowana siatka, dzięki której możliwa była zmiana natężenia pola elektrycznego niezależnie od wielkości prądu ulotu. Konstrukcje kondensatorów użytych do badań przedstawiono na Rys. 2.6.

Wprowadzana do układu energia elektryczna była kontrolowana w dwóch punktach układu. Po pierwsze, układ zasilania kondensatora pomiarowego wysokim napięciem wyposażono w dodatkowy mikroamperomierz, dzięki któremu możliwa była rejestracja wartości prądu ulotu przy znanej wartości napięcia zasilającego. Z drugiej strony mierzona była ilość energii elektrycznej dostarczanej do grzałki termowentylatora.



Rys. 2.6. Przekroje kondensatorów pomiarowych: a) do generowania sił elektrostrykcyjnych, b) do generowania wiatru jonowego, c) do generowania wiatru jonowego przy stałej wartości natężenia pola elektrycznego i prądu ulotu.

Fig. 2.6. Measurement capacitors: a) to generate ponderomotive forces, b) to generate ionic wind, c) to generate ionic wind at constant value of electric field intensity and corona current.

2.2. Sposób prowadzenia pomiarów

Poszczególne czynności w trakcie prowadzenia pojedynczego procesu suszenia można pogrupować i opisać w następujących punktach:

1. Wstępne przygotowanie próbki.
 - Określenie wilgotności próbki poddawanej nawilżaniu. Polegało ono na kolejnych pomiarach wilgotności całej próbki w partiach o masach równych 120 g. Wartość masy pojedynczej partii podyktowana była warunkami technicznymi miernika wilgotności Grainer II.
 - Umieszczenie próbki w komorze klimatyzacyjnej KPW-1. Czas przebywania próbki w komorze klimatyzacyjnej wynosił 72 godziny. Wielkość ta podyktowana była minimalnym czasem koniecznym do nawilżenia materiału, który nie pozwalał jednocześnie na wystąpienie niepożądanych efektów biologicznych.
2. Przygotowanie stanowiska pomiarowego.
 - Czynności wykonywane okresowo to kontrolowanie zadanej prędkości przepływu powietrza za pomocą anemometru N-194 oraz wzorcowanie czujników temperatury w oparciu o dokładny termometr rtęciowy.
 - Każdorazowo przed umieszczeniem próbki w komorze suszarniczej, komorę wygrzewano przez okres 15 minut, co pozwalało na uzyskanie w jej wnętrzu stabilnej temperatury.
 - W przypadku wykonywania suszenia powietrzem domieszkowanym ozonem, uruchamiano ozonator (typ 5 G) i miernik stężenia ozonu (typ BMT 961).
 - Włączenie zasilania wagi elektronicznej (Precisa 5000D-12000G).

- Inicjowanie programu monitorowania suszenia obejmowało zadeklarowanie liczności próbki z danymi o masie suszonej próbki oraz wprowadzenie interwału czasowego pomiędzy poszczególnymi pomiarami.

3. Inicjacja cyklu pomiarowego.

- Określenie wilgotności pojedynczej próbki (Grainer II). Odważenie próbki o masie 100 g (waga Precisa 5000D-12000G). Przy określaniu masy próbki użytej do pomiarów zachowano dokładność określoną dla mierników laboratoryjnych, tzn. uchyb graniczny miernika $\leq 0,5\%$. Na podstawie tego warunku, masy próbki m_x i wartości błędu bezwzględnego wagi $\Delta = 0,1$ g otrzymujemy:

$$\frac{\Delta}{m_x} \cdot 100\% \leq 0,5\%,$$

$$m_x \geq 100 \frac{\Delta}{0,5},$$
(2.1)

$$m_x \geq 20,0 \text{ g}$$

Do pomiarów przyjęto próbkę o masie $m_x=100$ g, co zapewniło wymaganą dokładność pomiarów dla mierników laboratoryjnych, a jednocześnie umożliwiło operowanie próbkami o masie wymaganej do pomiaru wilgotności miernikiem Grainer II PM-300. Procentowy błąd liczony od wartości aktualnej wynosi zatem:

$$\frac{\Delta}{m_x} \cdot 100\% = \frac{0,1 \text{ g}}{100 \text{ g}} \cdot 100\% = 0,1\%,$$
(2.2)

co odpowiada, przy pominięciu błędu dyskretyzacji, klasie dokładności mierników laboratoryjnych.

- Umieszczenie próbki na dolnej okładce kondensatora pomiarowego.
- Załączenie zasilania kondensatora. Ustawienie pożądanego napięcia elektrod kondensatora.
- Zapisanie w protokole pomiarowym danych o prowadzonym eksperymencie tzn. daty, odmianie suszonej próbki, wilgotności przed nawilżeniem i wilgotności bezpośrednio po umieszczeniu próbki w komorze, prędkości przepływu i temperatury powietrza w komorze suszarniczej, stężeniu ozonu, wartości natężenia prądu ulotu, wartości napięć pomiędzy elektrodami kondensatora pomiarowego oraz uwag dotyczących przebiegu konkretnej próby.

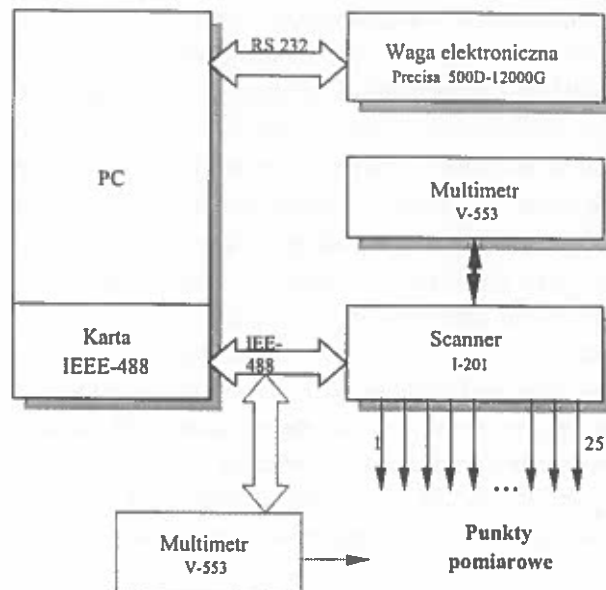
4. Przebieg cyklu pomiarowego.

– Przebieg procesu monitorowany był automatycznie przez program komputerowy, który w zadeklarowanych odstępach czasu wykonywał rejestrację masy próbki. Typowy czas trwania pojedynczego eksperymentu suszenia wynosił 90 minut. Czas ten pozwala na zmniejszenie początkowej wilgotności próbki o masie 100 g wynoszącej 20 % do wartości końcowej rzędu 11 %. Długość cyklu pomiarowego może być zmieniana wartościami wprowadzanymi do programu obsługującego wagę elektroniczną. Zadaniem eksperymentatora było kontrolowanie, czy w układzie nie występują sytuacje awaryjne takie jak np. zanik napięcia zasilania kondensatora, brak chłodzenia ozonatora, przekroczenie przyjętych wartości prądu, zatrzymanie programu rejestracji wyników.

Układ pomiarowy stanowiska badawczego został wyposażony w komputer PC. Karta pomiarowa PCL-848 standardu IEEE-488 firmy Advantech, podłączona do magistrali ISA, zapewniła sterowanie pomiarami. Maksymalna liczba urządzeń pomiarowych w systemie pomiarowym wynika ze zgodności karty pomiarowej ze standardem i jest równa 14. Do rozszerzenia ilości punktów pomiarowych zastosowano programowany komutator firmy Meratronik Scanner I-201. Przeznaczony jest on do galwanicznego dołączania wejścia urządzenia pomiarowego i rozszerzenia liczby punktów pomiarowych do 25. Elementami komutacyjnymi są zestyki sterowane z magistrali IEEE-488. Maksymalna częstotliwość przełączeń na sekundę wynosi 60. Generalnie wykorzystywanym przyrządem pomiarowym w stanowisku badawczym jest multimetr cyfrowy V-553 przeznaczony do cyfrowego pomiaru napięć stałych, przemiennych i rezystancji. Zgodnie z filozofią całkowitej automatyzacji pomiarów, przyrząd ten jest również wyposażony w złącze do magistrali IEEE-488 i podłączony do karty pomiarowej PCL-848. W przypadku pomiaru masy próbki, możliwość automatyzacji zapewniło złącze szeregowo RS-232. Jednoczesna obsługa karty pomiarowej standardu IEEE-488 i złącza szeregowo RS-232 skomplikowała oprogramowanie, ale była krytyczna dla pomiarów ze względu na konieczność usunięcia niedogodności manipulacji próbką w celu pomiaru jej masy.

Możliwość bezpośredniego włączenia multimetru do magistrali IEEE-488 umożliwia pominięcie komutatora I-201 i skrócenie czasu pomiaru przez redukcję czasu przełączania do zera, co przedstawiono na Rys. 2.7.

Oprogramowanie systemu pomiarowego składa się z części współpracującej z kartą kontrolera IEEE-488 oraz części komunikującej się z wagą laboratoryjną magistralą RS-232. Do oprogramowania karty użyto biblioteki funkcji, dostarczonych przez producenta. Gdy wszystkie urządzenia są gotowe do



Rys. 2.7. Schemat blokowy systemu pomiarowego.
Fig. 2.7. Block diagram of measuring system.

wykonywania pomiarów, wtedy w żądanej chwili wywołujemy funkcję powodującą, że urządzenie pomiarowe wykonuje pomiar. Wynik pomiaru jest przechowywany w rejestrze i gotowy do odczytania. W przypadku gdy wartość funkcji jest równa zero, pomiar zakończył się pomyślnie.

5. Czynności zakończeniowe.

- Najważniejsze czynności końcowe, to wykonanie archiwizacji pliku z danymi pomiarowymi oraz sprawdzenie poprawności wypełnienia protokołu pomiarowego.

Podstawowym efektem rejestracji wyników z pojedynczego eksperymentu suszenia jest plik z danymi, który zawiera informacje o zmianie masy próbki w trakcie suszenia. Ponieważ waga jest tarowana przed rozpoczęciem cyklu pomiarowego, to w pliku są umieszczone jedynie dane o masie odparowanej wody. Przykładowy wygląd pliku z danymi pomiarowymi umieszczono w Tabeli 2.1.

T a b l e 2.1. Przykładowa zawartość pliku z wynikami pomiarów masy (masa [g])

Masa odparowanej wody	Czas rejestracji pomiaru	Czas pomiędzy pomiarami (s)
0.0	9:44:21.41	0
-0.4	9:46:21.75	120
-0.7	9:48:21.82	120
-0.9	9:50:21.78	120
-1.1	9:52:21.73	120
-1.3	9:54:21.80	120
-1.5	9:56:21.81	120
-1.7	9:58:21.71	120
-1.8	10: 0:21.84	120
-2.0	10: 2:21.79	120
-2.2	10: 4:21.86	120
-2.4	10: 6:21.82	120
-2.5	10: 8:21.72	120
-2.6	10:10:21.79	120
-2.8	10:12:21.80	120
-2.9	10:14:21.76	120
...	...	120
...	...	120
...	...	120
-4.2	10:38:21.79	120
-4.3	10:40:21.81	120
-4.4	10:42:21.82	120
-4.5	10:44:21.83	120
-4.6	10:46:21.79	120
-4.7	10:48:21.85	120
-4.8	10:50:21.76	120
-4.9	10:52:21.82	120
-4.9	10:54:21.73	120
-5.0	10:56:21.79	120
-5.1	10:58:21.81	120
-5.1	11: 0:21.76	120
-5.2	11: 2:21.78	120
-5.3	11: 4:21.73	120
-5.3	11: 6:21.80	120
-5.4	11: 8:21.76	120
-5.4	11:10:21.77	120
-5.5	11:12:21.78	120

Zaprezentowany w Tabeli 2.1 zestaw informacji o masie pojedynczej próbki w czasie jednego procesu suszenia stanowi jeden z elementów grupy wyników, opisujących przebieg procesu. Do poprawnej analizy statystycznej błędu (podrozdział 3.6) i analizy przebiegu suszenia (np. wykreślenia krzywych suszenia,

podrozdziały 3.1÷3.3) konieczne było uzyskanie co najmniej kilku zestawów danych tego typu. W celu zminimalizowania wpływu niepożądanych czynników zewnętrznych na wyniki (np. zmian wilgotności powietrza atmosferycznego i ciśnienia), każdorazowo przeprowadzano co najmniej dwa cykle suszenia - przy wprowadzonym dodatkowym oddziaływaniu pola elektrycznego (np. suszenie w polu elektrycznym) i suszenie porównawcze bez takiego oddziaływania.

Wyniki doświadczeń prowadzonych w oparciu o sprzęt i procedurę opisaną w rozdziale 2 zaprezentowano w rozdziale 3.

3. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone eksperymenty należy podzielić na dwie grupy: grupę badań pilotażowych, w której określono warunki sprzyjające intensyfikacji suszenia w polu elektrycznym i grupę badań szczegółowych, w których dokładnie określono przebieg procesu suszenia konwekcyjnego wspomaganego polem elektrycznym.

Każdą z przeprowadzonych serii pomiarów można zakwalifikować do jednej z poniżej wymienionych grup ze względu na:

1. Prędkość suszącego powietrza: 0,3; 1,4 m s⁻¹.
2. Temperaturę powietrza suszącego równą: temperaturze otoczenia (~20 °C), 30, 35, 40 lub 50 °C (293, 303, 308, 313, 323 K).
3. Występowanie pola elektrycznego o jednej ze średnich wartości natężenia: 0, 200, 300 lub 400 kV m⁻¹.
4. Występowanie pola elektrostatycznego lub pola elektrycznego z mierzalnym prądem ulotu.
5. Domieszkowanie powietrza suszącego ozonem przy równoczesnym oddziaływaniu pola elektrycznego.

W grupie badań pilotażowych skupiono się na wybraniu zakresu prędkości przepływu powietrza suszącego i układu pomiarowego, (kondensatora pomiarowego z Rys. 2.6) w którym widoczne jest oddziaływanie pola elektrycznego. Badania te pozwoliły na wyciągnięcie wniosku, że przy stosowaniu powietrza o prędkości przepływu równej 1,4 m s⁻¹ brak jest widocznych zmian przebiegu suszenia bez względu na stosowany układ generowania pola elektrycznego. W związku z tym prędkość suszącego powietrza została obniżona do maksymalnie niskiej, stabilnej prędkości 0,3 m s⁻¹. Dalej prezentowane wyniki dotyczą właśnie tej wartości przepływu powietrza.

Wyniki przebiegu procesu suszenia mogą być prezentowane na kilka sposobów. Najłatwiejsze byłoby podanie wartości liczbowych ubytku masy wody w poszczególnych momentach procesu suszenia. Niestety sposób ten jest nieczytelny ze względu na dużą liczbę punktów pomiarowych i serii pomiarów. W praktyce suszarniczej, najczęstszą ilustracją przebiegu procesu suszenia są krzywe suszenia - wykresy zawartości wody w funkcji czasu suszenia. Dodatkowo suszenie można ilustrować krzywymi masy odparowanej wody w funkcji czasu (wartości uzyskane bezpośrednio na podstawie pomiarów), krzywymi suszenia przedstawiającymi zredukowaną zawartość wody w funkcji czasu (przydatne do porównywania suszenia próbek o różnej początkowej zawartości wody; przy czym początkowe zawartości wody porównywanych próbek muszą być mniejsze od krytycznej

wartości zawartości wody oddzielającej różne mechanizmy wymiany wody [52]), krzywymi szybkości suszenia w funkcji zawartości wody czy prędkości usuwania wody w funkcji czasu.

W niniejszym przypadku najwłaściwsze wydaje się korzystanie z trzech typów krzywych:

1. Krzywych masy wody odparowanej w danej chwili procesu dających niezafałszowaną informację o ilości wody usuniętej w każdym momencie suszenia ($x=f(\tau)$).

2. Standardowych krzywych suszenia ($u=f(\tau)$).

3. Krzywych prędkości usuwania wody w funkcji czasu ilustrujących dynamikę suszenia ($\Delta x/\Delta \tau=f(\tau)$).

3.1. Suszenie konwekcyjne w jednorodnym polu elektrycznym

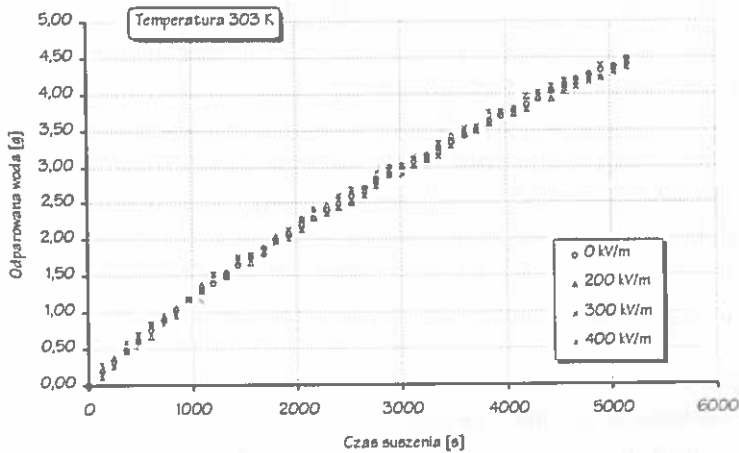
Pomiary przebiegu suszenia w jednorodnym polu elektrycznym prowadzone były w kondensatorze płaskim (Rys. 2.6 a). W takim układzie pomiarowym próbka ziarna pszenicy znajdowała się w jednorodnym polu elektrycznym. W układzie nie występował ulot (brak mierzalnego prądu ulotu, wartość natężenia pola nie mogła spowodować przepływu prądu ze względu na właściwości izolacyjne powietrza i elektrod kondensatora - powierzchnie przewodzące elektrod umieszczone były na zewnątrz elektrod).

Przebiegi czasowe masy wody odparowywanej z próbek w temperaturach 303 i 323 K przedstawiają Rys 3.1 i 3.2. O identycznym przebiegu procesów można wnioskować chociażby na podstawie końcowej masy odparowanej wody. W przypadku przebiegów z Rys. 3.1 (temperatura 303 K) rozrzut pomiędzy wartością maksymalną i minimalną był rzędu 0,13 g, co stanowi 2,9 % średniej końcowej wartości masy odparowanej wody. Analogicznie dla temperatury 323 K (Rys. 3.2) rozrzut osiągnął wartość 0,14 g tj. 1,8 % średniej wartości końcowej. Analiza statystyczna różnic pomiędzy przebiegami wykazuje, że nie można ich uznać za różne na poziomie ufności równym $\alpha = 0,05$, co jest równoznaczne z brakiem mierzalnego wpływu pola elektrycznego.

Próby przeprowadzone przy prędkości powietrza suszącego 0,3; 1,4 m s⁻¹; natężeniu jednorodnego pola elektrycznego - 0, 200, 300, 400 kV m⁻¹ w temperaturze 303, 308, 313 K upoważniają do przedstawienia wniosków:

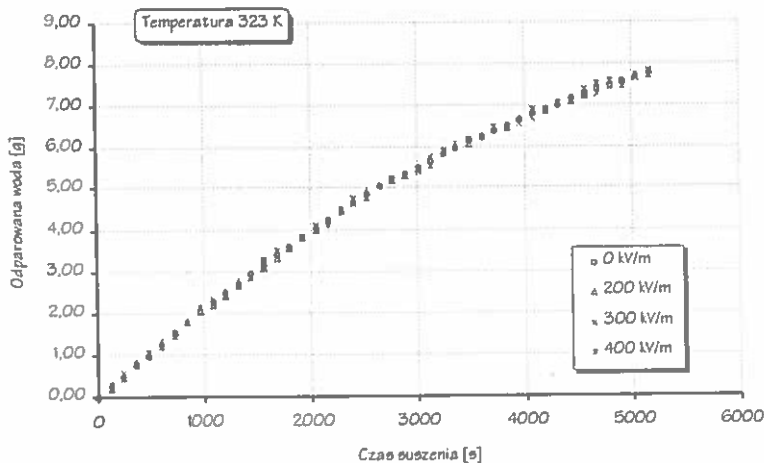
1. Bez względu na stosowaną prędkość suszącego powietrza, natężenie pola elektrycznego oraz temperaturę suszącego powietrza, pola elektryczne nie wywierają wpływu na przebieg suszenia.

2. Na podstawie braku przyśpieszenia suszenia, można mówić o tym, że nie została potwierdzona teza Taruszkina [73] mówiąca o możliwości wykorzystania sił strykcyjnych w procesach suszenia nasion zbóż.



Rys. 3.1. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 303 K w obecności jednorodnego pola elektrycznego.

Fig. 3.1. Removed water mass versus drying time at temperature 303 K in homogeneous electric field.



Rys. 3.2. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 323 K w obecności jednorodnego pola elektrycznego.

Fig. 3.2. Removed water mass versus drying time at temperature 323 K in homogeneous electric field.

3.2. Suszenie konwekcyjne w polu elektrycznym z wiatrem jonowym

W przypadku suszenia w polu elektrycznym w obecności wiatru jonowego mogą występować dwie konfiguracje układu pomiarowego. W pierwszej z nich używany był kondensator pomiarowy z górną elektrodą wyposażoną matrycę elektrod ostrzowych (Rys. 2.6b). Po przyłożeniu do elektrod niezmiennego w czasie napięcia, w miarę odparowywania wody z próbki poprawiają się własności izolacyjne układu i zmniejsza się prąd ulotu. W drugiej konfiguracji kondensatora pomiarowego (Rys. 2.6c), dodatkowa elektroda siatkowa pomaga utrzymać w czasie całego procesu suszarniczego stałą wartość prądu ulotu przy niezmiennym napięciu pomiędzy elektrodami.

3.2.1. Suszenie przy zmiennej w czasie wartości prądu ulotu

W grupie pomiarów o zmiennej wartości prądu ulotu przeprowadzono serie pomiarów dla następujących parametrów:

1. Natężenia pola o wartości średniej - 0, 200, 300, 400 kV m⁻¹.
2. Temperatury powietrza 30, 40, 50 °C (303, 313, 323 K).

Dwa kolejne wykresy (Rys. 3.3 i 3.4) prezentują masę wody odparowywaną w czasie trwania suszenia. Zostały wybrane dwa przypadki - najniższej i najwyższej ze stosowanych temperatur (303 i 323 K). Zakres stosowanych temperatur podyktowany został wartościami temperatur praktycznie stosowanych przy suszeniu ziarna (Tabela 3.1, zależność 3.1).

T a b e l a 3.1. Dopuszczalne temperatury nagrzania ziarna i nasion zbóż w °C [54]
T a b l e 3.1. Admissible temperatures of heating grains and seeds (in °C) [54]

Wilgotność (%)	Konsumpcyjne		Siewne
	Pszenica	Żyto, jęczmień	Pszenica, żyto, jęczmień
16	55	65	49
17	52	62	46
18	49	59	43
19	46	56	40
20	43	53	38
21	40	47	36
22	67	43	34

Wartość dopuszczalnej temperatury obliczona na podstawie zależności [54] wynosi 66 °C.

$$T_{\max} = \frac{23,5}{c_z} + (20 - \log \tau), \quad (3.1)$$

gdzie: T_{\max} - maksymalnie dopuszczalna temperatura nagrzania ziarna, °C; c_z - ciepło właściwe wilgotnego ziarna, kcal (kG °C)⁻¹; τ - czas działania temperatury, min.

Wobec rozbieżności między danymi tabelarycznymi i obliczonymi na podstawie zależności (3.1), jako maksymalna temperatura została wybrana, zbliżona do średniej, temperatura 50°C. Kolejne niższe wartości stosowanej temperatury wprowadzają pewność co do braku niszczącego wpływu temperatury na właściwości suszonego medium.

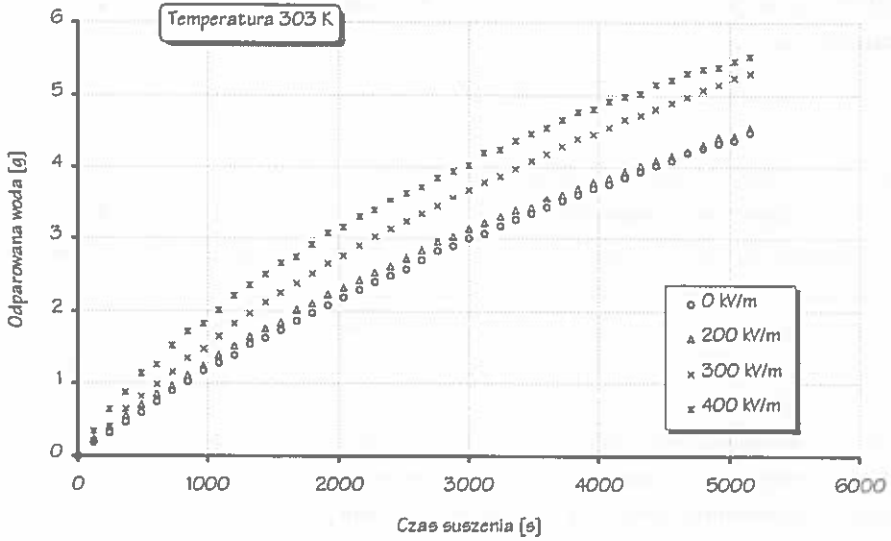
Maksymalna wartość średnia stosowanego natężenie pola elektrycznego została zdeterminowana przez pojawianie się przy wyższych wartościach natężenia efektów działania sił ponderomotorycznych. Jeżeli suszona próbka umieszczona była w polu o średniej wartości natężenia większej niż 400 kV m⁻¹, to pojedyncze suszone ziarna pszenicy zmieniały położenie dążąc do ustawienia się zgodnego z liniami sił pola. Przez to zmniejszała się odległość pomiędzy suszoną próbką a elektrodami i dochodziło do wyładowań zupełnych. Dopuszczenie do wyładowania powodowało zapalenie suszonej próbki. Z tego powodu za najwyższą stosowaną średnią wartość natężenia pola elektrycznego przyjęto 400 kV m⁻¹.

Najbardziej widoczne efekty oddziaływania pola można zaobserwować przy suszeniu powietrzem o maksymalnej ze stosowanych temperatur (323 K) i maksymalnym stosowanym natężeniu pola elektrycznego (400 kV m⁻¹). Na Rys. 3.3 pokazano przebieg usuwania wody przy suszeniu w temperaturze 303 K.

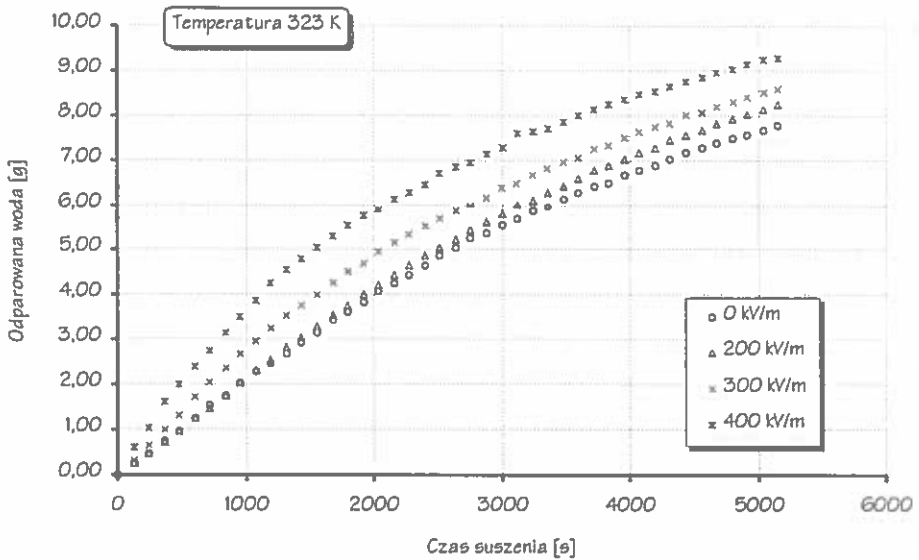
Widać na nim, że nawet przy tej temperaturze, zastosowanie pola elektrycznego z wiatrem jonowym powoduje szybsze usuwanie masy wody niż w przypadku braku pola. Pole elektryczne powoduje, że po 1,5 h suszenia w temperaturze 303 K masa odparowanej wody przy natężeniu pola 400 kV m⁻¹ jest większa o 24 % od wartości masy wody odparowanej bez obecności pola elektrycznego.

Różnica masy wody odparowanej w obecności pola elektrycznego w stosunku do masy wody odparowanej przy braku pola rośnie z temperaturą i wartość różnicy równa 1 g (przy 303 K) zwiększa się do 1,5 g (przy 323 K) przy wzroście temperatury o 20 K. Odpowiada to 19 % wartości masy wody odparowanej bez obecności pola elektrycznego.

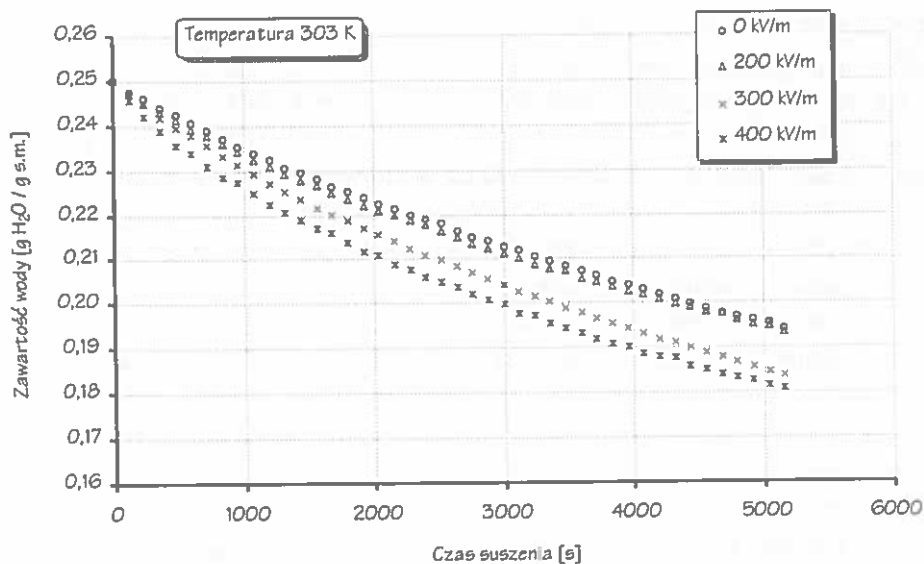
Krzywe suszenia, zaprezentowane na Rys. 3.5 i 3.6, potwierdzają fakt przyspieszania suszenia z Rys. 3.3 i 3.4. Próbka poddana działaniu wiatru jonowego



Rys. 3.3. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 303 K.
 Fig. 3.3. Removed water mass versus drying time at temperature 303 K.

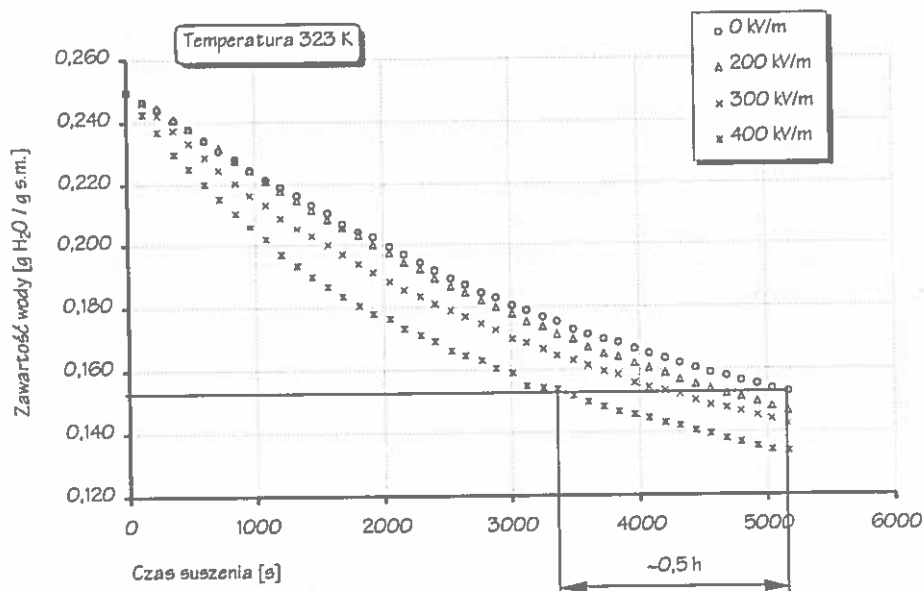


Rys. 3.4. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 323 K.
 Fig. 3.4. Removed water mass versus drying time at temperature 323 K.



Rys. 3.5. Krzywe suszenia próbki w temperaturze 303 K.

Fig. 3.5. Drying curves at temperature 303 K.



Rys. 3.6. Krzywe suszenia próbki w temperaturze 323 K.

Fig. 3.6. Drying curves at temperature 323 K.

z polem elektrycznym o natężeniu 400 kV m^{-1} osiąga końcową zawartość wody próbki nie poddanej działaniu pola około 0,5 h wcześniej (Rys. 3.6).

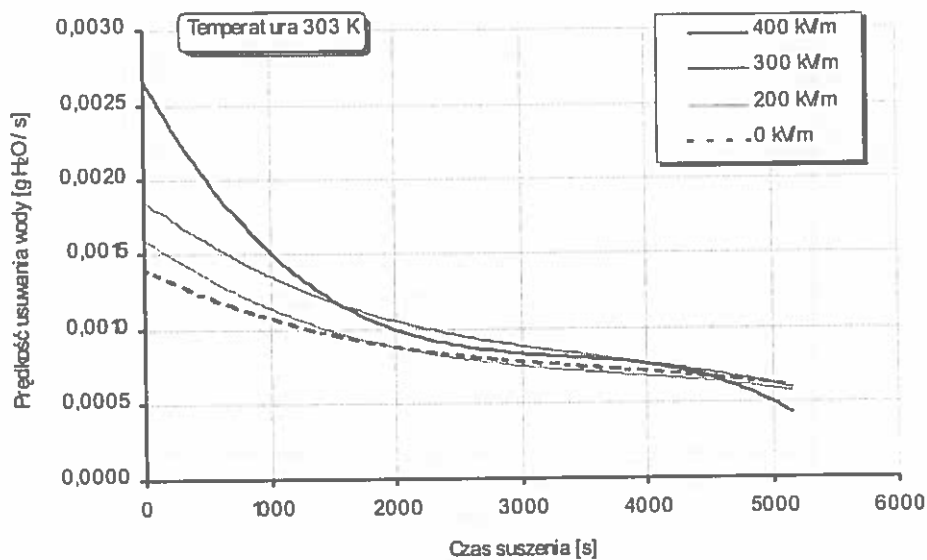
Krzywe suszenia próbek suszonych w polu elektrycznym z wiatrem jonowym wskazują na dwie podstawowe możliwości zastosowania pola: do skracania czasu całego cyklu suszarniczego lub osiągnięcia w dotychczasowych czasach suszenia mniejszych zawartości wody. Także widoczny jest fakt większego oddziaływania pola wraz ze wzrostem jego natężenia i temperatury powietrza suszącego.

Opierając się dodatkowo na wynikach analizy statystycznej można stwierdzić, że pole o najmniejszym natężeniu ze stosowanych (200 kV m^{-1}) nie wprowadza zmian, które można przyjąć na zadeklarowanym poziomie ufności $\alpha = 0,05$. Dla pozostałych przypadków (natężeń pola większych niż 200 kV m^{-1}) można wnioskować o bezspornym intensyfikowaniu usuwania wody przez pole elektryczne w procesie suszenia konwekcyjnego.

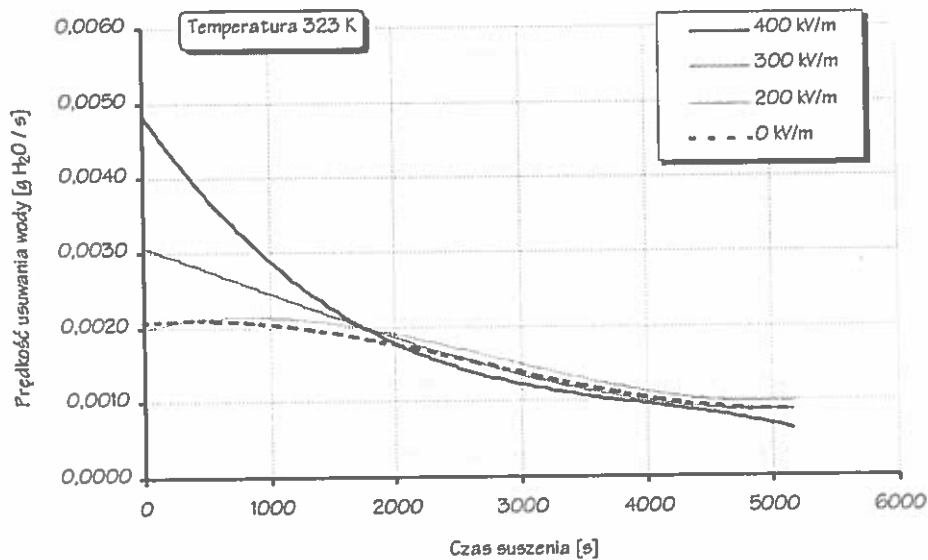
Trzecia grupa krzywych (Rys. 3.7 i 3.8) pokazuje prędkość usuwania wody. Zaprezentowane krzywe są aproksymacją rezultatów pomiarów za pomocą wielomianów trzeciego rzędu. Zwiększenie natężenia pola elektrycznego przy występowaniu wiatru jonowego zwiększa początkową szybkość usuwania wody. Na Rys. 3.7 widać, że zastosowanie pola elektrycznego może w początkowej fazie suszenia około dwukrotnie zwiększyć szybkość usuwania wody ($\sim 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ g s}^{-1}$ przy 400 kV m^{-1} i $\sim 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ g s}^{-1}$ przy braku pola). Ten sam efekt widać jeszcze bardziej wyraźnie przy zwiększonej temperaturze suszenia (323 K - Rys. 3.8) - rośnie szybkość usuwania wody (z $\sim 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ g s}^{-1}$ dla 400 kV m^{-1} i 303 K do $\sim 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ g s}^{-1}$ dla 400 kV m^{-1} i 323 K) i rośnie różnica w szybkości usuwania wody przy różnych natężeniach pola ($\sim 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ g s}^{-1}$ przy 400 kV m^{-1} i $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ g s}^{-1}$ przy braku pola).

Efekt przyspieszenia usuwania wody występujący w początkowej fazie suszenia zanika w dalszej części procesu. Oznacza, to że wspomaganie suszenia możliwe jest tylko w przypadku dużych wilgotności ziarna. Mimo, że przy suszeniu w temperaturze 303 K i 323 K początkowo występuje dwukrotne przyspieszenie odparowywania wody, to potem zanika ono tym szybciej im próbka zawiera mniej wody.

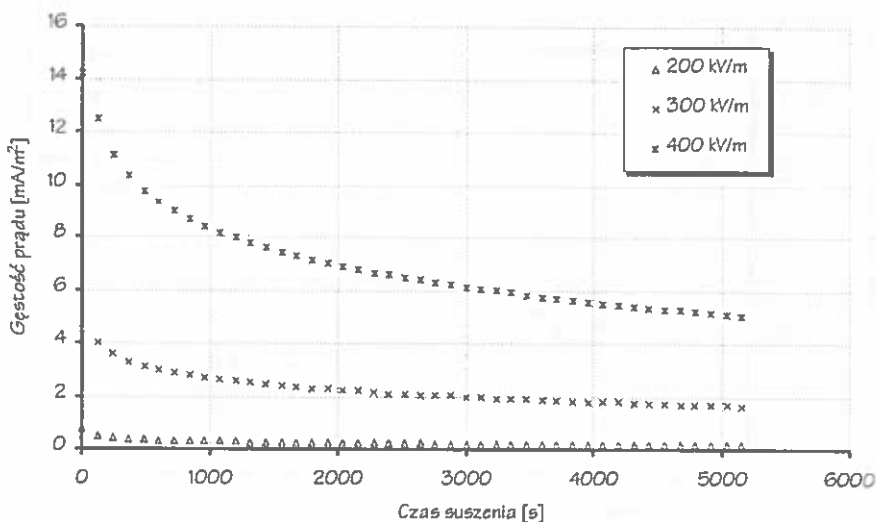
W przypadku temperatury 303 K pole powoduje przyspieszenie suszenia prawie do samego końca suszenia. Przy temperaturze 323 K prędkość usuwania wody w obecności pola elektrycznego osiąga wartość prędkości usuwania przy braku pola elektrycznego już po około 0,5 h trwania procesu (Rys. 3.8). Fakt ten wywołany jest zmniejszeniem wartości natężenia prądu ulotu (Rys. 3.9). Suszona próbka zmniejsza swoją wilgotność, osiąga przez to większą rezystancję, co zmienia rozkład pola w ten



Rys. 3.7. Prędkość usuwania wody w trakcie suszenia w temperaturze 303 K.
Fig. 3.7. Rate of water removing during drying time at temperature 303 K.



Rys. 3.8. Prędkość usuwania wody w trakcie suszenia w temperaturze 323 K.
Fig. 3.8. Rate of water removing during drying time at temperature 323 K.



Rys. 3.9. Gęstość prądu ulotu w trakcie procesu suszenia.

Fig. 3.9. Corona current density during drying.

sposób, jakby okładki kondensatora oddalały się i zmniejsza się wartość prądu ulotu, przez co oddziaływanie wiatru jonowego słabnie.

Podstawowe wyniki pomiarów można przedstawić w trzech punktach:

1. Pole elektryczne z wiatrem jonowym może intensyfikować wymianę masy w procesie suszenia.
2. Wzrost temperatury potęguje intensyfikację wpływu pola elektrycznego z wiatrem jonowym na prędkość usuwania wody.
3. Oddziaływanie pola widoczne jest zwłaszcza w początkowym okresie suszenia.

3.2.2. Suszenie przy stałej wartości prądu ulotu

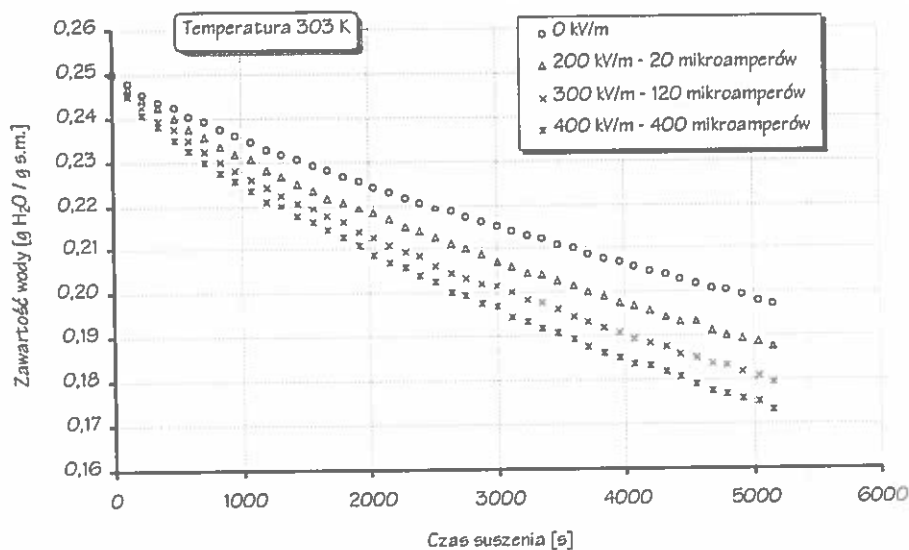
Do wykonania pomiarów korzystano z kondensatora pomiarowego z dodatkową elektrodą siatkową (Rys. 2.6 c). Funkcją elektrody ostrzowej było wygenerowanie wiatru jonowego o pożądanej wartości prądu ulotu, zaś elektroda siatkowa utrzymywała stałą wartość natężenia pola elektrycznego. Prędkość przepływu powietrza wynosiła $0,3 \text{ m s}^{-1}$. W grupie pomiarów o stałej wartości prądu ulotu przeprowadzono serie pomiarów dla następujących parametrów:

1. Natężenia pola o wartości średniej - 0, 200, 300, 400 kV m^{-1} .
2. Temperatury powietrza 30, 35, 40 $^{\circ}\text{C}$ (303, 308, 313 K).

Prezentacja wyników zostanie przeprowadzona głównie w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych w temperaturze 30 °C (303 K).

W trakcie pomiarów z wiatrem jonowym przy niestabilizowanym prądzie ulotu, wartość prądu ulotu zmniejszała się wraz ze zmniejszaniem wilgotności próbki. Na rys. 3.10÷3.12 zaprezentowano przebieg procesu suszenia próbek, w którym wartość prądu ulotu utrzymywana była na stałym poziomie, równym w przybliżeniu początkowej wartości prądu ulotu występującej przy braku stabilizacji prądu. W porównaniu z krzywymi suszenia w takiej samej temperaturze przy niestabilizowanym prądzie ulotu (Rys. 3.5), opierając się na wykresie z Rys. 3.10 można stwierdzić, że:

- o ile w przypadku niestabilizowanego prądu ulotu, pole elektryczne o natężeniu 200 kV m^{-1} nie wprowadzało w badanych przypadkach (30, 40, 50 °C) istotnych statystycznie zmian (p. Tabela 3.3), to przy tym samym natężeniu pola utrzymanie prądu o nieziennej wartości ($E = 200 \text{ kV m}^{-1}$, $I = 40 \text{ }\mu\text{A}$) zmienia przebieg procesu suszenia (Rys. 3.10),



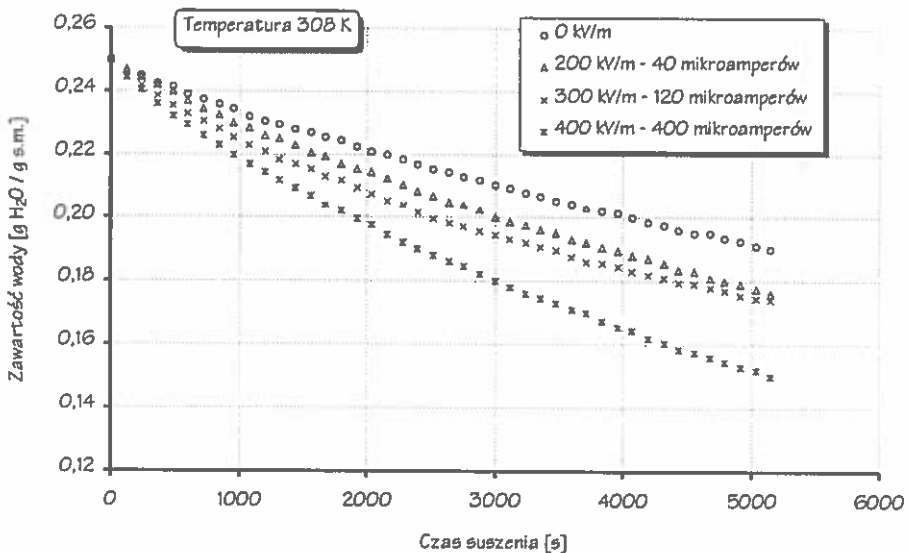
Rys. 3.10. Krzywe suszenia w temperaturze 303 K przy utrzymaniu stałych wartości prądu ulotu odpowiadających wartościom natężenia pola.

Fig. 3.10. Drying curve at temperature 303 K at constant (natural) values of corona current.

- utrzymanie stałej wartości prądu ulotu pozwoliło zwiększyć względną (w porównaniu z przebiegiem procesu przy braku pola) wartość masy odparowanej wody z 1 % na 18 % przy 200 kV m^{-1} , z 18 % na 34 % przy 300 kV m^{-1} i 24 % na 45 % przy 400 kV m^{-1} .

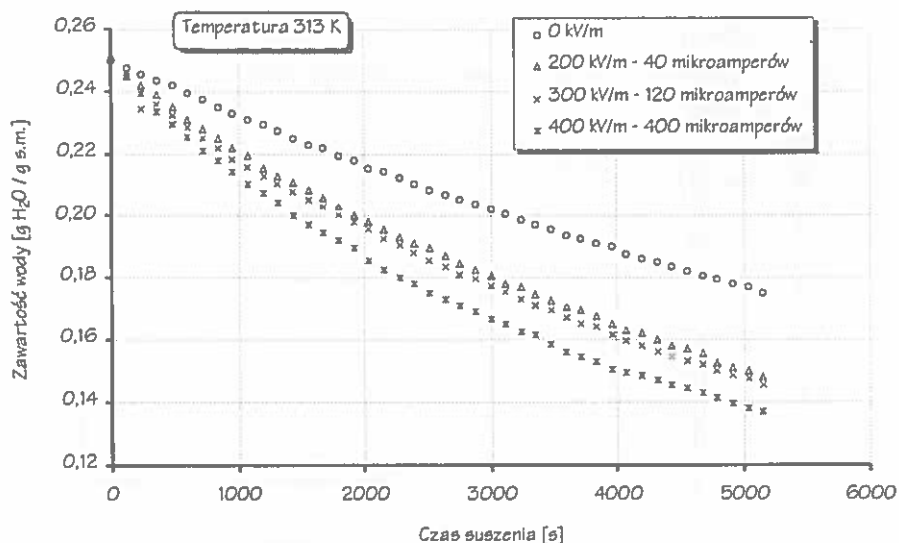
Na podstawie przebiegów krzywych suszenia z Rys. 3.10÷3.12 należy wnioskować, że wiatr jonowy jest podstawowym czynnikiem intensyfikującym suszenie. Kolejny wykres (Rys. 3.13) ilustruje wyniki prób suszenia prowadzonych w polu elektrycznym o jednakowym natężeniu ($E = 400 \text{ kV m}^{-1}$), ale przy różnych wartościach natężenia prądu ulotu (100, 200, 400 μA).

Przebieg krzywych potwierdza, że głównym czynnikiem zmieniającym przebieg suszenia jest wiatr jonowy. Większe wartości prądu ulotu powodują szybsze usuwanie wody, ale nie jest to zależność liniowa. Przekroczenie granicznej wartości gęstości prądu ulotu nie powoduje dalszego przyspieszania odparowania wody. W tym przypadku taką wartością jest gęstość 8 mA mm^{-2} , co odpowiada prądowi ulotu o natężeniu $200 \mu\text{A}$ (Rys. 3.14). Różnice przebiegów dla prądu ulotu $100 \mu\text{A}$ i dla prądów ulotu o wartości 200, 400 μA są rzędu 80 %, zaś różnice przebiegów dla prądu ulotu 200 A i 400 μA są tylko rzędu 50 %.



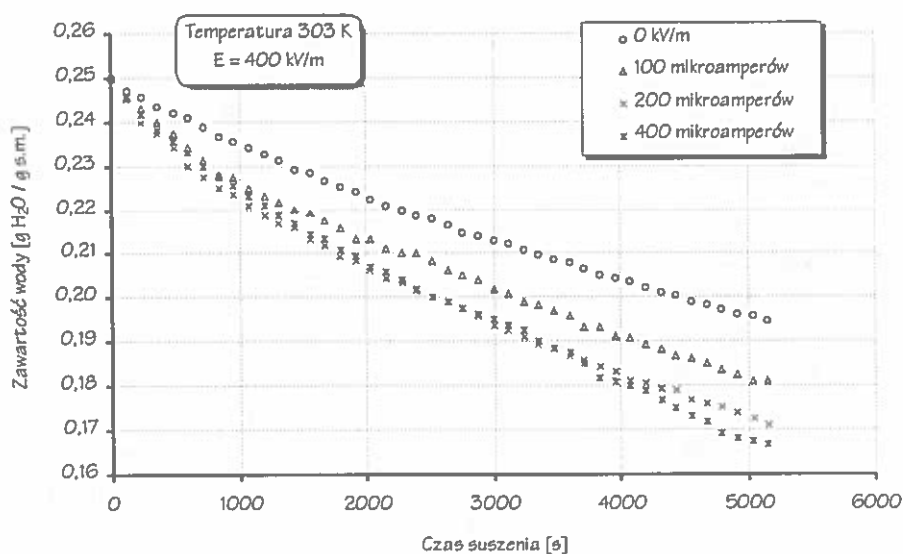
Rys. 3.11. Krzywe suszenia w temperaturze 308 K przy utrzymaniu stałych wartości prądu ulotu odpowiadających wartościom natężenia pola.

Fig. 3.11. Drying curve at temperature 308 K at constant (natural) values of corona current.



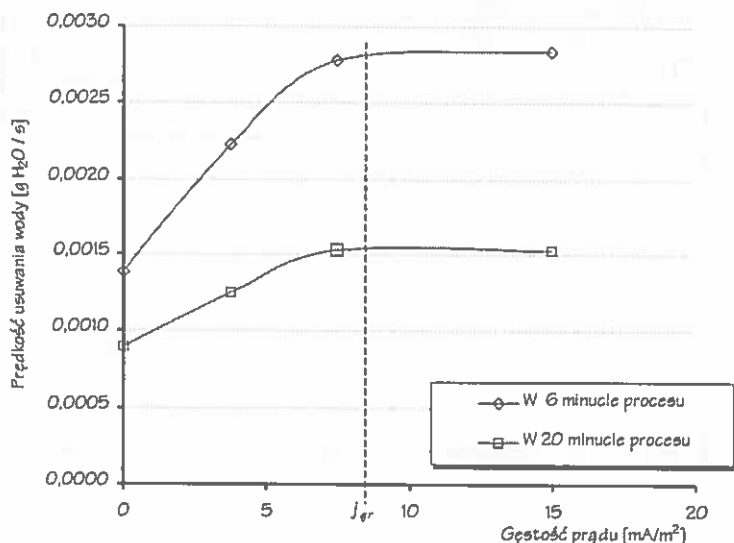
Rys. 3.12. Krzywe suszenia w temperaturze 313 K przy utrzymaniu stałych wartości prądu ulotu odpowiadających wartościom natężenia pola.

Fig. 3.12. Drying curve at temperature 313 K at constant (natural) values of corona current.



Rys. 3.13. Krzywe suszenia w temperaturze 303 K dla pola o natężeniu 400 kV m⁻¹ przy ulocie 100, 200 i 400 μA.

Fig. 3.13. Drying curve at temperature 303 K at the electric field intensity of 400 kV m⁻¹ and corona current 100, 200 and 400 μA.



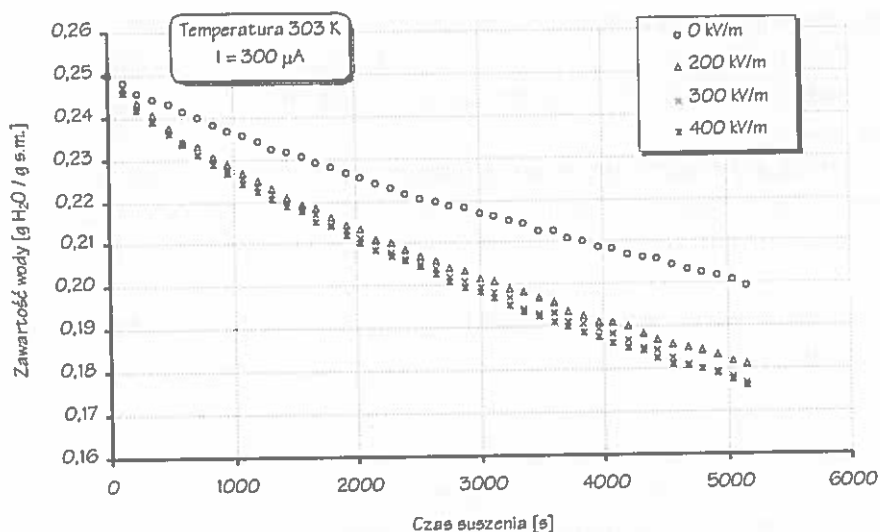
Rys. 3.14. Prędkość usuwania wody temp. 303 K dla pola o natężeniu 400 kV m^{-1} w funkcji gęstości prądu ulotu w dwóch momentach procesu suszenia.

Fig. 3.14. Rate of water removing during drying time at temperature 303 K at the electric field intensity of 400 kV m^{-1} versus corona current density for two points of drying process.

Podstawową możliwość oddziaływania na suszenie konwekcyjne przez wiatr jonowy, którego mierzalną cechą jest prąd ulotu dokumentuje także Rys. 3.15. Zaprezentowano na nim krzywe suszenia próbek w przypadku umieszczania ich w polach o różnych natężeniach ($200, 300, 400 \text{ kV m}^{-1}$), ale przy takiej samej wartości prądu ulotu ($300 \mu\text{A}$).

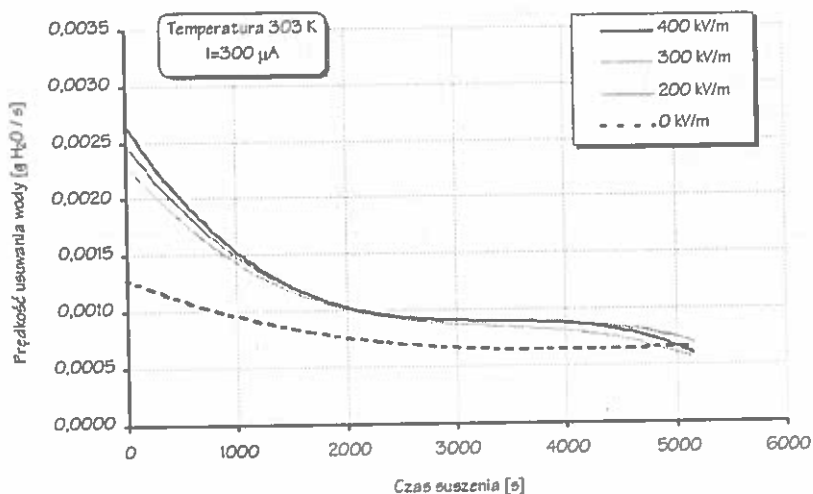
Różnice pomiędzy krzywymi dla różnych wartości natężeń pola (Rys. 3.15) można przyjąć jedynie na średnim poziomie prawdopodobieństwa rzędu 50 % (p. Tabela 3.10). Na tym poziomie nie można mówić o istotnych różnicach w oddziaływaniu pola elektrycznego o różnych natężeniach.

Porównanie wykresów prędkości usuwania wody przy zmiennej (Rys. 3.7, $E = 400 \text{ kV m}^{-1}$, $I_0 = 380 \mu\text{A}$) i stałej wartości prądu ulotu (Rys. 3.16, $E = 200, 300, 400 \text{ kV m}^{-1}$, $I = 300 \mu\text{A}$) wskazuje na podobny sposób oddziaływania wiatru jonowego. Jego początkowe działanie jest najsilniejsze (ok. dwukrotnie większa prędkość usuwania wody w obu przypadkach) i zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem wilgotności suszonego materiału. Utrzymanie stałej wartości prądu ulotu pozwala na przyspieszanie odparowywania wody prawie w całym badanym zakresie. Pole elektryczne przy „naturalnej” zmianie natężenia prądu ulotu intensyfikuje wymianę masy jedynie w początkowej fazie suszenia materiału (na Rys. 3.7 przez ok. 2500 s).



Rys. 3.15. Krzywe suszenia próbki w temperaturze 303 K w obecności pola o natężeniu 200, 300 i 400 kV m⁻¹ przy stałej wartości natężenia prądu ulotu 300 μ A.

Fig. 3.15. Drying curve at temperature 303 K at the electric field intensity of 200, 300 and 400 kV m⁻¹ and constant value corona current 300 μ A.



Rys. 3.16. Prędkość usuwania wody temperaturze 303 K w obecności pola o natężeniu 200, 300 i 400 kV m⁻¹ przy stałej wartości natężenia prądu ulotu 300 μ A.

Fig. 3.16. Drying curve at temperature 323 K at the electric field intensity of 200, 300 and 400 kV m⁻¹ and constant value corona current 300 μ A.

Przedstawione wyniki pomiarów można przedstawić w punktach:

1. Wiatr jonowy jest podstawowym czynnikiem intensyfikującym suszenie.
2. Intensyfikacja procesu suszenia nie jest związana z wartością prądu ulotu w sposób liniowy.
3. Utrzymanie wiatru jonowego na stałym poziomie przez cały czas trwania suszenia konwekcyjnego pozwala przedłużyć oddziaływanie pola na prawie cały okres suszenia. Wpływ jest największy w początkowym okresie suszenia.

3.3. Suszenie konwekcyjne w polu elektrycznym powietrzem z dodatkiem ozonu

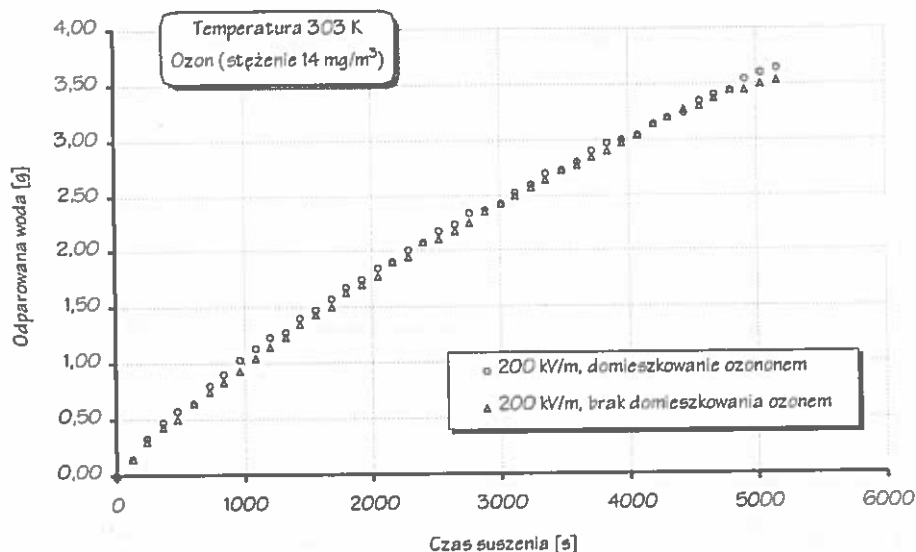
W rozdziale 1 zamieszczono informacje o możliwości ograniczenia energochłonności procesu suszenia konwekcyjnego przez zastosowanie ozonowania [33-36]. Wymienione tam dane wskazują na to, że wprowadzenie domieszki ozonu do powietrza suszącego materiał roślinny pozwala na obniżenie energochłonności procesu, a co się z tym wiąże, na jego przyspieszenie. Opisane przypadki wskazują nawet na oddziaływanie ozonu w stężeniu występującym w powietrzu atmosferycznym, oszczędności energii dochodzą do 50 %.

Zbudowane stanowisko pozwalało zbadać wpływ domieszkowania suszącego powietrza ozonem na proces suszenia konwekcyjnego wspomagany polem elektrycznym. Ozon wprowadzany był do komory suszarniczej na odcinku pomiędzy termowentylatorem, a komorą suszarniczą. Źródłem ozonu wytwarzanego z tlenu był ozonator Alfard 5G. Do pomiaru zawartości ozonu w powietrzu wykorzystywano miernik stężenia ozonu Ozone Analyzer BMT 961.

Próby prowadzone były dla czterech zakresów temperatur tj. przy braku nagzewu powietrza ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), 30, 35, 40 $^{\circ}\text{C}$ i pola elektrycznego o średniej wartości natężenia równej 200, 300 i 400 kV m^{-1} . W układzie stosowano kondensator umożliwiający generowanie wiatru jonowego o zmiennej wartości prądu ulotu (rys. 2.6 b). Próby wykonywano w dwóch seriach:

1. Suszenie powietrzem domieszkowanym ozonem (stężenie ozonu równe 14 mg m^{-3}) w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym.
2. Suszenie powietrzem w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym (próba porównawcza).

Analiza statystyczna i otrzymane wyniki umieszczono w dalszej części bieżącego rozdziału w Tabelach 3.11÷3.12. Reprezentatywne wykresy masy wody odparowanej w czasie suszenia dla trzech temperatur i trzech stosowanych natężeń pola ilustrują rysunki 3.17÷3.19.



Rys. 3.17. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 303 K w obecności pola o natężeniu 200 kV/m i domieszkowaniu powietrza ozonem.

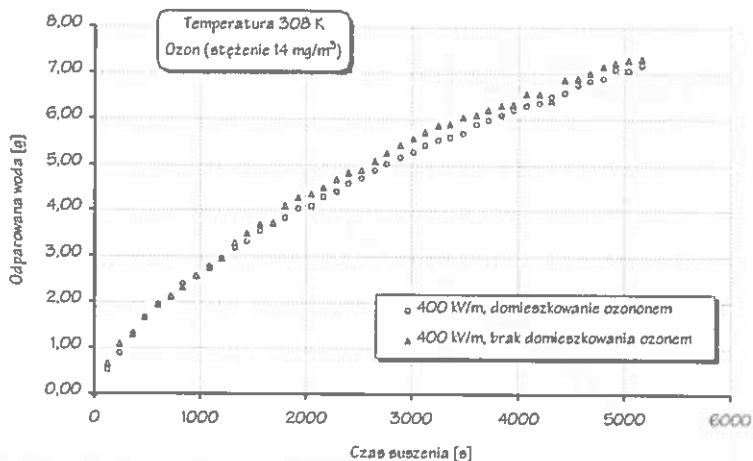
Fig. 3.17. Removed water mass versus time of drying at temperature 303 K at electric field intensity 200 kV m⁻¹ using air and ozone mixture.

Porównując krzywe masy odparowanej wody dla przypadku suszenia w obecności pola elektrycznego (bez ozonu) oraz krzywe dla przypadku suszenia w obecności pola przy domieszkowaniu powietrza ozonem, od razu widać, że nie występują pomiędzy nimi różnice rzędu 50 % masy odparowanej wody, sygnalizowane przez Krejmerica. Analiza statystyczna różnic pomiędzy tymi przebiegami wykazuje, że nie można uznać ich za różne na wybranym poziomie istotności.

W zaprezentowanych, osiągniętych eksperymentalnie, przypadkach średnia wartość prawdopodobieństwa, na poziomie którego możliwe byłoby uznanie przebiegów za różne wynosi:

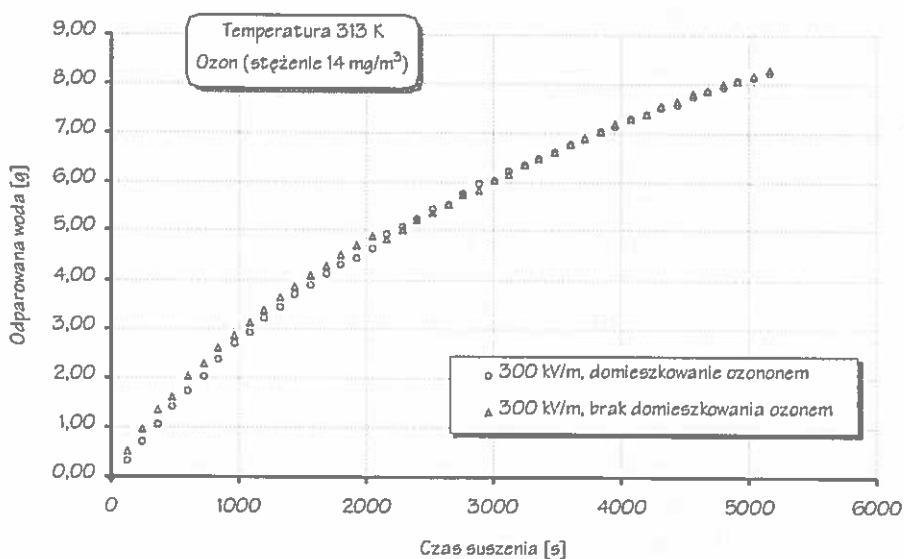
- 23 % dla $E = 200 \text{ kV m}^{-1}$ i temperatury 303 K.
- 45 % dla $E = 400 \text{ kV m}^{-1}$ i temperatury 308 K.
- 24 % dla $E = 300 \text{ kV m}^{-1}$ i temperatury 313 K.

Uzyskane wartości są dalekie od pożądanego prawdopodobieństwa (wyższego niż 95 %).



Rys. 3.18. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 308 K w obecności pola o natężeniu 400 kV m⁻¹ i domieszkowaniu powietrza ozonem.

Fig. 3.18. Removed water mass versus time of drying at temperature 308 K at electric field intensity 400 kV m⁻¹ using air and ozone mixture.



Rys. 3.19. Masa usuniętej wody w funkcji czasu suszenia przy suszeniu w temperaturze 323 K w obecności pola o natężeniu 300 kV m⁻¹ i domieszkowaniu powietrza ozonem.

Fig. 3.19. Removed water mass versus drying at temperature 323 K at electric field intensity 300 kV m⁻¹ using air and ozone mixture.

Przedstawione wyniki pomiarów można przedstawić w punktach:

1. Wprowadzenie do suszącego powietrza domieszki ozonu nie jest czynnikiem, który może dodatkowo zmienić kinetykę wymiany wody w trakcie suszenia konwekcyjnego w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym.

2. Domieszkowanie ozonem, przy stężeniu ozonu równym 14 mg m^{-3} nie zmienia w sposób mierzalny przebiegu procesu suszenia konwekcyjnego.

Tym samym nie zostały potwierdzone wyniki badań Krejmerica mówiące o wpływie ozonowania na obniżanie zapotrzebowania na energię w trakcie procesu suszenia [33-36].

3.4. Zestawienie wyników badań

Przeprowadzone obserwacje i wyniki pomiarów uprawniają do wyciągnięcia wymienionych dalej wniosków. Są one oparte na uzyskanych wynikach (przedstawionych w podrozdziałach 3.1÷3.3) i poparte analizą statystyczną zamieszczoną w podrozdziale 3.6. Jako granicę przyjmowania hipotez statystycznych przyjęto poziom istotności równy 0,05.

1. Pole elektrostatyczne o natężeniu mniejszym i równym 400 kV m^{-1} nie zmienia przebiegu suszenia dielektryków o strukturze warstwowej i kształcie sferoidy wydłużonej. Siły elektrostrykcyjne wywołane polem elektrostatycznym nie wpływają na przebieg suszenia konwekcyjnego. Wniosek ten przeczy hipotezie Taruszkina, mówiącej że siły elektrostrykcyjne powodujące ściskanie jednych a rozciąganie innych warstw dielektryków warstwowych (takimi są ziarna zbóż), może prowadzić do zmiany zdolności do zatrzymywania wilgoci. Wniosek ten podważa także hipotezę o możliwości wykorzystania tego zjawiska w procesie suszenia do obniżania energochłonności procesu suszenia nasion kultur rolniczych oraz innych materiałów pochodzenia organicznego [73].

2. Przy dużej prędkości przepływu powietrza (przy przepływie turbulentnym, burzliwym; tu przy $v > 0,3 \text{ m s}^{-1}$) wpływ pola elektrostatycznego i pola elektrycznego z wiatrem jonowym nie występuje.

3. Pole elektryczne z wiatrem jonowym może intensyfikować wymianę masy w procesie suszenia.

4. Wzrost temperatury potęguje intensyfikację wpływu pola elektrycznego z wiatrem jonowym na prędkość usuwania wody przy czym, jeżeli prąd ulotu nie jest utrzymywany na stałym poziomie, oddziaływanie widoczne jest zwłaszcza w początkowym okresie suszenia i okres jego wpływu skraca się wraz ze wzrostem temperatury powietrza suszącego (Rys. 3.7 i 3.8).

5. W przypadku suszenia konwekcyjnego w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym, podstawowym czynnikiem intensyfikującym suszenie jest wiatr jonowy. Intensyfikacja procesu suszenia nie jest związana z wartością prądu ulotu w sposób liniowy (Rys. 3.13).

6. Utrzymanie wiatru jonowego na stałym poziomie przez cały czas trwania suszenia konwekcyjnego pozwala przedłużyć oddziaływanie pola na prawie cały okres suszenia. Podobnie jak w przypadku wiatru jonowego o wartości prądu ulotu zmiennej w czasie, wpływ jest największy w początkowym okresie suszenia (Rys. 3.16).

7. Przy suszeniu konwekcyjnym w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym, domieszkowanie suszącego powietrza ozonem nie jest czynnikiem, który może dodatkowo zmienić przebieg odparowywania wody w trakcie suszenia. Zarejestrowane różnice przy porównywaniu przebiegu tego typu procesów rzadko przekraczają 50 % prawdopodobieństwo wystąpienia różnicy pomiędzy procesami (Rys. 3.1÷73.19, Tabela 3.11÷3.12).

Przebiegi krzywych suszenia z podrozdziału 3.2 (Rys. 3.3÷3.16) wskazują jednoznacznie na możliwość przyśpieszenia procesu suszenia konwekcyjnego poprzez wprowadzenie do obszaru komory suszarniczej jonizującego pola elektrycznego.

3.5. Oszacowanie wpływu pola elektrycznego na energochłonność suszenia konwekcyjnego

Z energetycznego punktu widzenia ważna jest energochłonność takiej metody w porównaniu z konwencjonalną metodą konwekcyjną. Porównanie to jest możliwe przy pomocy współczynnika oszczędności energii $q\%$ [32,63].

Porównanie wartości energii wprowadzanych ogrzewanym powietrzem i polem elektrycznym w używanym układzie pomiarowym zostało zamieszczone w Tabeli 3.2. Zakładając, że cała energia wiatru jonowego może być przekształcana w ciepło, to udział energii cieplnej wiatru jonowego w stosunku do energii nagrzanego powietrza nie przekracza 5 %.

Założenia konieczne do korzystania ze współczynnika oszczędności energii $q\%$:

1. Ilość energii dostarczanej przez termowentylator próbkom w obu procesach była jednakowa.

2. Energia dostarczana przez ogrzane powietrze jest podstawowym czynnikiem powodującym usuwanie wilgoci.

3. Energia rozpraszana przez wiatr jonowy jest pomijana ze względu na to, że jej wartość jest o kilka rzędów niższa od energii wprowadzanej przez nagrzane powietrze.

T a b e l a 3.2. Zestawienie wartości mocy dostarczanej przez ogrzane powietrze i wiatr jonowy (temp. otoczenia ≈ 295 K)

T a b l e 3.2. Comparison of power delivered by heated air and ionic wind (environment temp. ≈ 295 K) values

Temperatura powietrza w komorze (K)	Moc cieplna wentylatora (W)	Średnie natężenie pola elektrycznego (kV m ⁻¹)	Początkowa wartość prądu ulotu (μA)	Moc cieplna wprowadzana przez wiatr jonowy* (W)	Stosunek mocy wprowadzanych przez wiatr jonowy i nagrzane powietrze** (%)
303	~ 95	200	20	0,12	0,13
308	~154	300	120	1,08	0,70
313	~454	400	380	4,56	1,00

* W chwili początkowej, przy założeniu, że cała energia wiatru przekształcana jest w ciepło.

** Dla kombinacji temperatur i prądów ulotu odpowiadających wierszom tabeli.

W ogólnym przypadku można zapisać, że ilość ciepła Q potrzebna do odparowania z ciała stałego wynosi [63]:

$$Q = m \cdot r, \quad (3.2)$$

gdzie: Q - ciepło potrzebne do odparowania wody o masie m , J; m - masa odparowywanej wody, g; r - ciepło parowania, J g⁻¹.

Zakłada się, że w obu procesach ilość energii dostarczonej w tym samym czasie przez termowentylator była taka sama.

$$Q_1 = Q_2 \quad (3.3)$$

gdzie: Q_1 - ciepło dostarczone do usuwania wody przy braku pola elektrycznego, J; Q_2 - ciepło dostarczone do usuwania wody w obecności pola elektrycznego, J.

Jeśli odniesiemy to ciepło do ubytków zawartości masy wody w trakcie procesu suszenia, to wyrażenia Q_1 i Q_2 przyjmą postać:

$$Q_1 = m_s (u - u_1) r_1, \quad (3.4)$$

$$Q_2 = m_s (u - u_2) r_2, \quad (3.5)$$

gdzie: m_s - masa ciała suchego, g, u - zawartość wody przed suszeniem, kg H₂O kg⁻¹ suchej masy; u_1 - zawartość wody w próbce nie poddawanej działaniu pola

elektrycznego w czasie suszenia, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ suchej masy; u_2 - zawartość wody w próbce poddawanej działaniu pola elektrycznego w czasie suszenia, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ suchej masy; r_1 - jednostkowe ciepło potrzebne do odparowania jednostkowej masy wody przy suszeniu bez pola elektrycznego, J kg^{-1} ; r_2 - jednostkowe ciepło potrzebne do odparowania jednostkowej masy wody przy suszeniu w obecności pola elektrycznego, J kg^{-1} .

Opierając się na równaniach (3.4) i (3.5) można wyprowadzić wzór na współczynnik oszczędności energii $q\%$, w którym wykonuje się porównanie jednostkowych wartości ciepła parowania wody w obu przypadkach:

$$q\% = \left(\frac{r_1}{r_2}\right) \cdot 100 = \left(\frac{u - u_2}{u - u_1} - 1\right) \cdot 100, \quad (3.6)$$

gdzie: $q\%$ - współczynnik oszczędności energii, %.

Jeżeli jednostkowa wartość ciepła parowania w obu przypadkach będzie jednakowa, to współczynnik będzie miał wartość równą zeru.

Końcowych obliczeń współczynnika oszczędności energii można dokonać znając wilgotności próbek (w) lub ich zawartość wody (u). Wstawiając do wzoru (3.6), w miejsce zawartości wody u wyrażenie (3.7) [52] otrzymujemy wyrażenie (3.8).

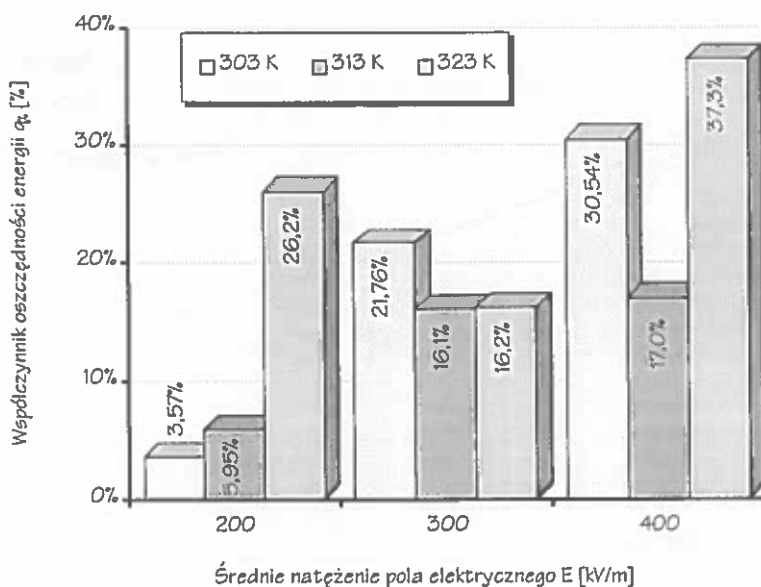
$$u = \frac{w}{100 - w}, \quad (3.7)$$

$$q\% = \left(\frac{(w - w_2) \cdot (100 - w_1)}{(w - w_1) \cdot (100 - w_2)} - 1\right) \cdot 100, \quad (3.8)$$

gdzie: u - zawartość wody, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ s.m., w - wilgotność próbki ziarna przed suszeniem, %; w_1 - wilgotność próbki ziarna po suszeniu konwekcyjnym przy braku pola elektrycznego, %; w_2 - wilgotność próbki ziarna po suszeniu konwekcyjnym z udziałem pola elektrycznego, %.

Posługując się takim współczynnikiem wykonano obliczenia, których ilustracją jest wykres współczynnika oszczędności energii w funkcji stosowanego natężenia pola (Rys. 3.20).

Maksymalne oszczędności energii liczone na podstawie zawartości wody po 90 minutach suszenia, otrzymano w przypadku maksymalnej wartości natężenia pola elektrostatycznego. Wynosiły one odpowiednio 3,6 % przy 200 kV m^{-1} przy temperaturze $30 \text{ }^\circ\text{C}$, aż do 37,3 % przy natężeniu pola 400 kV m^{-1} i temperaturze $50 \text{ }^\circ\text{C}$. W przypadku temperatur $30 \text{ }^\circ\text{C}$ i $40 \text{ }^\circ\text{C}$ wraz z natężeniem pola wzrasta współczynnik oszczędności energii.

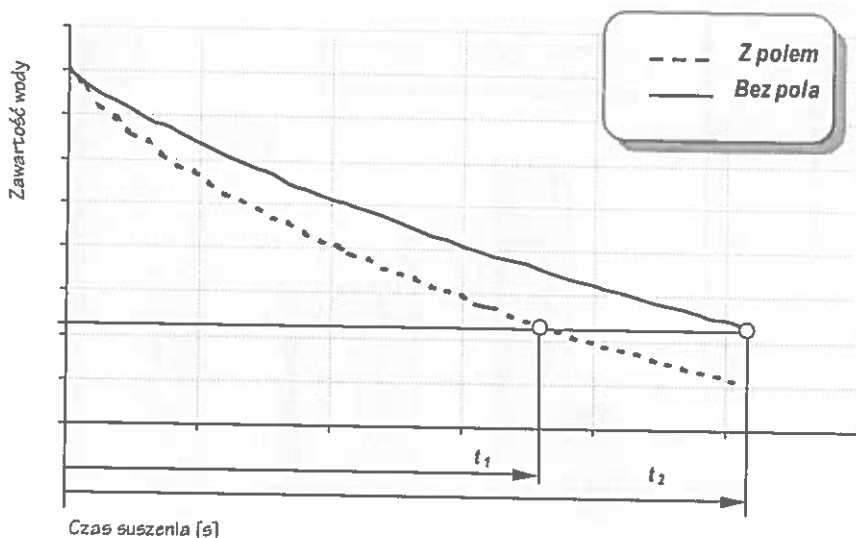


Rys. 3.20. Współczynnik oszczędności energii w funkcji stosowanego natężenia pola.
 Fig. 3.20. Energy saving coefficient versus electric field intensity.

Maksymalne oszczędności energii liczone na podstawie zawartości wody po 90 minutach suszenia, otrzymano w przypadku maksymalnej wartości natężenia pola elektrostatycznego. Wynosiły one odpowiednio 3,6 % przy 200 kV m⁻¹ przy temperaturze 30 °C, aż do 37,3 % przy natężeniu pola 400 kV m⁻¹ i temperaturze 50 °C. W przypadku temperatur 30 i 40 °C wraz z natężeniem pola wzrasta współczynnik oszczędności energii.

Podobne wartości współczynnika oszczędności energii można otrzymać przeprowadzając porównanie krzywych suszenia próbek. Przez porównanie różnicy pomiędzy czasami suszenia (zależność (3.9)); potrzebnym do osiągnięcia przez próbkę nie poddaną działaniu pola elektrycznego wymaganej wilgotności i czasem potrzebnym do osiągnięcia tej samej wilgotności przy wspomaganie suszenia polem t_1 , z czasem suszenia t_2 przy braku pola elektrycznego, otrzymuje się wartości takie, jak wartości współczynnika oszczędności energii otrzymywane na podstawie zawartości wody próbek.

$$q\% = \frac{t_2 - t_1}{t_2} \cdot 100. \quad (3.9)$$



Rys. 3.21. Określanie współczynnika oszczędności energii na podstawie czasu suszenia.
 Fig. 3.21. Energy saving coefficient determination on the base of drying time.

3.6. Analiza statystyczna błędu pomiarowego

Celem niniejszej pracy jest odpowiedź na pytanie o wpływ parametrów pola elektrycznego na przebieg procesu suszenia. Ponieważ została przeprowadzona skończona liczba prób, tzn. nie przebadano całej populacji, wyniki obarczone są błędem statystycznym [7]. W efekcie pomiarów, w obrębie jednego eksperymentu suszenia, otrzymywano dla każdej wstępnie zadeklarowanej chwili, dwie N_1 i N_2 elementowe próby z informacją o masie usuniętej wody. Dotychczas w pracy korzystano z jednej wartości statystycznej, którą była wartość średnia z próby.

Analiza statystyczna błędu polega na postawieniu hipotezy, a następnie zweryfikowaniu jej na podstawie wyników z przeprowadzonych prób. Decyzję podejmuje się na podstawie testu statystycznego. Jeżeli postawiona hipoteza nie zostanie zweryfikowana, zostanie przyjęta hipoteza alternatywna [37]. W teście wymagane jest zadeklarowanie poziomu istotności określającego prawdopodobieństwo popełnienia błędu przyjęcia weryfikowanej hipotezy.

W analizowanym przypadku wymagane jest określenie, czy w danej chwili wartość średnia masy wody usuniętej z próbek metodą suszenia konwekcyjnego równa jest wartości średniej masy wody usuniętej z próbek poddanych działaniu pola

elektrycznego. Została więc postawiona hipoteza o równości wartości średnich masy odparowanej wody. Hipotezą alternatywną jest twierdzenie, że masa odparowanej wody zależy od występowania pola elektrycznego. Przyjęty poziom istotności wynosi 0,05 co odpowiada prawdopodobieństwu na poziomie 95 %.

Mimo, że globalna ilość próbek z pomiarów jest duża (przeprowadzono około 430 prób suszenia), to w obrębie pojedynczej serii pomiarowej (w danej konfiguracji układu, przy zadanej temperaturze i natężeniu pola elektrycznego), przeprowadzono taką ilość pomiarów (mniej niż 10), która zmusza do zastosowania metody Studenta [72]. Opierając się na prawie wielkich liczb można założyć, że ubytek masy wody jest zmienną losową o rozkładzie normalnym. Weryfikację hipotezy o równości wartości średnich masy usuniętej wody z dwóch typów próbek można przeprowadzić w oparciu o statystykę Cochran i Coxa lub test różnic Studenta [7,37]. Powszechniej stosuje się drugą z metod.

Test różnic Studenta polega na porównaniu wartości ilorazu bezwzględnej różnicy wartości średnich $|\Delta|$ i estymatora wariancji różnicy wartości średnich s_{Δ} z kwantylem rozkładu Studenta t'_{α} dla wybranego poziomu istotności. Jeżeli obliczona wartość jest większa od wartości granicznej t'_{α} , to hipoteza o równości wartości średnich jest odrzucana.

$$|t_S| = \frac{|\Delta|}{s_{\Delta}} \geq t'_{\alpha}, \quad (3.10)$$

gdzie: t_S - zmienna rozkładu Studenta dla ilości stopni swobody zależnej od liczebności próbek; t'_{α} - wartość graniczna funkcji dla poziomu istotności α , $t'_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}$; \bar{x}, \bar{y} - wartości średnie z prób; Δ - różnica wartości średnich, $\Delta = \bar{x} - \bar{y}$; s_{Δ} - estymator wariancji różnicy wartości średnich:

$$s_{\Delta}^2 = s_x^2 + s_y^2 = \frac{N_1 + N_2}{N_1 \cdot N_2} \frac{(N_1 - 1)s_x^2 + (N_2 - 1)s_y^2}{(N_1 - 1) + (N_2 - 1)} \quad (3.11)$$

gdzie: s_x^2, s_y^2 - wariancje średnich z próby odpowiednio dla prób x i y ; s_x^2, s_y^2

- wariancje zmiennych x i y odpowiednio dla prób x i y ; N_1, N_2 - liczebności prób x i y .

W przypadku kiedy nierówność (3.10) nie zachodzi, przyjmowana jest hipoteza o równości wartości oczekiwanych. W przypadku kiedy nierówność (3.10) zachodzi, nie występuje równość wartości średnich. Jeżeli różnica wartości średnich Δ przyjmuje wartość dodatnią, to zachodzi relacja większości wartości oczekiwanej \hat{x} nad wartością oczekiwaną \hat{y} [7].

Bazując na teście różnic Studenta przeprowadzono analizę równości wartości średnich dla wszystkich uzyskanych danych pomiarowych. Analizowane przypadki

zostały pogrupowane w oparciu o typ przeprowadzonego procesu suszenia. W poszczególnych grupach znalazło się porównanie wartości średnich mas odparowanej wody w przypadkach suszenia:

1. W polu elektrycznym o stałej średniej wartości natężenia pola elektrycznego oraz zmiennym w czasie natężeniu prądu ulotu, zależnym od stopnia wilgotności suszonego dielektryka.

2. W polu elektrycznym o stałej średniej wartości natężenia pola elektrycznego i stałym natężeniu prądu ulotu równym początkowemu prądowi ulotu.

3. W polu elektrycznym o stałej średniej wartości natężenia pola elektrycznego 400 kV m^{-1} i stałym natężeniu prądu ulotu równym dla poszczególnych przypadków 100, 200 i $400 \text{ }\mu\text{A}$, przy suszeniu powietrzem o temperaturze $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. W polu elektrycznym o stałym natężeniu prądu ulotu o wartości $300 \text{ }\mu\text{A}$ przy natężeniach pola elektrycznego o wartości 200, 300 i 400 kV m^{-1} przy suszeniu powietrzem o temperaturze $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Powietrzem domieszkowanym ozonem w temperaturach: otoczenia ($\sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$), 30, 35 i $40 \text{ }^\circ\text{C}$ wspomaganym polem elektrycznym o natężeniu 200, 300 i 400 kV m^{-1} .

Podstawowa analiza wyników dotyczyła określenia, czy przebieg procesu, w którym występuje oddziaływanie pola jest różny od procesu, w którym pole nie występuje. Równolegle zbadano wagę różnic oddziaływania pomiędzy czynnikami. Chodziło o sprawdzenie, czy oddziaływanie na jednym z poziomów wprowadza zmianę przebiegu procesu ważną statystycznie w stosunku do oddziaływania na innym z poziomów (np. czy przyspieszenie suszenia polem o natężeniu 300 kV m^{-1} jest inne od przyspieszenia polem 400 kV m^{-1}). Ze względu na podobny charakter wyników w dalszej części zaprezentowano tylko część tabel, charakterystycznych dla poszczególnych grup pomiarów. W tabelach zastosowano następujące oznaczenia:

\bar{x} - ubytek masy wody przy braku oddziaływania pola elektrycznego lub ozonu, wartość średnia, g;

$\bar{y}_{i,j}$ - wartość średnia ubytku masy wody przy oddziaływaniu pola elektrycznego o średnim natężeniu w kV cm^{-1} równym indeksowi i w danej temperaturze w $^\circ\text{C}$ równej indeksowi j , g;

$|t_S|$ - wartość bezwzględna zmiennej rozkładu Studenta dla porównywanych wartości średnich,

$P'(t)$ - wartość prawdopodobieństwa, na poziomie którego można uznać obie wartości za różne,

$x=y$ - równość wartości średnich na poziomie prawdopodobieństwa o poziomie istotności $\alpha = 0,05$,

$y > x$ - odrzucenie hipotezy o równości wartości średnich poziomie istotności $\alpha = 0,05$; w trakcie jednego z procesów masa usuniętej wody jest większa.

T a b e l a 3.3. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w polu elektrycznym o średnim natężeniu 200 kV m^{-1} z ulotem w temperaturze $30 \text{ }^\circ\text{C}$

T a b l e 3.3. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensity 200 kV m^{-1} and corona current at temperature $30 \text{ }^\circ\text{C}$

Czas suszenia	\bar{x}	\bar{y} 2,30	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=2,0484$		
(s)	(g)		$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,20	0,23	1,0132	x=y	68,038
240	0,32	0,40	1,9145	x=y	93,418
360	0,48	0,55	1,3817	x=y	82,201
480	0,61	0,70	2,2634	y>x	96,845
600	0,75	0,86	2,2520	y>x	96,765
720	0,89	0,96	1,3261	x=y	80,448
840	1,03	1,11	1,5954	x=y	87,816
960	1,17	1,25	1,2786	x=y	78,846
1080	1,28	1,39	1,8990	x=y	93,209
1200	1,39	1,53	2,4806	y>x	98,060
1320	1,54	1,65	1,9042	x=y	93,279
1440	1,64	1,76	1,9623	x=y	94,026
1560	1,75	1,85	1,5958	x=y	87,825
1680	1,87	2,01	2,1279	y>x	95,771
1800	1,98	2,10	1,6882	x=y	89,752
1920	2,07	2,24	2,7760	y>x	99,030
2040	2,19	2,33	1,8807	x=y	92,956
2160	2,29	2,43	1,8807	x=y	92,956
2280	2,40	2,53	1,7532	x=y	90,950
2400	2,49	2,61	1,6531	x=y	89,051
2520	2,58	2,71	1,6316	x=y	88,604
2640	2,70	2,84	1,6928	x=y	89,841
2760	2,82	2,95	1,3864	x=y	82,343
2880	2,89	3,03	1,5190	x=y	86,004
3000	2,99	3,13	1,3503	x=y	81,225
3120	3,06	3,21	1,6774	x=y	89,541
3240	3,16	3,30	1,3647	x=y	81,680
3360	3,25	3,39	1,5219	x=y	86,074
3480	3,35	3,44	0,9975	x=y	67,293
3300	3,43	3,56	1,3050	x=y	79,749
3720	3,51	3,63	1,2130	x=y	76,472
3840	3,62	3,71	0,8324	x=y	58,780
3960	3,70	3,79	0,8630	x=y	60,452
4080	3,77	3,86	0,8211	x=y	58,145

Tabela 3.3. Kontynuacja
Table 3.3. Continuation

Czas suszenia (s)	\bar{x}	\bar{y} 2,30	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_\alpha = t_{1-\alpha/2}=2,0484$		
	(g)		$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
4200	3,86	3,94	0,6132	x=y	45,528
4320	3,94	4,03	0,7303	x=y	52,870
4440	4,03	4,10	0,6306	x=y	46,658
4560	4,10	4,16	0,5421	x=y	40,794
4680	4,19	4,21	0,1790	x=y	14,081
4800	4,26	4,31	0,4551	x=y	34,745
4920	4,32	4,41	0,8405	x=y	59,223
5040	4,38	4,44	0,4608	x=y	35,149
5160	4,48	4,54	0,4373	x=y	33,472

Tabela 3.4. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w polu elektrycznym o średnim natężeniu 300 kV m^{-1} z ulotem w temperaturze 30°C

Table 3.3. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensity 300 kV m^{-1} and corona current at temperature 30°C

Czas suszenia (s)	\bar{x}	\bar{y} 3,30	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_\alpha = t_{1-\alpha/2}=2,0555$		
	(g)		$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,20	0,22	0,5233	x=y	39,480
240	0,32	0,40	2,1592	y>x	95,976
360	0,48	0,65	4,7917	y>x	99,994
480	0,61	0,82	5,6690	y>x	99,999
600	0,75	0,98	4,7124	y>x	99,993
720	0,89	1,15	6,9366	y>x	100,000
840	1,03	1,35	6,7164	y>x	100,000
960	1,17	1,48	9,0515	y>x	100,000
1080	1,28	1,65	7,6624	y>x	100,000
1200	1,39	1,82	8,3808	y>x	100,000
1320	1,54	1,97	8,9817	y>x	100,000
1440	1,64	2,12	8,7145	y>x	100,000
1560	1,75	2,25	7,8450	y>x	100,000

Tabela 3.4. Kontynuacja
Table 3.4. Continuation

Czas suszenia	\bar{x}	\bar{y} 3,30	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=2,0555$		
(s)	(g)		$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
1680	1,87	2,38	9,7476	y>x	100,000
1800	1,98	2,50	10,3372	y>x	100,000
1920	2,07	2,65	12,0139	y>x	100,000
2040	2,19	2,77	10,9105	y>x	100,000
2160	2,29	2,88	10,9875	y>x	100,000
2280	2,40	3,02	10,1512	y>x	100,000
2400	2,49	3,13	11,5177	y>x	100,000
2520	2,58	3,23	11,6806	y>x	100,000
2640	2,70	3,33	9,0122	y>x	100,000
2760	2,82	3,45	9,2896	y>x	100,000
2880	2,89	3,58	12,1769	y>x	100,000
3000	2,99	3,68	9,7332	y>x	100,000
3120	3,06	3,80	12,7631	y>x	100,000
3240	3,16	3,88	11,7951	y>x	100,000
3360	3,25	3,98	11,9441	y>x	100,000
3480	3,35	4,10	11,2847	y>x	100,000
3300	3,43	4,18	10,1482	y>x	100,000
3720	3,51	4,28	10,3923	y>x	100,000
3840	3,62	4,38	10,2703	y>x	100,000
3960	3,70	4,45	10,0179	y>x	100,000
4080	3,77	4,53	10,0267	y>x	100,000
4200	3,86	4,65	8,8533	y>x	100,000
4320	3,94	4,72	10,1787	y>x	100,000
4440	4,03	4,80	9,7367	y>x	100,000
4560	4,10	4,88	9,9458	y>x	100,000
4680	4,19	4,97	9,6916	y>x	100,000
4800	4,26	5,07	10,0323	y>x	100,000
4920	4,32	5,15	10,2515	y>x	100,000
5040	4,38	5,23	10,0192	y>x	100,000
5160	4,48	5,28	9,3520	y>x	100,000

T a b e l a 3.5. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w polu elektrycznym o średnim natężeniu 400 kV m^{-1} z ulotem w temperaturze $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

T a b l e 3.5. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensity 400 kV m^{-1} and corona current at temperature $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Czas suszenia	\bar{x}	\bar{y} 4,30	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha}^{\dagger} = t_{1-\alpha/2}=2,0484$		
(s)	(g)		$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,20	0,34	3,4645	y>x	99,827
240	0,32	0,64	5,7662	y>x	100,000
360	0,48	0,89	7,5943	y>x	100,000
480	0,61	1,14	8,3127	y>x	100,000
600	0,75	1,28	8,1120	y>x	100,000
720	0,89	1,53	10,1986	y>x	100,000
840	1,03	1,73	9,9981	y>x	100,000
960	1,17	1,81	9,0072	y>x	100,000
1080	1,28	2,01	11,2842	y>x	100,000
1200	1,39	2,21	12,3351	y>x	100,000
1320	1,54	2,35	8,7357	y>x	100,000
1440	1,64	2,50	11,0414	y>x	100,000
1560	1,75	2,66	11,0142	y>x	100,000
1680	1,87	2,75	10,4171	y>x	100,000
1800	1,98	2,93	11,9693	y>x	100,000
1920	2,07	3,08	14,3620	y>x	100,000
2040	2,19	3,15	11,1062	y>x	100,000
2160	2,29	3,30	12,4162	y>x	100,000
2280	2,40	3,39	11,6822	y>x	100,000
2400	2,49	3,54	13,0056	y>x	100,000
2520	2,58	3,64	13,5050	y>x	100,000
2640	2,70	3,73	12,4134	y>x	100,000
2760	2,82	3,86	12,8571	y>x	100,000
2880	2,89	3,94	12,3549	y>x	100,000
3000	2,99	4,03	11,1222	y>x	100,000
3120	3,06	4,20	11,7939	y>x	100,000
3240	3,16	4,24	11,7214	y>x	100,000
3360	3,25	4,38	11,9879	y>x	100,000
3480	3,35	4,45	11,7161	y>x	100,000
3300	3,43	4,54	12,3910	y>x	100,000
3720	3,51	4,65	11,9393	y>x	100,000
3840	3,62	4,75	12,7227	y>x	100,000
3960	3,70	4,80	12,6607	y>x	100,000
4080	3,77	4,90	14,0000	y>x	100,000

Tabela 3.5. Kontynuacja
Table 3.5. Continuation

Czas suszenia	\bar{x}	\bar{y} 4,30	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=2,0484$		
(s)	(g)		$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
4200	3,86	4,96	14,1996	y>x	100,000
4320	3,94	5,01	13,8358	y>x	100,000
4440	4,03	5,14	15,0095	y>x	100,000
4560	4,10	5,20	13,6613	y>x	100,000
4680	4,19	5,29	15,6283	y>x	100,000
4800	4,26	5,35	14,0649	y>x	100,000
4920	4,32	5,39	11,8009	y>x	100,000
5040	4,38	5,48	12,8981	y>x	100,000
5160	4,48	5,54	11,9417	y>x	100,000

Tabela 3.6. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w polu elektrycznym o średnim natężeniu 200 kV m^{-1} przy stałym prądzie ulotu $40 \mu \text{ A}$ w temperaturze $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Table 3.6. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensity 200 kV m^{-1} and constant corona current value $40 \mu \text{ A}$ at temperature $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Czas suszenia	\bar{x}	\bar{y} 2,40	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=4,3027$		
(s)	(g)		$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,20	0,40	1,4142	x=y	70,711
240	0,35	0,65	1,8974	x=y	80,178
360	0,50	0,90	1,7889	x=y	78,446
480	0,65	1,20	2,6679	x=y	88,354
600	0,85	1,50	3,1530	x=y	91,242
720	1,00	1,75	2,7854	x=y	89,166
840	1,20	2,00	2,5298	x=y	87,287
960	1,35	2,25	3,5301	x=y	92,828
1080	1,50	2,45	3,5282	x=y	92,821
1200	1,65	2,75	3,7730	x=y	93,638
1320	1,80	2,95	4,2710	x=y	94,931
1440	2,00	3,10	4,9193	y>x	96,107
1560	2,15	3,30	4,6000	y>x	95,585

Tabela 3.6. Kontynuacja
Table 3.6. Continuation

Czas suszenia (s)	\bar{x} (g)	$\bar{y}_{2,40}$ (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_{\alpha} = t_{1-\alpha/2} = 4,3027$		
			$ t $ (-)	Wynik testu ($x=y, y>x$)	$P'(t)$ (%)
1680	2,25	3,50	5,0000	y>x	96,225
1800	2,45	3,75	6,1283	y>x	97,439
1920	2,55	4,00	8,0432	y>x	98,489
2040	2,75	4,15	6,5997	y>x	97,780
2160	2,85	4,35	7,0711	y>x	98,058
2280	3,00	4,55	8,5979	y>x	98,674
2400	3,15	4,70	8,5979	y>x	98,674
2520	3,30	4,85	8,5979	y>x	98,674
2640	3,45	5,05	7,5425	y>x	98,287
2760	3,55	5,25	8,0139	y>x	98,478
2880	3,70	5,40	7,6026	y>x	98,314
3000	3,85	5,55	8,0139	y>x	98,478
3120	3,95	5,75	8,4853	y>x	98,639
3240	4,10	5,85	7,0000	y>x	98,020
3360	4,25	6,05	8,4853	y>x	98,639
3480	4,35	6,20	10,2620	y>x	99,064
3600	4,50	6,35	7,4000	y>x	98,222
3720	4,60	6,45	7,4000	y>x	98,222
3840	4,70	6,60	8,4971	y>x	98,643
3960	4,80	6,80	8,9443	y>x	98,773
4080	5,00	6,95	7,8000	y>x	98,396
4200	5,10	7,05	7,8000	y>x	98,396
4320	5,20	7,20	8,9443	y>x	98,773
4440	5,30	7,35	8,2000	y>x	98,545
4560	5,45	7,45	6,8599	y>x	97,940
4680	5,55	7,55	6,8599	y>x	97,940
4800	5,65	7,80	6,7155	y>x	97,854
4920	5,75	7,90	6,7155	y>x	97,854
5040	5,85	8,00	6,7155	y>x	97,854
5160	6,00	8,15	5,5056	y>x	96,856

T a b e l a 3.7. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w polu elektrycznym o średnim natężeniu 400 kV m^{-1} przy stałym prądzie ulotu $400 \mu \text{ A}$ w temperaturze $40 \text{ }^\circ\text{C}$

T a b l e 3.7. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensity 400 kV m^{-1} and constant corona current value $400 \mu \text{ A}$ at temperature $40 \text{ }^\circ\text{C}$

Czas suszenia (s)	\bar{x} (g)	$\bar{y}_{4,400}$ (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_\alpha = t_{1-\alpha/2}=3,1825$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,20	0,35	1,8000	x=y	83,032
240	0,37	0,65	3,0210	y>x	94,328
360	0,50	0,95	3,3489	y>x	95,591
480	0,63	1,15	4,3128	y>x	97,704
600	0,80	1,35	4,0931	y>x	97,363
720	0,93	1,60	5,8554	y>x	99,007
840	1,07	1,80	4,7264	y>x	98,205
960	1,17	1,95	4,9090	y>x	98,381
1080	1,27	2,15	5,5357	y>x	98,838
1200	1,43	2,30	5,0349	y>x	98,490
1320	1,53	2,50	5,6158	y>x	98,884
1440	1,63	2,65	5,3161	y>x	98,700
1560	1,77	2,85	6,7890	y>x	99,347
1680	1,83	2,95	6,3403	y>x	99,207
1800	1,93	3,15	6,9081	y>x	99,378
1920	2,03	3,25	6,9081	y>x	99,378
2040	2,13	3,45	7,4759	y>x	99,504
2160	2,27	3,55	8,0424	y>x	99,599
2280	2,33	3,70	7,2859	y>x	99,466
2400	2,43	3,85	8,0437	y>x	99,599
2520	2,53	4,00	7,8190	y>x	99,564
2640	2,63	4,10	7,8190	y>x	99,564
2760	2,73	4,20	7,8190	y>x	99,564
2880	2,83	4,30	6,4409	y>x	99,241
3000	2,93	4,40	6,4409	y>x	99,241
3120	3,03	4,50	6,4409	y>x	99,241
3240	3,10	4,60	6,0678	y>x	99,102
3360	3,20	4,80	6,4723	y>x	99,252
3480	3,27	4,90	6,2398	y>x	99,170
3600	3,37	5,00	7,5910	y>x	99,526
3720	3,43	5,20	9,4183	y>x	99,746
3840	3,53	5,45	10,8827	y>x	99,834
3960	3,63	5,50	9,9515	y>x	99,784
4080	3,70	5,60	9,0125	y>x	99,712

Tabela 3.7. Kontynuacja
Table 3.7. Continuation

Czas suszenia (s)	\bar{x} (g)	\bar{y} 4,40	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomowi istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=3,1825$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
4200	3,80	5,70	9,0125	y>x	99,712
4320	3,87	5,85	12,4291	y>x	99,888
4440	3,93	6,00	12,0062	y>x	99,876
4560	4,03	6,15	12,0183	y>x	99,876
4680	4,13	6,25	12,0183	y>x	99,876
4800	4,17	6,45	14,3092	y>x	99,926
4920	4,23	6,55	13,1539	y>x	99,905
5040	4,33	6,60	13,1681	y>x	99,905
5160	4,40	6,65	11,2111	y>x	99,848

Tabela 3.8. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w polu elektrycznym o średnim natężeniu 200 kV m^{-1} przy stałych prądach ulotu 200 i $400 \mu\text{A}$ w temperaturze $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Table 3.8. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensity 200 kV m^{-1} and constant corona current values 200 and $400 \mu\text{A}$ at temperature $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Czas suszenia (s)	\bar{x} 4,200	\bar{y} 4,400	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomowi istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=4,3027$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,40	0,35	0,4472	x=y	30,151
240	0,80	0,65	1,3416	x=y	68,825
360	1,00	0,95	0,4472	x=y	30,151
480	1,25	1,15	1,4142	x=y	70,711
600	1,60	1,35	5,0000	y>x	96,225
720	1,80	1,65	3,0000	x=y	90,453
840	2,00	1,85	3,0000	x=y	90,453
960	2,10	1,95	3,0000	x=y	90,453
1080	2,30	2,15	3,0000	x=y	90,453
1200	2,50	2,35	3,0000	x=y	90,453
1320	2,65	2,50	3,0000	x=y	90,453
1440	2,75	2,65	1,4142	x=y	70,711
1560	2,95	2,85	1,4142	x=y	70,711

Tabela 3.8. Kontynuacja
Table 3.8. Continuation

Czas suszenia (s)	$\bar{x}_{4,200}$ (g)	$\bar{y}_{4,400}$ (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=4,3027$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
1680	3,05	2,95	1,4142	x=y	70,711
1800	3,25	3,15	1,4142	x=y	70,711
1920	3,35	3,25	1,4142	x=y	70,711
2040	3,50	3,45	0,4472	x=y	30,151
2160	3,65	3,55	1,4142	x=y	70,711
2280	3,75	3,70	0,4472	x=y	30,151
2400	3,90	3,85	0,4472	x=y	30,151
2520	4,00	4,00	0,0000	x=y	0,000
2640	4,10	4,10	0,0000	x=y	0,000
2760	4,20	4,20	0,0000	x=y	0,000
2880	4,35	4,30	0,2425	x=y	16,903
3000	4,50	4,40	0,4472	x=y	30,151
3120	4,60	4,50	0,4472	x=y	30,151
3240	4,70	4,60	0,4472	x=y	30,151
3360	4,85	4,80	0,2000	x=y	14,003
3480	4,95	4,90	0,2000	x=y	14,003
3600	5,05	5,00	0,2000	x=y	14,003
3720	5,15	5,20	0,2774	x=y	19,245
3840	5,25	5,45	1,2649	x=y	66,667
3960	5,35	5,50	0,8321	x=y	50,709
4080	5,50	5,60	0,4472	x=y	30,151
4200	5,55	5,70	0,8321	x=y	50,709
4320	5,65	5,85	1,2649	x=y	66,667
4440	5,70	6,00	1,5000	x=y	72,761
4560	5,85	6,15	1,8974	x=y	80,178
4680	5,90	6,25	1,6977	x=y	76,835
4800	6,00	6,45	2,1828	x=y	83,925
4920	6,10	6,55	2,1828	x=y	83,925
5040	6,20	6,60	2,0000	x=y	81,650
5160	6,30	6,65	1,6977	x=y	76,835

T a b e l a 3.9. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych przy stałym prądzie ulotu 300 μA w polu elektrycznym o średnim natężeniu 200 kV m^{-1}

T a b l e 3.9. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensity 200 kV m^{-1} and constant corona current value 300 μA

Czas suszenia (s)	\bar{x} (g)	$\bar{y}_{2,300}$ (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=4,3027$		
			$ t $ (-)	Wynik testu ($x=y, y>x$)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	$x=y$	0,000
120	0,15	0,25	1,4142	$x=y$	70,711
240	0,35	0,50	3,0000	$x=y$	90,453
360	0,45	0,75	4,2426	$x=y$	94,868
480	0,55	1,00	9,0000	$y>x$	98,788
600	0,70	1,25	11,0000	$y>x$	99,184
720	0,80	1,35	11,0000	$y>x$	99,184
840	0,95	1,55	8,4853	$y>x$	98,639
960	1,05	1,70	13,0000	$y>x$	99,413
1080	1,15	1,85	9,8995	$y>x$	98,995
1200	1,25	2,00	15,0000	$y>x$	99,558
1320	1,40	2,15	15,0000	$y>x$	99,558
1440	1,45	2,30	7,6026	$y>x$	98,314
1560	1,55	2,45	12,7279	$y>x$	99,388
1680	1,65	2,55	12,7279	$y>x$	99,388
1800	1,75	2,70	8,4971	$y>x$	98,643
1920	1,85	2,85	14,1421	$y>x$	99,504
2040	1,95	2,95	14,1421	$y>x$	99,504
2160	2,05	3,15	15,5563	$y>x$	99,589
2280	2,15	3,20	21,0000	$y>x$	99,774
2400	2,25	3,35	15,5563	$y>x$	99,589
2520	2,35	3,45	15,5563	$y>x$	99,589
2640	2,40	3,55	23,0000	$y>x$	99,811
2760	2,50	3,70	-	$y>x$	100,000
2880	2,55	3,75	16,9706	$y>x$	99,655
3000	2,65	3,90	11,1803	$y>x$	99,209
3120	2,70	3,95	25,0000	$y>x$	99,840
3240	2,80	4,10	13,0000	$y>x$	99,413
3360	2,85	4,15	18,3848	$y>x$	99,705
3480	3,00	4,25	25,0000	$y>x$	99,840
3600	3,00	4,35	27,0000	$y>x$	99,863
3720	3,15	4,50	12,0748	$y>x$	99,321
3840	3,20	4,60	14,0000	$y>x$	99,494
3960	3,30	4,70	14,0000	$y>x$	99,494
4080	3,35	4,70	12,0748	$y>x$	99,321

Tabela 3.9. Kontynuacja
Table 3.9. Continuation

Czas suszenia (s)	\bar{x} (g)	\bar{y} 2,300	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=4,3207$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
4200	3,45	4,80	12,0748	y>x	99,321
4320	3,50	4,95	9,6667	y>x	98,947
4440	3,55	5,05	9,4868	y>x	98,907
4560	3,65	5,15	9,4868	y>x	98,907
4680	3,75	5,20	12,9692	y>x	99,411
4800	3,80	5,25	8,0432	y>x	98,489
4920	3,85	5,35	9,4868	y>x	98,907
5040	3,95	5,45	9,4868	y>x	98,907
5160	4,05	5,50	12,9692	y>x	99,411

Tabela 3.10. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych przy stałym prądzie ulotu 300 μA w polach o natężeniach 200 i 400 kV m^{-1} w temperaturze 30 $^{\circ}\text{C}$

Table 3.10. Student's difference method results from comparison samples dried in electric field at mean intensities 200 and 400 kV m^{-1} and constant corona current value 300 μA at temperature 30 $^{\circ}\text{C}$

Czas suszenia (s)	\bar{x} 2,300	\bar{y} 4,300	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t'_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=4,3207$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,25	0,35	1,4142	x=y	70,711
240	0,50	0,65	3,0000	x=y	90,453
360	0,75	0,90	3,0000	x=y	90,453
480	1,00	1,20	4,0000	x=y	94,281
600	1,25	1,30	1,0000	x=y	57,735
720	1,35	1,50	3,0000	x=y	90,453
840	1,55	1,70	3,0000	x=y	90,453
960	1,70	1,85	3,0000	x=y	90,453
1080	1,85	2,05	2,8284	x=y	89,443
1200	2,00	2,20	2,0000	x=y	81,650
1320	2,15	2,35	2,8284	x=y	89,443
1440	2,30	2,50	1,4142	x=y	70,711
1560	2,45	2,60	1,3416	x=y	68,825

Tabela 3.10. Kontynuacja
Table 3.10. Continuation

Czas suszenia (s)	$\bar{x}_{2,300}$ (g)	$\bar{y}_{4,300}$ (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=4,3027$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
1680	2,55	2,80	2,2361	x=y	84,515
1800	2,70	2,90	1,4142	x=y	70,711
1920	2,85	3,05	1,2649	x=y	66,667
2040	2,95	3,20	2,2361	x=y	84,515
2160	3,15	3,35	1,2649	x=y	66,667
2280	3,20	3,45	1,6667	x=y	76,249
2400	3,35	3,55	1,2649	x=y	66,667
2520	3,45	3,65	1,2649	x=y	66,667
2640	3,55	3,80	1,2127	x=y	65,094
2760	3,70	3,95	1,6667	x=y	76,249
2880	3,75	4,05	1,8974	x=y	80,178
3000	3,90	4,15	1,3868	x=y	70,014
3120	3,95	4,25	1,8974	x=y	80,178
3240	4,10	4,40	1,3416	x=y	68,825
3360	4,15	4,50	1,6977	x=y	76,835
3480	4,25	4,60	1,6977	x=y	76,835
3600	4,35	4,70	1,6977	x=y	76,835
3720	4,50	4,80	1,3416	x=y	68,825
3840	4,60	4,90	1,3416	x=y	68,825
3960	4,70	5,00	1,3416	x=y	68,825
4080	4,70	5,10	1,7889	x=y	78,446
4200	4,80	5,20	1,7889	x=y	78,446
4320	4,95	5,25	1,0290	x=y	58,835
4440	5,05	5,40	1,4000	x=y	70,353
4560	5,15	5,50	1,4000	x=y	70,353
4680	5,20	5,55	1,2999	x=y	67,672
4800	5,25	5,60	1,4000	x=y	70,353
4920	5,35	5,70	1,4000	x=y	70,353
5040	5,45	5,80	1,4000	x=y	70,353
5160	5,50	5,90	1,7889	x=y	78,446

Tabela 3.11. Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w temperaturze $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ powietrzem w obecności pola elektrycznego o średnim natężeniu 200 kV m^{-1} oraz suszonych powietrzem domieszkowanym ozonem przy dodatkowym występowaniu pola elektrycznego o średnim natężeniu 200 kV m^{-1}

Table 3.11. Student's difference method results from comparison samples dried at temperature $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ in electric field at mean intensity 200 kV m^{-1} using air and dried in electric field at mean intensity 200 kV m^{-1} using ozone-air mixture

Czas suszenia (s)	\bar{x} 2,20 (g)	\bar{y} 0,2,20 (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomowi istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=2,7765$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	y=x	0,000
120	0,10	0,10	0,0000	y=x	0,000
240	0,20	0,20	0,0000	y=x	0,000
360	0,27	0,27	0,0000	y=x	0,000
480	0,37	0,37	0,0000	y=x	0,000
600	0,43	0,43	0,0000	y=x	0,000
720	0,57	0,53	0,7071	y=x	48,148
840	0,60	0,60	0,0000	y=x	0,000
960	0,70	0,70	0,0000	y=x	0,000
1080	0,73	0,80	0,7559	y=x	50,823
1200	0,83	0,80	0,3780	y=x	27,534
1320	0,90	0,90	0,0000	y=x	0,000
1440	1,00	0,97	0,3162	y=x	23,236
1560	1,07	1,07	0,0000	y=x	0,000
1680	1,13	1,10	0,3780	y=x	27,534
1800	1,17	1,17	0,0000	y=x	0,000
1920	1,27	1,27	0,0000	y=x	0,000
2040	1,33	1,27	0,7071	y=x	48,148
2160	1,40	1,37	0,3162	y=x	23,236
2280	1,50	1,47	0,3162	y=x	23,236
2400	1,50	1,53	0,2500	y=x	18,510
2520	1,60	1,57	0,3162	y=x	23,236
2640	1,63	1,67	0,3015	y=x	22,195
2760	1,73	1,70	0,2774	y=x	20,474
2880	1,73	1,73	0,0000	y=x	0,000
3000	1,83	1,83	0,0000	y=x	0,000
3120	1,83	1,90	0,5000	y=x	35,667
3240	1,93	1,97	0,2085	y=x	15,499
3360	1,97	2,03	0,4472	y=x	32,213
3480	2,03	2,07	0,2085	y=x	15,499
3600	2,13	2,10	0,1890	y=x	14,069

Tabela 3.11. Kontynuacja
Table 3.11. Continuation

Czas suszenia (s)	\bar{x} 2,20 (g)	\bar{y} 0,2,20 (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha}/2=2,7765$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
3720	2,17	2,17	0,0000	y=x	0,000
3840	2,23	2,27	0,2085	y=x	15,499
3960	2,23	2,30	0,3780	y=x	27,534
4080	2,33	2,37	0,2085	y=x	15,499
4200	2,33	2,43	0,5303	y=x	37,604
4320	2,40	2,43	0,1890	y=x	14,069
4440	2,47	2,50	0,1890	y=x	14,069
4560	2,53	2,57	0,2085	y=x	15,499
4680	2,57	2,60	0,1715	y=x	12,784
4800	2,63	2,67	0,2085	y=x	15,499
4920	2,67	2,73	0,3244	y=x	23,814
5040	2,77	2,77	0,0000	y=x	0,000
5160	2,77	2,83	0,3244	y=x	23,814

Tabela 3.12. Wyniki Wyniki testu różnic Studenta porównania próbek suszonych w temperaturze 40 °C powietrzem w obecności pola elektrycznego o średnim natężeniu 400 kV m⁻¹ oraz suszonych powietrzem domieszkowanym ozonem przy dodatkowym występowaniu pola elektrycznego o średnim natężeniu 400 kV m⁻¹

Table 3.12. Student's difference method results from comparison samples dried at temperature 40 °C in electric field at mean intensity 400 kV m⁻¹ using air and dried in electric field at mean intensity 400 kV m⁻¹ using ozone-air mixture

Czas suszenia (s)	\bar{x} 4,40 (g)	\bar{y} 0,4,40 (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha}/2=2,3646$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
0	0,00	0,00	-	x=y	0,000
120	0,64	0,68	0,3091	x=y	23,373
240	1,06	1,05	0,0837	x=y	6,437
360	1,54	1,50	0,2824	x=y	21,422
480	1,88	1,93	0,2381	x=y	18,140
600	2,24	2,30	0,2887	x=y	21,881

Tabela 3.12. Kontynuacja
Table 3.12. Continuation

Czas suszenia (s)	$\bar{x}_{4,40}$ (g)	$\bar{y}_{0,4,40}$ (g)	Wartość kwantyla rozkładu Studenta dla liczby swobody odpowiadającej liczbie przeprowadzonych pomiarów i poziomu istotności $\alpha=0,05$; $t_{\alpha} = t_{1-\alpha/2}=2,3646$		
			$ t $ (-)	Wynik testu (x=y, y>x)	$P'(t)$ (%)
720	2,58	2,68	0,4776	x=y	35,250
840	2,86	3,00	0,6838	x=y	48,393
960	3,14	3,25	0,5178	x=y	37,945
1080	3,44	3,50	0,2931	x=y	22,203
1200	3,72	3,75	0,1341	x=y	10,294
1320	3,96	4,00	0,1796	x=y	13,741
1440	4,20	4,30	0,4585	x=y	33,950
1560	4,44	4,58	0,5553	x=y	40,400
1680	4,64	4,85	0,8921	x=y	59,803
1800	4,88	5,05	0,7238	x=y	50,737
1920	5,10	5,30	0,8711	x=y	58,742
2040	5,30	5,53	0,9420	x=y	62,243
2160	5,52	5,80	1,0999	x=y	69,226
2280	5,72	6,00	1,0999	x=y	69,226
2400	5,90	6,20	1,2076	x=y	73,359
2520	6,08	6,40	1,2697	x=y	75,524
2640	6,26	6,55	1,0433	x=y	66,848
2760	6,44	6,73	1,0096	x=y	65,371
2880	6,60	6,93	1,0882	x=y	68,745
3000	6,74	7,08	1,1012	x=y	69,279
3120	6,92	7,23	1,0040	x=y	65,119
3240	7,08	7,40	1,0015	x=y	65,008
3360	7,20	7,55	1,0619	x=y	67,645
3480	7,38	7,68	0,9043	x=y	60,410
3600	7,52	7,83	0,8928	x=y	59,838
3720	7,66	7,95	0,8382	x=y	57,040
3840	7,78	8,10	1,0015	x=y	65,008
3960	7,92	8,25	0,9398	x=y	62,139
4080	8,02	8,38	0,9814	x=y	64,090
4200	8,16	8,48	0,8454	x=y	57,418
4320	8,30	8,60	0,8629	x=y	58,325
4440	8,42	8,70	0,7643	x=y	53,031
4560	8,52	8,85	0,9117	x=y	60,776
4800	8,76	9,05	0,7779	x=y	53,788
4920	8,86	9,15	0,7779	x=y	53,788
5040	8,94	9,28	0,8391	x=y	57,086
5160	9,02	9,35	0,8106	x=y	55,573

Prowadząc analizę wyników testu można stwierdzić, że:

-
- Tabele 3.3÷3.5 Masa wody odparowanej przy suszeniu konwekcyjnym z udziałem pola elektrycznego o stałej średniej wartości natężenia oraz zmiennym w czasie prądzie ulotu, zależy od natężenia pola elektrycznego i wzrasta wraz z nim. Dla pola o natężeniu 200 kV m^{-1} nie można jeszcze mówić o tym wzroście, ponieważ występuje on poniżej wybranego poziomu istotności (prawdopodobieństwo innego przebiegu procesu, w którym występuje pole jest mniejsze niż 95 % - przykładowa Tabela 3.3). W przypadku pól o natężeniu 300 i 400 kV m^{-1} poziom pewności co do poprawności wyciągniętych hipotez jest bardzo wysoki (w większości przypadków równy 100 % - Tabele 3.4 i 3.5).
-
- Tabele 3.6÷3.8 Przy suszeniu konwekcyjnym w obecności pola elektrycznego o stałej wartości natężenia pola elektrycznego i stałym natężeniu prądu ulotu okazuje się, że wiatr jonowy (prądem ulotu), jest faktycznym czynnikiem zmieniającym przebieg suszenia (Tabele 3.6 i 3.7). Występuje wówczas również wyraźny wpływ pola o natężeniu 200 kV m^{-1} . Jego wpływ zarysowuje się zwłaszcza w końcowej części procesu i rośnie wraz ze stosowaną temperaturą (Tabele 3.6). Potwierdzone zostają także spostrzeżenia, że utrzymywanie prądu ulotu na jednakowym poziomie przyspiesza usuwanie wody, w stosunku do procesu, w którym prąd ulotu maleje w trakcie suszenia. Porównanie przebiegów procesów z jednym natężeniem pola elektrycznego, o różnych prądach ulotu sygnalizuje, że istotnym czynnikiem jest osiągnięcie granicznej wartości natężenia prądu ulotu (Tabela 3.8).
-
- Tabele 3.9÷3.10 Tabela zawiera prezentację jednej serii suszenia przy stałej wartości natężenia prądu ulotu i różnych natężeniach pola elektrycznego. Wyniki wykazują, że czynnikiem intensyfikującym wymianę masy jest prąd ulotu. Przyspieszenie suszenia w obecności pola o natężeniu 200 kV m^{-1} , zasygnalizowane w Tabeli 3.6, zostaje potwierdzone przy większej wartości prądu ulotu.

Na podstawie danych z Tabeli 3.10 można wnioskować o braku statystycznie znaczącego wpływu wartości natężenia pola elektrycznego, o ile pole nie jest źródłem prądu ulotu. Prąd ulotu o natężeniu równym $300 \mu\text{A}$ zaciera różnice w szybkości usuwania wody wynikające z natężenia pola.

Tabele 3.11÷3.12 Potwierdzono brak wpływu domieszkowania ozonem w temperaturach $\sim 20^\circ\text{C}$, 30°C , 35°C i 40°C na zwiększenie przyspieszenia usuwania wody.

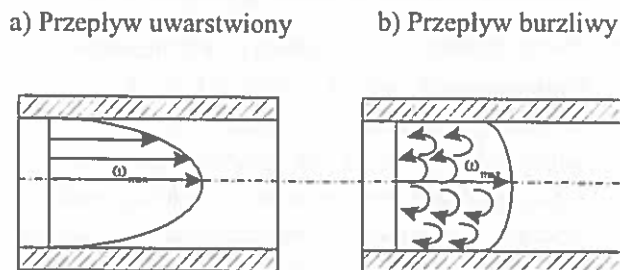
Tabele 3.11 i 3.12 są porównaniem przebiegu suszenia konwekcyjnego w obecności pola elektrycznego z przebiegiem suszenia powietrzem domieszkowanym ozonem. Zarówno w przypadku najmniejszego ze stosowanych natężeń pola przy najniższej temperaturze suszenia (Tabela 3.12, $E = 200 \text{ kV m}^{-1}$, $t \approx 20^\circ\text{C}$), jak i w przypadku największej wartości natężenia pola i temperatury (Tabela 3.12, $E = 400 \text{ kV m}^{-1}$, $t = 40^\circ\text{C}$) wynik testu nie wykazał statystycznie znaczących różnic pomiędzy porównywanymi przebiegami.

3.7. Mechanizm oddziaływania pola elektrycznego z wiatrem jonowym na proces suszenia konwekcyjnego

Proces suszenia konwekcyjnego polega na usuwaniu wody zawartej w ciele przez parowanie. Proces ten wymaga doprowadzenia energii cieplnej wymaganej do zamiany wody w parę. Ciepło doprowadzane jest za pomocą podgrzanego gazu, którym zazwyczaj jest powietrze lub jego mieszanina z gazami spalinowymi [54]. Mechanizm doprowadzania ciepła opiera się na tym, że cząstki czynnika suszącego, o wyższej temperaturze niż powierzchnia suszonego materiału, uderzając o powierzchnię materiału przekazują mu część własnej energii cieplnej, a tym samym obniżają własną temperaturę. Na tej podstawie można stwierdzić, że jednym z decydujących czynników mających wpływ na wymianę ciepła, a w konsekwencji na wymianę masy, jest sposób przepływu czynnika suszącego nad suszonym dielektrykiem.

Wielkością charakteryzującą w hydrodynamice sposób przepływu płynów jest bezwymiarowa liczba Reynoldsa. Na jej podstawie można rozgraniczyć dwa podstawowe sposoby przepływu gazu lub cieczy. Pierwszy typ przepływu, w którym drogi poszczególnych cząstek gazu pozostają równoległe nazywany jest

uwarstwionym lub laminarnym. Przepływ, w którym cząstki poruszają się w sposób nieuporządkowany nosi nazwę burzliwego lub turbulentnego. W obu przypadkach występuje różny rozkład prędkości płynu. Poglądowe porównanie rozkładu prędkości w obu typach przepływów zamieszczono na Rys. 3.22.



Rys. 3.22. Schematyczne porównanie prędkości w strudze przy przepływie laminarnym i turbulentnym [23].

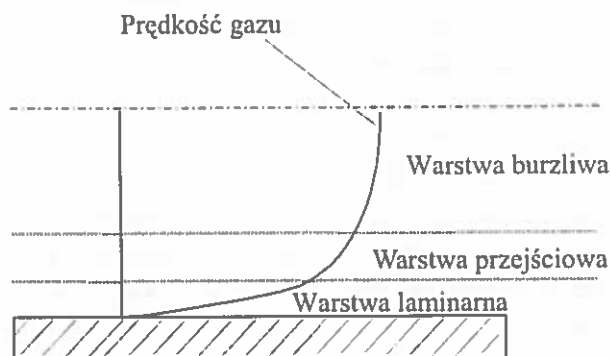
Fig. 3.22. Schematic comparison of stream speed at laminar and turbulent flow [23].

Oba typy przepływów nie są dość ostro rozgraniczone, ale występujący typ przepływu można określić na podstawie wartości liczby Reynoldsa. Dokładny sposób obliczania tej liczby, wymagany do określenia sposobu przepływu w badanym eksperymentalnie przypadku, zamieszczono w rozdziale 4. Liczba Reynoldsa charakteryzująca rodzaj przepływu zależy od strumienia przepływającego płynu (prędkości masowej), jego współczynnika lepkości i wymiaru liniowego charakteryzującego konfigurację układu, przez który przepływa ciecz lub gaz. Ponieważ pomiędzy wymienionymi typami przepływów nie przebiega jednoznaczne rozgraniczenie liczbowe, to za wartość stanowiącą granicę przyjmuje się przedział wartości liczby Reynoldsa od 2100 do 3000. Poniżej $Re=2100$ przepływ może być uznany za laminarny, powyżej tej wartości przepływ uznawany jest za turbulentny.

Bardziej szczegółowa analiza strumienia, w oparciu o rozkład temperatur, pozwala wyróżnić w strudze trzy warstwy: laminarną, przejściową i burzliwą (Rys. 3.23).

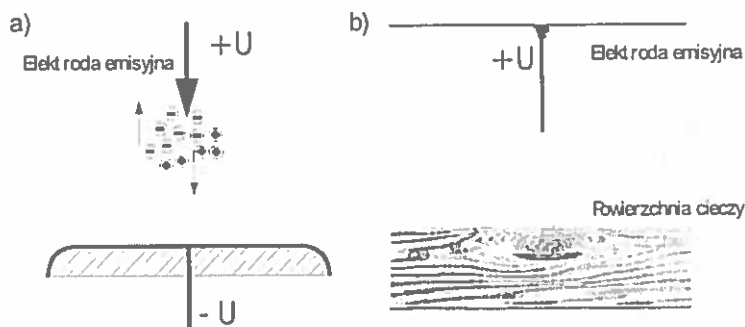
Wprowadzenie do suszarki konwekcyjnej układu generującego pole elektryczne z wiatrem jonowym wpływa właśnie na sposób uwarstwienia przepływu czynnika suszącego. Jeżeli suszony dielektryk będzie umieszczony na ujemnej elektrodzie, zaś do elektrody ostrzowej zostanie doprowadzone napięcie większe niż napięcie U_0 (U_0 - napięcie krytyczne, powyżej którego występuje jonizacja gazu i wyładowania niezupełne), to lokalny wzrost natężenia pola wokół elektrody ostrzowej powoduje

zjonizowanie gazu, które może prowadzić do wyładowania zupełnego. Jeżeli wyładowanie utrzymuje się w fazie wyładowania niezupełnego, to w przestrzeni międzyelektrodowej powstaje chmura jonów dodatnich, przyciąganych do uziemionej elektrody. W przypadku przyłożenia napięcia do elektrody ostrzowej umieszczonej nad lustrem wody można zaobserwować taki efekt, jak zaprezentowano na Rys. 3.24b [16].



Rys. 3.23. Schemat rozgraniczenia charakterystycznych warstw [23].

Fig. 3.23. Distribution of characteristic layers [23].



Rys. 3.24. a) Ładunek przestrzenny w przestrzeni między elektrodowej; b) fotografia zjawiska wiatru jonowego przy odległości pomiędzy ostrzem a lustrem wody równej 0,0074 m i napięciu równym 10 kV [77].

Fig. 3.24. a) Volumetric charge between electrodes; b) photograph of phenomena of ionic wind at distance of 0,0074 m between blade electrode and water surface, electric field intensity 10 kV [77].

Przyjmując, że wygenerowane jony i elektrony uzyskują w polu elektrycznym energię Q_e , to wykonaną przez pojedynczą cząstkę pracę można opisać zależnością [19]:

$$Q_e = \frac{m_e v_e^2}{2} = q_e U, \quad (3.12)$$

gdzie: m_e - masa ładunku, g; v_e - prędkość jaką uzyskał ładunek w polu o natężeniu E wywołanym przyłożeniem napięcia U , m s⁻¹; q_e - ładunek cząstki, C.

Energia uzyskana przez jony i elektrony może zostać wymieniona podczas zderzeń z obojętnymi cząstkami gazu lub może wymienić własną energię kinetyczną na energię cieplną wsadu. Ostatnie wymienione zjawisko ma miejsce w przypadku metod nagrzewania elektronowego i jonowego.

Badana w pracy metoda intensyfikacji wymiany masy nie jest bezpośrednim przekształceniem ani metody elektronowej, ani jonowej. W przypadku metody elektronowej przekazywania energii cieplnej wymagane jest, aby elektrodą emisyjną była katoda, napięcia przyspieszające osiągają wartości rzędu MV przy gęstości mocy dochodzącej do 10¹² W cm⁻². W układzie eksperymentalnym nawet nie zbliżono się do tych wartości.

W przypadku metody jonowej (jarzeniowej) nagrzewania, wykorzystywany jest podobny mechanizm przekazywania energii, ale korzysta się z innego zakresu wyładowania. Wykorzystywane w przypadku metody jonowej gęstości prądu rzędu 10²÷10³ A cm⁻² należą do wyładowań jarzeniowych anormalnych. W badanym przypadku gęstość prądu dochodziła maksymalnie do 14 · 10⁻⁵ A cm⁻², co kwalifikuje wyładowanie do grupy wyładowań koronowych.

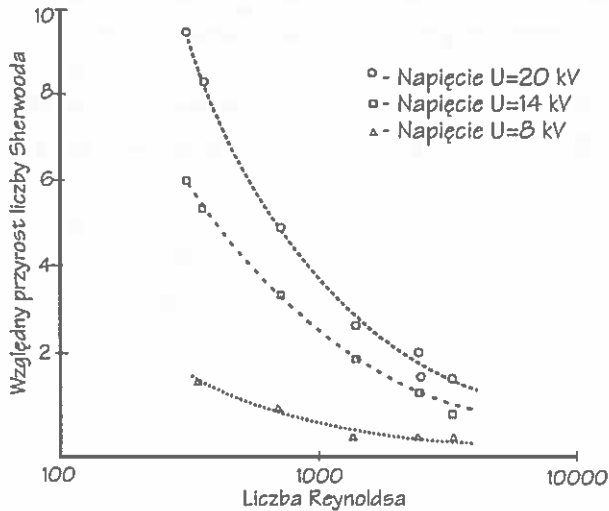
Nie można też rozpatrywać wiatru jonowego jako źródła energii wytwarzanej w przestrzeni międzyelektrodowej i przekazywanej dalej drogą konwekcji do suszonego dielektryka. Ilość energii wytworzonej na tej drodze stanowiła jedynie ułamek energii wprowadzanej przez nagrany strumień powietrza. Przykładowo jeżeli prowadzone było nagrzewanie czynnika suszącego do temperatury 313 K, to moc wprowadzana za pomocą grzałki termowentylatora wynosiła około 454 W. Przy założeniu pełnego przekształcania energii wyładowania w ciepło, przy natężeniu pola 300 kV m⁻¹ i prądzie ulotu 120 μA występowała moc około 1,08 W. Porównanie mocy wskazuje, że energia cieplna wyładowania może stanowić tylko znikomą część energii strumienia czynnika suszącego. Porównanie oszczędności energetycznych wskazuje natomiast na możliwość uzyskania nawet kilkunastoprocentowego obniżenia zapotrzebowania na energię.

Wykluczając znaczącą rolę przekazywania energii w procesie zderzania jonów z suszonym wsadem, należy wnioskować, że zmianę przebiegu suszenia uzyskuje się na drodze wymiany energii z cząstkami suszącego powietrza. Wprowadzenie do suszącej strugi powietrza strumienia jonów powoduje zakłócenie warstwy laminarnej (Rys. 3.23). Przez to przepływ staje się bardziej burzliwy. Większa burzliwość wspomaga wymianę ciepła, a co za tym idzie wymianę masy.

Opisany mechanizm uzasadnia, dlaczego nie występował wpływ wiatru jonowego przy strumieniu powietrza o szybkości $1,4 \text{ m s}^{-1}$. Przy występującej turbulencji, dalsze zakłócenia strumienia nie miały już znaczenia. Zanik oddziaływania pola elektrycznego z wiatrem jonowym przy zwiększonej turbulencji potwierdzają otrzymane wyniki w postaci względnych zmian liczb Nusselta i Sherwooda w funkcji liczby Reynoldsa (Rys. 4.3). Wraz z rozwojem przepływu burzliwego zmniejsza się oddziaływanie pola na wymianę ciepła (charakteryzowaną przez liczbę Nusselta) i na wymianę masy (charakteryzowaną przez liczbę Sherwooda). Podobne wyniki otrzymano przy badaniu zjawiska w przypadku bezpośredniego odparowywania wody [76].

4. LICZBY KRYTERIALNE PROCESU SUSZENIA

Autorzy analizujący wymianę ciepła, jak i wpływ pola elektrycznego na wymianę ciepła i masy, posługują się do scharakteryzowania przebiegu procesów liczbami kryterialnymi [23,65,75,76]. Często spotyka się opis w postaci względnych zmian wartości liczb Nusselta i Sherwooda w funkcji liczby Reynoldsa (Rys. 4.1).



Rys. 4.1. Zależność względnego przyrostu liczby Sherwooda od liczby Reynoldsa dla różnych napięć przy odparowaniu wody z powierzchni płaskiej [76].

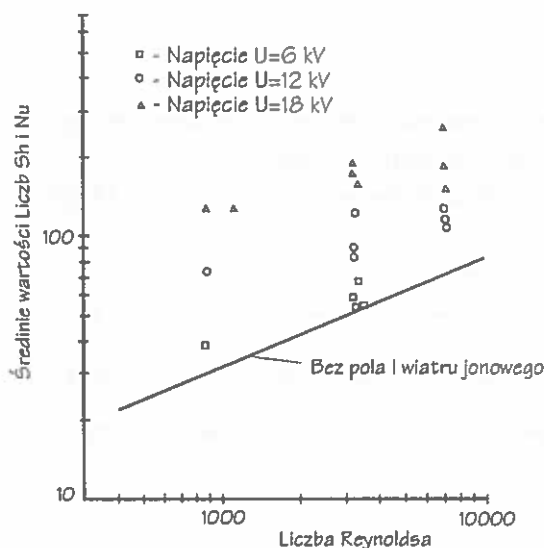
Fig. 4.1. Relative increase of Sherwood number to Reynolds number for different voltage during water vaporization from flat surface [76].

Liczba Reynoldsa (Re) jest jedną z najważniejszych liczb kryterialnych w badaniach przepływów. Charakteryzuje ona stosunek sił bezwładności od sił lepkości. Na jej podstawie można prowadzić rozgraniczenie pomiędzy poszczególnymi rodzajami przepływów cieczy lub gazów. Opierając się na wartości liczby Reynoldsa można określić, czy mamy do czynienia z przepływem laminarnym, czy turbulentnym. Wartość liczby Re określa zależność [23]:

$$Re = \frac{gd}{\eta} = \frac{\omega \rho d}{\eta}, \quad (4.1)$$

gdzie: g - prędkość masowa, $\text{kg (m}^2 \text{ s)}^{-1}$; η - dynamiczny współczynnik lepkości, $(\text{Pa s}) = \text{kg (m s)}^{-1}$; ω - prędkość liniowa, m s^{-1} ; d - charakterystyczny wymiar liniowy, m ; ρ - gęstość, kg m^{-3} .

Powszechnie stosowany jest opis szybkości wymiany ciepła i masy w postaci zależności liczb Nusselta (ciepła) i Sherwooda (masy) w funkcji liczby Reynoldsa (Rys. 4.2).



Rys. 4.2. Zależność średnich wartości liczb Sherwooda i Nusselta od liczby Reynoldsa dla różnych napięć przy odparowaniu wody z powierzchni płaskiej [65].

Fig. 4.2. Mean values of Sherwood and Nusselt numbers versus Reynolds number for different voltage during water vaporization from flat surface [65].

W badanym eksperymentalnie przypadku poszczególne składowe liczby Reynoldsa można wyznaczyć następująco:

1. Prędkość liniowa ω , w przypadkach, w których zarejestrowano zmianę przebiegu usuwania wody, miała wartość $0,3 \text{ m s}^{-1}$.
2. Dynamiczny współczynnik lepkości η dla gazów zmienia się wraz z temperaturą i można go obliczyć na podstawie zależności Sutherlanda [23]:

$$\eta = \eta_0 \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{2/3}, \quad (4.2)$$

gdzie: η_0 - dynamiczny współczynnik lepkości w temperaturze 0°C , $\eta_0 = 17,168 \cdot 10^{-6} \text{ kg (m} \cdot \text{s)}^{-1}$; T - temperatura bezwzględna, dla której szukany jest współczynnik lepkości, K; C - stała Sutherlanda [23], dla powietrza $C = 114$.

3. Gęstość powietrza określona została na podstawie danych tabelarycznych [23].
4. Charakterystyczny wymiar liniowy przyjmuje wartość średnicy (np. dla rur, prętów, kul). W przypadku kanałów innych niż kołowe przyjmuje się średnicę równoważną [75].

$$d_r = \frac{4A}{P_k} \quad (4.3)$$

gdzie: d_r - średnica równoważna, m; A - pole przekroju przepływowego, m^2 ; P_k - długość obwodu kanału zwilżanego przez płyn, m.

W naszym przypadku średnica równoważna dla kondensatora pomiarowego wynosi $d_r = 5,05 \cdot 10^{-2}$ m.

Na podstawie przyjętych wartości i zależności (4.1) otrzymano następujące wartości liczby Reynoldsa dla poszczególnych stosowanych temperatur suszenia.

T a b e l a 4.1. Otrzymane eksperymentalnie wartości liczby Reynoldsa dla stosowanych temperatur suszenia

T a b l e 4.1. Experimental values of Reynolds number for practically used drying temperatures

Temperatura bezwzględna T (K)	Dynamiczny wsp. lepkości ($kg\ m\ s^{-1}$)	Średnica równoważna d_r (m)	Prędkość liniowa ($m\ s^{-1}$)	Gęstość ($kg\ m^{-3}$)	Liczba Reynoldsa Re (-)
303	$1,86 \cdot 10^{-5}$	0,0505	0,3	1,127	916,48
308	$1,89 \cdot 10^{-5}$			1,110	890,92
313	$1,91 \cdot 10^{-5}$			1,092	866,08
323	$1,96 \cdot 10^{-5}$			1,056	817,65

Otrzymane wartości liczby Reynoldsa wskazują, że eksperyment prowadzony był w zakresie przepływu laminarnego, ponieważ osiągnięto wartości mniejsze niż 2100 tj. poniżej wartości granicznej dla przepływu turbulentnego.

Kolejną z liczb kryterialnych opisujących wymianę ciepła jest liczba Nusselta (Nu). Określa ona stosunek wnikania ciepła do szybkości przewodzenia ciepła. Na jej podstawie określa się podobieństwo termokinetyczne układów [23]. Wartość liczby Nusselta można obliczyć z zależności:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (4.4)$$

gdzie: α - współczynnik wnikania ciepła, $J\ (m^2\ s\ K)^{-1} = W\ (m^2\ K)^{-1}$; d - charakterystyczny wymiar liniowy, m; λ - współczynnik przewodzenia ciepła, $J\ (m^1\ s\ K)^{-1} = W\ (m^1\ K)^{-1}$.

Ponieważ rozpatrywany jest ten sam układ, wartość charakterystycznego wymiaru liniowego d można przyjąć taką jak przy obliczaniu liczby Reynoldsa. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ dla powietrza można określać na podstawie zależności Sutherlanda, tak jak lepkość dynamiczną lub od razu przyjmując dane podawane w postaci tabelaryzowanej. Wartość współczynnika wnikania ciepła powinna zostać określona w oparciu o masę odparowanej wody. Obliczany na podstawie danych eksperymentalnych współczynnik wnikania ciepła α oparty jest na założeniach upraszczających, że temperatura pomiędzy suszonym dielektrykiem a suszącym powietrzem pozostaje stała i dielektryk pokrywający dolną okładkę kondensatora ma pole powierzchni równe polu powierzchni tej okładki.

$$\alpha = \frac{Q}{A_s \Delta T} = \frac{\Delta m r}{A_s \Delta T}, \quad (4.5)$$

gdzie: Q - ciepło przejęte przez suszony dielektryk, J; A_s - pole powierzchni suszonego materiału, m^2 ; ΔT - różnica temperatur pomiędzy suszonym materiałem a suszącym powietrzem, K; Δm - masa wody usunięta w czasie $\Delta \tau$, g; τ - czas, s.

Na podstawie przyjętych wartości oraz zależności (4.4) i (4.5) otrzymano wartości liczby Nusselta dla poszczególnych stosowanych temperatur suszenia (Tabela 4.2). Liczba Nusselta może zostać przedstawiona w postaci jej zmiany względnej. Ułatwia to porównania z danymi uzyskanymi przez innych badaczy.

T a b e l a 4.2. Otrzymane eksperymentalnie wartości liczby Nusselta dla stosowanych temperatur suszenia

T a b l e 4.2. Experimental values of Nusselt number for practically used drying temperatures

Temp. powietrza suszącego o (K)	Wsp. przewo- dzenia ciepła powietrza λ (W (m K) ⁻¹)	Liczba Nusselta Nu				Względna zmiana liczby Nusselta wywołana obecnością poła elektrycznego		
		$Nu_{0 \text{ kV m}^{-1}}$	$Nu_{200 \text{ kV m}^{-1}}$	$Nu_{300 \text{ kV m}^{-1}}$	$Nu_{400 \text{ kV m}^{-1}}$	$Nu_{200 \text{ kV m}^{-1}} / Nu_{0 \text{ kV m}^{-1}}$	$Nu_{300 \text{ kV m}^{-1}} / Nu_{0 \text{ kV m}^{-1}}$	$Nu_{400 \text{ kV m}^{-1}} / Nu_{0 \text{ kV m}^{-1}}$
		303	0,02575	25,8	29,7	28,4	43,9	1,15
313	0,02645	17,0	15,7	20,1	18,2	0,93	1,19	1,07
323	0,02714	10,6	10,2	13,1	24,5	0,96	1,23	2,31

Do obliczeń przyjęto:

- temperaturę suszonego dielektryka 293 K,
- charakterystyczny wymiar liniowy $d_r = 0,0505$ m,
- odcinek czasu dla którego obliczana jest liczba Nusselta $\tau = 120$ s,
- pole powierzchni suszonego materiału $A_s = 0,0286$ m²,
- ciepło parowania wody 2257,9 J g⁻¹.

Porównanie wartości względnych zmian liczb Nusselta wywołanych obecnością pola elektrycznego sygnalizuje, że wraz ze wzrostem natężenia pola elektrycznego oraz temperatury rośnie szybkość wymiany ciepła. W temperaturze 323 K przy natężeniu pola elektrycznego 400 kV m⁻¹ może wzrosnąć więcej niż dwukrotnie.

Odpowiednikiem liczby Nusselta, opisującej wymianę ciepła jest dla wymiany masy liczba Sherwooda (Sh). Opisuje ona analogię oddawania masy pomiędzy materiałem suszonym a czynnikiem suszącym. Wartość liczby Sherwooda można obliczyć z zależności:

$$Sh = \frac{\beta_A d}{\delta_{Ai}}, \quad (4.6)$$

gdzie: β_A - współczynnik wnikania masy, g (m² s)⁻¹; d - charakterystyczny wymiar liniowy, m; δ_{Ai} - dynamiczny współczynnik dyfuzji składnika A przez gaz obojętny, g (m s)⁻¹.

Współczynnik wnikania masy β_A opisany jest zależnością:

$$\beta_A = \frac{G_A}{A_s \Delta\pi_A}, \quad (4.7)$$

gdzie: G_A - strumień masy, g s⁻¹; A_s - pole powierzchni suszonego materiału, m²; $\Delta\pi_A$ - bezwymiarowy moduł napędowy.

Wielkość modułu napędowego $\Delta\pi_A$ oblicza się z zależności:

$$\Delta\pi_A = \frac{P_{A(gazu)} - P_{A(pow)}}{P_{im}}, \quad (4.8)$$

gdzie: $p_{A(gazu)}$ - ciśnienie cząstkowe pary wodnej w gazie suszącym, Pa; $p_{A(pow)}$ - ciśnienie cząstkowe pary wodnej na suszonej powierzchni, Pa; p_{im} - średnie ciśnienie cząstkowe gazu niedyfundującego (w tym przypadku powietrza suchego), Pa.

Do dalszych obliczeń zostały wykorzystane stabilizowane wartości ciśnienia pary wodnej nasyconej w temperaturze 303, 313 i 323 K (4,24; 7,37 i 12,33 kPa). Założono, że wilgotność powietrza suszącego maleje ze wzrostem temperatury przy początkowej wilgotności względnej równej 50 % w temperaturze 30 °C, zaś ciśnienie cząstkowe pary wodnej na powierzchni suszonego materiału jest równe wartości

ciśnienia cząstkowego pary nasyconej. Jako średnie ciśnienie atmosferyczne przyjęto wartość 990 hPa. Wartości dynamicznego współczynnika dyfuzji składnika przez gaz obojętny δ_{Ai} zostały zaczerpnięte z tabel [23]. Bazując na wymienionych danych otrzymano następujące wyniki.

Tabela 4.3. Otrzymane eksperymentalnie wartości liczby Sherwooda dla stosowanych temperatur suszenia

T a b l e 4.3. Experimental values of Sherwood number for practically used drying temperatures

Temp. powietrza (K)	Dynamiczny wsp. dyfuzji przez gaz obojętny δ_{Ai} g (m s) ⁻¹	Liczba Sherwooda				Względna zmiana liczby Sherwooda wywołana obecnością pola elektrycznego		
		Sh _{0 kV m⁻¹}	Sh _{200 kV m⁻¹}	Sh _{300 kV m⁻¹}	Sh _{400 kV m⁻¹}	Sh _{200 kV m⁻¹} / Sh _{0 kV m⁻¹}	Sh _{300 kV m⁻¹} / Sh _{0 kV m⁻¹}	Sh _{400 kV m⁻¹} / Sh _{0 kV m⁻¹}
303	0,01593	0,099	0,114	0,109	0,168	1,15	1,10	1,70
313	0,01617	0,109	0,101	0,129	0,117	0,93	1,19	1,07
323	0,01643	0,073	0,070	0,090	0,169	0,96	1,23	2,31

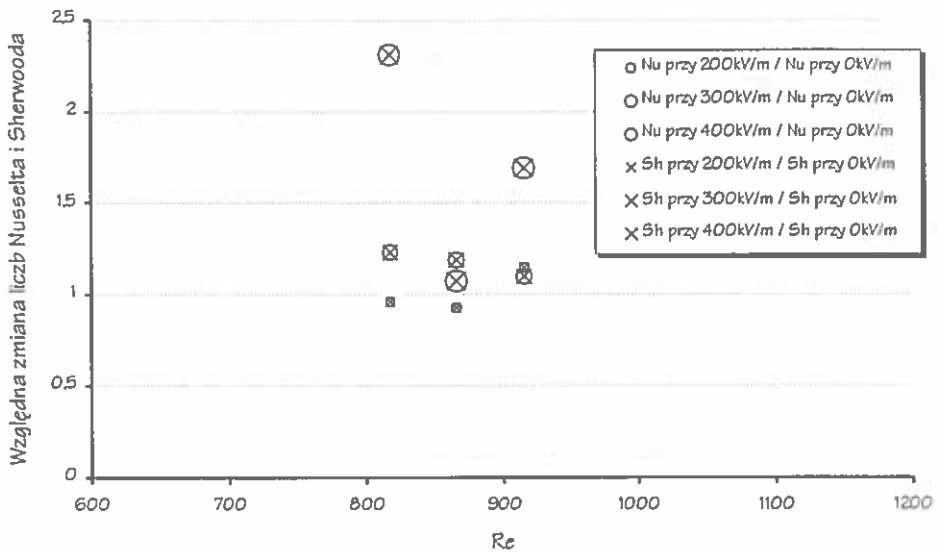
Względna zmiany liczby Sherwooda wywołana obecnością pola elektrycznego pokazuje, że za pomocą pola elektrycznego można przyspieszać usuwanie wody nawet około dwa razy.

Obliczone wartości względne zmian liczb Nusselta i Sherwooda w funkcji liczby Reynoldsa zostały zamieszczone na Rys. 4.3.

1. Porównując otrzymane dane z wynikami innych badaczy obserwuje się przyrost liczb charakteryzujących wymianę ciepła i masy w przypadkach występowania pola elektrycznego z wiatrem jonowym w wartościach zmian względnych.
2. Małe zmiany wartości liczby Reynoldsa spowodowane zostały przez techniczne ograniczenie możliwości obniżania prędkości przepływu poniżej wartości prędkości liniowej 0,3 m s⁻¹, zaś powyżej wymienionej prędkości efekt wspomaganie wymiany ciepła i masy nie zachodził.
3. Liczba Nusselta charakteryzująca wymianę ciepła w zbadanym przypadku pozostaje na poziomie zbliżonym do zaprezentowanego w pracy Sadek i in. [65] (Rys. 4.2) tj. około 20.
4. Liczba Sherwooda opisująca wymianę masy pozostaje jednak na wielokrotnie niższym poziomie. Różnica ta to prawie dwa rzędy wielkości. Mimo to zmiany liczb w wartościach względnych pomiędzy przebiegami procesów bez występowania pola elektrycznego i z polem pozostają na podobnym poziomie.

Sytuację w różnicy wartości bezwzględnych przy jednoczesnym podobieństwie wartości względnych tłumaczy różnica w prowadzonych doświadczeniach. W pracach [65,67] opisywana była sytuacja odparowania wody bezpośrednio z jej powierzchni. W przypadku usuwania wody z dielektryka należy wziąć pod uwagę opory dyfuzji wody w suszonym ciele. W przypadku bezpośredniego odparowania wody, występuje równomierne w czasie usuwanie wody. W przypadku suszenia dielektryków, wysuszona powierzchnia nie jest automatycznie ponownie nawilżana. Musi zostać doprowadzona woda z wnętrza ciała.

Otrzymane względne wartości zmian liczb Nu i Sh powyżej 2, potwierdzają przyspieszanie przejmowania ciepła i masy w przypadku suszenia dielektryka w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym.



Rys. 4.3. Wartości względne liczb Sherwooda i Nusselta w funkcji liczby Reynoldsa dla różnych natężeń pola przy suszeniu płaskiej powierzchni dielektryka otrzymane drogą eksperymentalną.

Fig. 4.3. Experimental relative Sherwood and Nusselt numbers versus Reynolds number for different electric field intensities during water vaporization from flat surface of the dielectric.

5. MATEMATYCZNE MODELE STOSOWANE W ZAGADNIENIACH PRZEWODZENIA CIEPŁA I WYMIANY MASY

Rozwiązywanie problemów dotyczących wymiany ciepła i masy składa się z kilku kroków. Pierwsze kilka z nich to [75]:

- określenia modelu fizycznego zjawiska,
- sporządzenie modelu matematycznego zjawiska,
- dobór metody rozwiązania problemu spośród metod analitycznych, numerycznych lub eksperymentalnych.

Zjawiska wymiany ciepła i masy badane są często metodami eksperymentalnymi, tak jak zostało to zaprezentowane w poprzednich rozdziałach pracy. Nie ma na tyle słusznych teorii, aby można było dokładnie przewidywać wartości parametrów określających właściwości termofizycznych ciał stałych i cieczy. Wymiana ciepła przez styk może być tylko z dużym przybliżeniem obliczana teoretycznie, natomiast może być bardziej dokładnie określana na podstawie bezpośredniego eksperymentu. Zwłaszcza w badaniach przepływów turbulentnych badania eksperymentalne nie tylko weryfikują opisy teoretyczne, ale wskazują nowe drogi rozwoju teorii.

Rozwiązania numeryczne to zbiory liczbowe i wykresy. Rozwiązania numeryczne pozwalają na stosunkowo proste uwzględnienie skomplikowanych kształtów, warunków brzegowych, zależności właściwości materiałowych od temperatury. Ich dokładność ograniczona jest koniecznością dyskretyzacji przestrzeni i czasu.

Metody analityczne dają wyniki w postaci wzorów matematycznych łatwych do uogólnienia i analizowania. Wzory te są dokładne dla prostych przypadków wymiany ciepła i masy. Przy skomplikowanych kształtach i warunkach brzegowych rozwiązania wymagają tak istotnych założeń upraszczających, że stają się mniej dokładne od rozwiązań numerycznych [75]. Analityczne rozwiązanie równań są znane dla praktycznie rzadko spotykanych ciał o strukturze jednorodnej i kształtach takich jak kula, pręt, walec, płyta o nieskończonych wymiarach.

W związku z wymienionymi cechami poszczególnych metod, w niniejszej pracy analiza problemu jest kompilacją metod eksperymentalnych, analitycznych i numerycznych.

5.1. Podstawowe równania przewodzenia ciepła i wilgoci w ciałach stałych

Przy praktycznej analizie procesów suszarniczych konieczna jest znajomość temperatury i wilgotności w różnych punktach ogrzewanego lub schładzanego ciała w każdym momencie procesu suszenia.

Równanie przewodzenia ciepła w suchych ciałach stałych ma następującą postać [29,41,52]:

$$\nabla^2 t = \frac{1}{a_t} \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (5.1)$$

gdzie: t - temperatura, K; τ - czas, s; a_t - współczynnik dyfuzji cieplnej, $a_t = k/c\rho_m$, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; k - współczynnik przewodzenia ciepła, W (m K)^{-1} ; c - ciepło właściwe, J (g K)^{-1} ; ρ_m - gęstość, g m^{-3} .

Dla ciała wilgotnego równanie przyjmuje kształt [52]:

$$\nabla^2 t = \frac{1}{a_t} \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} - \frac{r}{c} \varepsilon_f \frac{du}{d\tau} \right), \quad (5.2)$$

gdzie: r - ciepło parowania, J g^{-1} ; ε_f - współczynnik przemiany fazowej, $\varepsilon_f = du_f/du$, $0 \leq \varepsilon_f \leq 1$; du_f - różniczka określająca zmianę zawartości wody w parę, du - różniczka określająca całkowitą zmianę zawartości wody (na parę i ruch cieczy).

Tak samo, jak można opisać równaniami proces wymiany ciepła, można opisać proces przewodzenia wody w ciele stałym:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{a_m} \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} - \delta_t \nabla^2 t \right), \quad (5.3)$$

gdzie: u - zawartość wody, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ suchej masy, a_m - współczynnik dyfuzji masy wody, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; δ_t - współczynnik termogradientny, $\% \text{K}^{-1}$.

Równanie przewodności wody w przypadku suszenia konwekcyjnego przy pomijalnych gradientach temperatury przyjmuje postać [52]:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{a_m} \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (5.4)$$

Po rozwiązaniu równań przewodności ciepła i wody otrzymuje się funkcję, za pomocą której można obliczyć wartość temperatury lub zawartość wody w dowolnym punkcie ciała w wybranej chwili procesu suszenia.

5.1.1. Warunki graniczne

Równania różniczkowe przewodzenia ciepła i wymiany masy ustanawiają związek pomiędzy zmiennymi czasowymi i przestrzennymi temperatury oraz wilgotności ciała. W celu znalezienia pola temperaturowego lub „wilgotnościowego” wewnątrz ciała w wybranej chwili czasu, tzn. aby rozwiązać równanie różniczkowe, wymagana jest znajomość rozkładu pola w ciele w chwili początkowej (warunek początkowy), geometrycznego wyglądu ciała i prawa wzajemnego oddziaływania pomiędzy otaczającym środowiskiem a powierzchnią ciała (warunek brzegowy) [29,41]. Ponieważ równania różniczkowe opisujące przewodzenie ciepła i wilgoci mają identyczną postać ((5.1), (5.4)) gdyż zjawiska wymiany ciepła i masy (wilgoci) są zjawiskami analogicznymi [52], zagadnienie warunków brzegowych opisane zostanie na przykładzie pola temperaturowego.

Zespół warunków brzegowego i początkowego nazywa się warunkami granicznymi. Warunek początkowy nazywany jest czasowym warunkiem brzegowym, warunek brzegowy - przestrzennym warunkiem granicznym.

Warunek początkowy wyznaczony jest przez zadanie rozkładu temperatury wewnątrz ciała w początkowej chwili czasu, tj. (w przypadku prostokątnego układu współrzędnych):

$$t(x, y, z, 0) = f(x, y, z) \quad (5.5)$$

W większości przypadków, w początkowej chwili procesu, przyjmuje się równomierny rozkład temperatury ($t(x, y, z, 0) = t_0 = \text{const.}$).

Warunek graniczny może być ponadto zadany kilkoma sposobami.

- **Warunek graniczny pierwszego rodzaju** składa się z danego rozkładu temperatury na powierzchni ciała $t_{II}(\tau)$ w danej chwili ($t_{II}(\tau) = f(\tau)$). W szczególnym przypadku temperatura na powierzchni ciała może pozostawać stała ($t_{II}(\tau) = t_C = \text{const.}$) przez cały proces wymiany ciepła. Taka sytuacja może zachodzić przy sztucznym utrzymywaniu stałej temperatury lub przy specjalnych warunkach wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią ciała z otoczeniem.

- **Warunek graniczny drugiego rodzaju** składa się z zadania gęstości strumienia ciepła q_{II} dla każdego punktu na powierzchni ciała w funkcji czasu ($q_{II}(\tau) = f(\tau)$). Prostszy przypadek warunku granicznego drugiego rodzaju zakłada stałość gęstości strumienia ciepła ($q_{II}(\tau) = \text{const.}$). Taki rodzaj wymiany ciepła ma miejsce przy nagrzewaniu ciał w piecach wysokotemperaturowych, gdzie przekazywanie ciepła zachodzi głównie przy pomocy promieniowania zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana, kiedy temperatura ciała jest znacznie niższa od temperatury powierzchni promieniujących.

- **Warunek graniczny trzeciego rodzaju** polega na zadaniu temperatury środowiska otaczającego ciało i określeniu prawa wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią ciała i otaczającym środowiskiem. Zazwyczaj warunki graniczne trzeciego rodzaju charakteryzują prawo konwekcyjnej wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią ciała i otaczającym środowiskiem w procesach nagrzewania i schładzania ciała. Prawo konwekcyjnej wymiany ciepła jest wtedy bardzo złożone, ale dla uproszczenia zadania można przyjąć postać prawa Newtona.

Według prawa Newtona ilość ciepła przekazywanego w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię ciała z otaczającego ośrodka o temperaturze t_C w procesie nagrzewania (chłodzenia) ciała ($t_C > t_{II}(\tau)$) jest proporcjonalna do różnicy temperatur powierzchni ciała i otaczającego ośrodka:

$$q_{II}(\tau) = \alpha [t_C - t_{II}(\tau)], \quad (5.6)$$

gdzie: α - współczynnik wymiany ciepła, $W (m^2 K)^{-1}$, II - indeks oznaczający ciało, C - indeks oznaczający otaczające środowisko.

Zgodnie z zasadą zachowania energii ilość przekazywanego ciepła powinna być równa ilości ciepła przewodzonego wewnątrz ciała.

gdzie: k - współczynnik przewodzenia ciepła, $W (m K)^{-1}$; n - składowa normalna do powierzchni ciała.

$$q_{II}(\tau) = \alpha [t_C - t_{II}(\tau)] = -k \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{II}, \quad (5.7)$$

Niekiedy można spotkać się z zapisem warunku granicznego w poniższej postaci [41]:

$$k \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{II} + \alpha [t_C - t_{II}(\tau)] = 0. \quad (5.8)$$

Mimo, że współczynnik wymiany ciepła zależy od różnicy temperatur, stanu powierzchni ciała i otaczającego środowiska, to w przybliżeniach zakłada się jego stałość niezależną od temperatury i lokalizacji na powierzchni ciała. W szczególnym przypadku (gdy $\alpha \rightarrow \infty$ lub $k \rightarrow 0$) warunek trzeciego rodzaju może przyjąć postać warunku pierwszego rodzaju; $t_{II}(\tau) = t_C = \text{const}$.

- **Warunki graniczne czwartego rodzaju** odpowiadają wymianie ciepła z otaczającym ośrodkiem zgodnie z prawem przewodzenia ciepła lub wymianie ciepła w systemie ciał pozostającym w kontakcie pomiędzy sobą (jednakowe temperatury powierzchni).

Na początku procesu zakłada się jednakową temperaturę na powierzchni ciała ($t_{II}(\tau) = t_C(\tau)$). Wymiana ciepła opiera się na przewodzeniu ciepła i ma miejsce równość strumieni ciepła:

$$-k \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{II} = -k_c \left(\frac{\partial t_c}{\partial n} \right)_{II}. \quad (5.9)$$

Opierając się na zaprezentowanej klasyfikacji warunków granicznych, stwierdzamy, że w przypadku analizy zbadanego eksperymentalnie procesu suszenia, mamy do czynienia z warunkami granicznymi trzeciego rodzaju, jeśli chodzi o wymianę ciepła na drodze konwekcji pomiędzy suszoną powierzchnią dielektryka warstwowego, i warunkami granicznymi czwartego rodzaju w przypadku przewodzenia ciepła pomiędzy warstwami ośrodka. Połączenie tych dwóch warunków oraz sferoidalny kształt analizowanego dielektryka powoduje, że w literaturze nie można spotkać rozwiązania podobnego problemu. Dalsza część pracy zawiera opis zagadnienia, który pozwala zbliżyć się do rozwiązania problemu.

5.2. Analityczne rozwiązanie równania suszenia ciała stałego

5.2.1. Założenia podstawowe

Analityczne rozwiązanie równań (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) są znane dla ciał o strukturze jednorodnej i kształtach takich jak kula, nieskończenie długi pręt, walec o skończonej długości, płyta o nieskończonych wymiarach [23,29,41,45,52]. Ciała jednorodne są jednak w praktyce rzadko spotykane.

Przykładowo, często spotykanym produktem w praktyce suszenia są nasiona różnych kultur roślinnych - najczęściej zbóż. Mają one kształt zbliżony do sferoidy wydłużonej i strukturę warstwowo niejednorodną [14,39,63,58]. W pierwszym przybliżeniu można je aproksymować strukturą jednorodną.

Do opisu przebiegu suszenia ziaren, używa się równania dyfuzji[52]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (5.10)$$

Dokładna analiza suszenia ciała stałego powinna uwzględniać:

- rzeczywisty kształt ciała,
- rzeczywistą złożoność jego budowy,
- nieliniowy charakter właściwości cieplnych ciała.

Analityczne rozwiązanie problemu z uwzględnieniem wszystkich czynników jest zadaniem trudnym. Pełny opis zachodzących zjawisk zawierałby kombinację

warunków brzegowych trzeciego i czwartego rodzaju [41]. Dlatego też podobnie jak w innych pracach [52], przyjęto założenia upraszczające analizę zjawisk, a jednocześnie nie zniekształcające fizycznej strony zjawisk. Założono, że:

- ruch wody wewnątrz ciała odbywa się tylko i wyłącznie przez dyfuzję,
- współczynnik dyfuzji a_m ma wartość stałą,
- opór wymiany wody z powierzchni zewnętrznej ciała jest pomijalnie mały w porównaniu z oporami wewnątrz ciała,
- zawartość wody na powierzchni ciała staje się równa równoważnej zawartości wody wraz z rozpoczęciem procesu suszenia,
- warunki suszenia oraz kształt i wymiary ciała są niezmiennie w czasie całego procesu suszenia,
- w momencie początkowym ($\tau=0$) wewnątrz ciała panuje równomierny rozkład zawartości wody ($u(0, \eta, \theta, \psi) = u_0 \text{ const}$ - dla sferoidy; $u(0, r) = u_0 = \text{const}$ - dla kuli).

Założenia dotyczące wartości oporu wymiany wody wewnątrz ciała w porównaniu z oporem wymiany wody z powierzchni zewnętrznej oraz założenie stałego początkowego rozkładu zawartości wody powoduje, że układ posiada warunki graniczne pierwszego rodzaju.

5.2.2. Równanie suszenia jednorodnej sferoidy wydłużonej

Ponieważ kształty ciał spotykanych w rzeczywistości są zazwyczaj bardziej skomplikowane niż kształty ciał, dla których istnieją analityczne rozwiązania równania suszenia, podjęto próbę opracowania metody rozwiązania równania dla ciał o kształtach zbliżonych do sferoidy wydłużonej. Taki kształt posiadają nasiona zbóż.

W układzie współrzędnych sferoidy wydłużonej η, θ, ψ [45] (Rys. 1.11), możliwe jest rozdzielenie zmiennych w równaniach Laplace'a i Helmholtza. Kształt analizowanego ciała w tym układzie może zmieniać się od kulistego do cienkiego pręta o skończonej długości. Znalezienie rozwiązania w tym układzie współrzędnych może poszerzyć rodzinę analizowanych kształtów.

Przy założeniach wymienionych w punkcie 5.2.1, równanie przewodzenia wody ma analogiczną postać do równania przewodzenia ciepła (5.1):

$$\nabla^2 u = \frac{1}{a_m} \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (5.11)$$

Oddzielając w tym równaniu wyrazy zawierające czas, od wyrazów zawierających współrzędne przestrzenne, można sprowadzić rozwiązanie równania dyfuzji do rozwiązania równania Helmholtza ze zmiennymi przestrzennymi η, θ, ψ .

Po rozdzieleniu zmiennych otrzymujemy wyrażenia z funkcjami U^1, U^2, U^3 .
Rozwiązanie równania dyfuzji ma postać:

$$u = U^1(\eta)U^2(\theta)U^3(\psi)T(\tau) = UT, \quad (5.12)$$

gdzie: $T(\tau)$ - malejąca wykładniczo funkcja czasu.

Wstawiając równanie (5.12) do (5.11) mamy:

$$\frac{1}{u} \nabla^2 u = \frac{1}{a_m T} \frac{dT}{d\tau} = -\gamma^2. \quad (5.13)$$

Stąd otrzymujemy dwa rozwiązania:

$$\text{- dla zmiennej czasowej: } \frac{dT}{d\tau} + \gamma^2 a_m T = 0, \quad (5.14)$$

$$\text{o rozwiązaniu: } T = Ae^{-\gamma^2 a_m \tau}, \quad (5.15)$$

$$\text{- równanie Helmholtza: } \Delta u + \gamma^2 u = 0 \quad (5.16)$$

Rozwiązaniem równania Helmholtza jest wyrażenie [45]:

$$\frac{1}{f_i} \frac{d}{du^i} \left(f_i \frac{dU^i}{du^i} \right) + U^i \sum_{j=1}^3 a_j \Phi_{ij} = 0, \quad i=1,2,3. \quad (5.17)$$

gdzie: f_i - funkcje określone przez układ współrzędnych, nie zależą od warunków brzegowych ani od stałych rozdzielania a_j ; U^i - funkcje współrzędnych i stałych rozdzielania a_j , $u^1 = \eta$, $u^2 = \theta$, $u^3 = \psi$ - rzędne w układzie współrzędnych sferoidy wydłużonej; Φ_{ij} - funkcje współrzędnych.

Współrzędne sferoidy wydłużonej (η, θ, ψ) są związane ze współrzędnymi prostokątnymi za pomocą wzorów [45]:

$$\left. \begin{aligned} x &= a \operatorname{sh} \eta \sin \theta \cos \psi, \\ \psi &= a \operatorname{sh} \eta \sin \theta \cos \psi, \\ z &= a \operatorname{ch} \eta \cos \theta. \end{aligned} \right\} \quad (5.18)$$

Na podstawie (5.18) współczynniki metryki mają postać:

$$\left. \begin{aligned} g_{11} &= g_{12} = a^2 (sh^2 \eta + \sin^2 \theta), \\ g_{33} &= a^2 sh^2 \eta \sin^2 \theta, \\ g^{1/2} &= a^2 sh^2 \eta \sin \theta (sh^2 \eta + \sin^2 \theta). \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

Funkcje $f_1(\eta)$, $f_2(\eta)$, $f_3(\eta)$ - można wyznaczyć:

- z drugiego warunku na rozdzielanie proste równania Helmholtza [45]:

$$\frac{g^{1/2}}{S} = f_1(\eta)f_2(\eta)f_3(\eta), \quad (5.20)$$

gdzie: S - wyznacznik Stäckela,

- oraz z twierdzenia [45]:

$$g_{33} = [f_1(u^1)f_2(u^2)]^2. \quad (5.21)$$

Na podstawie (5.19) i (5.21) otrzymujemy:

$$a^2 sh^2 \eta \sin^2 \theta = [f_1(\eta)f_2(\eta)]^2, \quad (5.22)$$

skąd:

$$f_1(\eta) = ash\eta, \quad (5.23)$$

$$f_2(\theta) = a \sin \theta. \quad (5.24)$$

Do wyznaczenia funkcji $f_3(\eta)$ z (5.14) potrzebna jest znajomość wyznacznika S . Na podstawie [45]:

$$S = \Phi_{11}(u^1) + \Phi_{21}(u^2) = g_{11}. \quad (5.25)$$

Na podstawie (5.13) i (5.19) otrzymujemy:

$$S = \Phi_{11}(\eta) + \Phi_{21}(\theta) = a^2 sh^2 \eta + a^2 \sin^2 \theta. \quad (5.26)$$

skąd:

$$S = a^2 sh^2 \eta + a^2 \sin^2 \theta, \quad (5.27)$$

Wstawiając (5.19), (5.27), (5.23) i (5.24) do (5.20) otrzymano:

$$f_3(\psi) = \frac{1}{a^2}. \quad (5.28)$$

Funkcje $\Phi_{11}(\eta)$, $\Phi_{12}(\eta)$, $\Phi_{13}(\eta)$, $\Phi_{21}(\theta)$, $\Phi_{22}(\theta)$, $\Phi_{23}(\theta)$, $\Phi_{33}(\psi)$ wyznaczamy na podstawie:

– warunków koniecznych i dostatecznych na wykonanie rozdzielenia prostego zmiennych w równaniu Helmholtza w trójwymiarowej przestrzeni i ortogonalnym osiowosymetrycznym układzie współrzędnych [45]:

$$g_{11} = \Phi_{11}(\eta) + \Phi_{21}(\theta), \quad (5.29)$$

$$\frac{g_{11}}{g_{33}} = -[\Phi_{13}(\eta) + \Phi_{23}(\theta)]. \quad (5.30)$$

– i postaci macierzy Stäckela dla osiowosymetrycznego układu współrzędnych [45]:

$$|S| = \begin{vmatrix} \Phi_{11}(\eta) & -1 & \Phi_{13}(\eta) \\ \Phi_{21}(\theta) & 1 & \Phi_{23}(\theta) \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (5.31)$$

Stąd:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{11}(\eta) &= a^2 sh^2 \eta & \Phi_{12}(\eta) &= -1 & \Phi_{13}(\eta) &= -\frac{1}{sh^2 \eta} \\ \Phi_{21}(\theta) &= a^2 sh^2 \theta & \Phi_{22}(\theta) &= 1 & \Phi_{23}(\theta) &= -\frac{1}{sh^2 \theta} \\ \Phi_{31}(\psi) &= 0 & \Phi_{32}(\psi) &= 0 & \Phi_{33}(\psi) &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (5.32)$$

Podstawiając wyznaczone funkcje (5.23), (5.24), (5.28) i (5.32) odpowiednio do wyrażenia (5.17) otrzymujemy trzy równania różniczkowe zwyczajne. Każde z nich zawiera tylko jedną stałą niezależną. Rozdzielone równanie Helmholtza w układzie współrzędnych sferoidy wydłużonej przyjmuje ostatecznie postać:

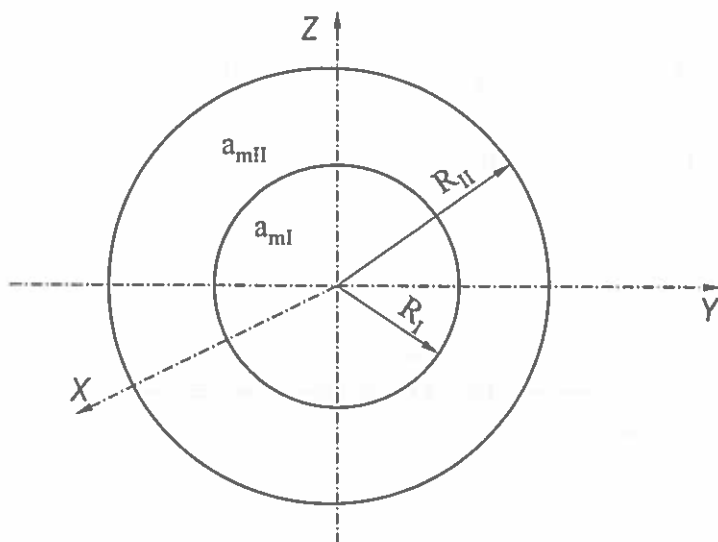
$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{ash\eta} \frac{d}{d\eta} \left(ash\eta \frac{du(\eta)}{d\eta} \right) + u(\eta) \left[a_1 a^2 sh^2 \eta + a^2 (-1) + a_3 \frac{1}{sh^2 \eta} \right] &= 0 \\ \frac{1}{ash\theta} \frac{d}{d\theta} \left(a \sin\theta \frac{du(\theta)}{d\theta} \right) + u(\theta) \left[a_1 a^2 \sin^2 \theta + a^2 + a_3 \frac{-1}{\sin^2 \eta} \right] &= 0 \\ a^2 \frac{d}{d\psi} \left(\frac{1}{a^2} \frac{du(\psi)}{d\psi} \right) + u(\psi) a_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.33)$$

Rozwiązanie tego układu równań umożliwi wyznaczenie zawartości wody w dowolnym punkcie wewnątrz sferoidy i w dowolnej chwili procesu suszenia ($0 < \tau < \infty$), zgodnie z równaniem (5.12).

5.2.3. Równanie suszenia kuli o strukturze warstwowej

Przypadki analizy równania suszenia ciał o kształtach regularnych przybliżają do rozwiązania problemu usuwania wody z suszonego dielektryka warstwowego o kształcie sferoidy warstwowej. Poniżej przedstawiono rozwiązanie zagadnienia przebiegu suszenia dla modelu ciała jednorodnego o kształcie kulistym i strukturze warstwowej. Należy przy tym pamiętać o wyidealizowaniu kształtu i dużej ilości założeń wstępnych.

Przekrój badanego ciała o strukturze warstwowo niejednorodnej kuli przedstawiono na Rys. 5.1.



Rys. 5.1. Kula o strukturze warstwowo niejednorodnej.

Fig. 5.1. Heterogeneous layers in a sphere.

Zagadnienie zmiany wilgotności u ciała w funkcji czasu τ oraz promienia r należy do nieustalonych zagadnień przewodnictwa. Są one opisywane, przedstawionymi w podpunkcie 5.1, równaniem różniczkowym dyfuzji (5.3), a przy założeniu pomijalnych gradientów temperatury równaniem (5.4).

Równanie suszenia we współrzędnych sferycznych ma postać [45]:

$$a_m \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial u}{\partial \tau}, \quad (5.36)$$

gdzie: u - zawartość wody, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ suchej masy; r - promień punktu w obrębie kuli, $0 \leq r \leq R_{II}$, m; a_{m1} , a_{m2} - współczynniki dyfuzji masy wody w poszczególnych warstwach, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; R_I , R_{II} - promienie współśrodkowych kul różniących się między sobą współczynnikiem dyfuzji wody a_m , m; τ - czas, s.

Poszukiwane rozwiązanie oznaczmy przez U :

$$U = \frac{u(\tau, r) - u_r}{u_0 - u_r}, \quad (5.37)$$

gdzie: u_0 - początkowa zawartość wody w suszonym ciele, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ s.m.; u_r - równoważna zawartość wody, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ s.m.; $u(\tau, r)$ - wielkość zmienna zawartości wody, $\text{kg H}_2\text{O kg}^{-1}$ s.m.

Tak zdefiniowana wielkość U odpowiada pojęciu zredukowanej zawartości wody [52]. Wówczas równanie (5.4) i (5.36) przyjmie kształt:

$$a_m \nabla^2 U = \frac{\partial U}{\partial \tau}. \quad (5.38)$$

Rozwiązanie tego równania zakładamy w postaci [45]:

$$U = \varphi(r) \cdot T(\tau). \quad (5.39)$$

gdzie: $\varphi(r)$ - funkcja opisująca rozkład wilgoci, $T(\tau)$ - malejąca wykładniczo funkcja czasu.

Rozwiązanie ogólne dla zmiennej czasowej jest niezależne od rodzaju współrzędnych i ma kształt [45]:

$$T = A_n e^{-\gamma_n^2 a_m \tau} \quad (5.40)$$

gdzie: γ_n - stała.

Drugie równanie, które wynika z rozdzielenia zmiennych w równaniu (5.38) jest równaniem Helmholtza ze zmienną przestrzenną r :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \gamma^2 \varphi = 0. \quad (5.41)$$

Rozwiązaniem tego równania jest

$$\varphi = \frac{1}{r} \left(\frac{\sin}{\cos} \right) \gamma_n r. \quad (5.42)$$

Stąd szczególnymi rozwiązaniami równania suszenia we współrzędnych kulistych są:

$$U = A_n \frac{e^{-\gamma_n^2 a_m \tau}}{r} \sin \gamma_n r, \quad (5.43)$$

$$U = A_n \frac{e^{-\gamma_n^2 a_m \tau}}{r} \cos \gamma_n r. \quad (5.44)$$

Dla $r \rightarrow 0$ funkcja φ musi pozostawać skończona. Natomiast wyrażenie $(\cos \gamma_n r / r)$ z równania (5.44) dla $r \rightarrow 0$ dąży do ∞ . Z tego powodu nie możemy do rozwiązania w obszarze I przyjąć wyrażen zawierających funkcję cosinus. Dlatego rozwiązanie w obszarze I będzie się składało z wyrażen (5.42) zawierających funkcje sinus:

$$\varphi_{nI} = \frac{A_n}{r} \sin \gamma_n r. \quad (5.45)$$

Dla obszaru II rozwiązanie będzie zawierało już obydwie funkcje:

$$\varphi_{nII} = \frac{C_n}{r} \sin \gamma_{n2} r + \frac{D_n}{r} \cos \gamma_{n2} r. \quad (5.46)$$

W przypadku granicznym kiedy $R_I \rightarrow 0$ obszar całej kuli staje się jednorodny. Z tych powodów rozwiązanie (5.45), podobnie jak (5.46), może zawierać tylko funkcje sinus, więc należy przyjąć, że:

$$D_n = 0 \quad \text{oraz} \quad \varphi_{nII} = \frac{C_n}{r} \sin \gamma_{n2} r. \quad (5.47)$$

Z założenia, że na granicy obszarów występuje ciągłość zmiany wilgotności, wynika, że dla $r=R_I$:

$$\varphi_{nI} = \varphi_{nII} \quad (5.48)$$

skąd

$$\frac{A_n}{R_I} \sin \gamma_{n1} R_I = \frac{C_n}{R_I} \sin \gamma_{n2} R_I. \quad (5.49)$$

Z tego wyrażenia wynika, że

$$A_n = C_n \frac{\sin \gamma_{n2} R_I}{\sin \gamma_{n1} R_I} C_n g_n. \quad (5.50)$$

W technice suszarniczej przyjmuje się, że zewnętrzny opór wymiany wilgoci (tj. na zewnętrznej powierzchni ciała) jest bardzo mały w porównaniu z oporami wewnętrznymi. Oznacza to, że zawartość wody na zewnętrznej powierzchni ciała dla $r=R_{II}$ jest równa jej równoważnej zawartości wody. Matematyczny zapis tego warunku jest następujący [52] dla $r=R_{II}$

$$U(\tau, R_{II}) = \frac{u(\tau, R_{II}) - u_r}{u_0 - u_r} = 0. \quad (5.51)$$

Na tej podstawie można zapisać, że:

$$\varphi_{nII}(R_{II}) = 0, \quad (5.52)$$

skąd
$$\sin \gamma_{n2} R_{II} = 0. \quad (5.53)$$

Na podstawie (5.52) można obliczyć:

$$\gamma_{n2} = \frac{n\pi}{R_{II}}, \quad (5.54)$$

gdzie: n - liczba całkowita.

Dodatkowo zakładamy, że wilgotność zmienia się w sposób regularny. Oznacza to, że istnieje i jest ciągła pochodna:

$$\frac{d\varphi_n}{dr} \quad \text{dla } 0 \leq r \leq R_{II}. \quad (5.55)$$

Stąd:

$$\frac{d\varphi_{nI}}{dr} = \frac{d\varphi_{nII}}{dr} \quad \text{dla } r = R_I. \quad (5.56)$$

Wykonując na wyrażeniach (5.45), (5.47) operacje różniczkowania i wstawiając je do (5.56) otrzymujemy:

$$\gamma_{n1} R_I \operatorname{ctg} \gamma_{n1} R_I = n\pi \frac{R_I}{R_{II}} \operatorname{ctg} n\pi \frac{R_I}{R_{II}}, \quad (5.57)$$

skąd

$$\operatorname{tg} \gamma_{nI} R_I = \frac{\gamma_{nI} R_I}{n\pi \frac{R_I}{R_{II}} \operatorname{ctg} n\pi \frac{R_I}{R_{II}}}. \quad (5.58)$$

Wartości γ_{nI} należy wyznaczyć graficznie lub numerycznie przyjmując jako zmienną $\gamma_{nI} R_I$.

W chwili początkowej $\tau = 0$ wewnątrz ciała panuje równomierne rozłożenie zawartości wody. Ten warunek początkowy można zapisać [52]:

$$U(0, r) = \sum_n \varphi_n(r) = 1. \quad (5.59)$$

Mnożąc równanie (5.59) dwustronnie przez $r f_i(r)$, otrzymamy:

$$\sum_n r \cdot \varphi_n(r) \cdot f_i(r) = r \cdot f_i(r). \quad (5.60)$$

Zgodnie z wcześniej przeprowadzonymi rozważaniami kształt funkcji $f_i(r)$ przyjmiemy w postaci:

$$f_i(r) = \begin{cases} \sin \gamma_{i1} r & \text{dla } r \leq R_I \\ g_i \sin \gamma_{i2} r & \text{dla } R_I \leq r \leq R_{II} \end{cases} \quad (5.61)$$

gdzie:
$$g_i = \frac{\sin \gamma_{i1} R_I}{\sin \gamma_{i2} R_I}. \quad (5.62)$$

Zgodnie z Rys. 4.2 obszar kuli ze względu na swą niejednorodność składa się z dwóch obszarów. Stąd też równanie (5.60) rozdzielimy na dwie całki, odpowiednio w granicach od 0 do R_I oraz od R_I do R_{II} :

$$\sum_n \left[\int_0^{R_I} r \varphi_{nI}(r) f_i(r) dr + \int_{R_I}^{R_{II}} r \varphi_{nII}(r) f_i(r) dr \right] = \int_0^{R_{II}} r f_i(r) dr \quad (5.63)$$

Wstawiając do (5.63) odpowiednio (5.45), (5.47) oraz (5.61) otrzymamy równanie:

$$\begin{aligned} \sum_n \left[A_n \int_0^{R_I} \sin \gamma_{n1} r \cdot \sin \gamma_{i1} r dr + C_n g_i \int_{R_I}^{R_{II}} \sin \gamma_{n2} r \sin \gamma_{i2} r dr \right] = \\ = \int_0^{R_I} r \sin \gamma_{i1} r dr + g_i \int_{R_I}^{R_{II}} r \sin \gamma_{i2} r dr. \end{aligned} \quad (5.64)$$

Wstawiając w miejsce C_n wyrażenie (5.50) i ograniczając szereg do N wyrazów otrzymamy skończony układ równań, z którego można wyznaczyć stałe A_n :

$$\sum_{n=1}^N A_n \left(\int_0^{R_i} \sin \gamma_{n1} r \sin \gamma_{i1} r dr + \frac{g_i}{g_n} \int_{R_1}^{R_{i1}} \sin \gamma_{n2} r \sin \gamma_{i2} r dr \right) = \int_0^{R_i} r \sin \gamma_{i1} r dr + g_i \int_0^{R_{i1}} r \sin \gamma_{i2} r dr \quad \text{dla } i = 1, 2, \dots, N. \quad (5.65)$$

Całki nieoznaczone występujące po lewej części równania (5.65) w wyniku całkowania analitycznego przybierają postać [70]:

$$\text{- dla } \gamma_n \neq \gamma_i \quad \int \sin \gamma_n r \sin \gamma_i r dr = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin(\gamma_n - \gamma_i)r}{\gamma_n - \gamma_i} - \frac{\sin(\gamma_n + \gamma_i)r}{\gamma_n + \gamma_i} \right] \quad (5.66)$$

$$\text{- dla } \gamma_n \neq \gamma_i \quad \int \sin^2 \gamma_n r dr = \int \sin^2 \gamma_i r dr = \frac{1}{2} \left[r - \frac{\sin 2\gamma_n r}{2\gamma_n} \right] \quad (5.67)$$

Ogólnie można napisać, że:

$$\int \sin \gamma_n r \sin \gamma_i r dr = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\sin(\gamma_n - \gamma_i)r}{(\gamma_n - \gamma_i)r} \right) r - \frac{\sin(\gamma_n + \gamma_i)r}{\gamma_n + \gamma_i} \right] = F_1(r, \gamma_n, \gamma_i) \quad (5.68)$$

Dla $\gamma_n = \gamma_i$ w wyrażeniu (5.68) wystąpi symbol nieoznaczoności ($\sin 0/0$). Należy wówczas jego wartość przyjąć równą 1, gdyż $\lim_{z \rightarrow 0} \frac{\sin z}{z} = 1$.

Całki nieoznaczone po prawej części równania (5.65) przyjmą postać:

$$\int r \sin \gamma_i r dr = -\frac{r}{\gamma_i} \cos \gamma_i r + \frac{1}{\gamma_i^2} \sin \gamma_i r = F_2(r, \gamma_i) \quad (5.69)$$

Po obliczeniu, na podstawie wzorów (5.68) i (5.69) całek oznaczonych z układu równań (5.65) otrzymujemy:

$$\int_0^{R_I} \sin \gamma_{n1} r \sin \gamma_{i1} r dr = F_1(r, \gamma_{n1}, \gamma_{i1}) \Big|_0^{R_I} = F_1(R_I, \gamma_{n1}, \gamma_{i1}) - F_1(0, \gamma_{n1}, \gamma_{i1}), \quad (5.70)$$

$$\int_{R_I}^{R_{II}} \sin \gamma_{n2} r \sin \gamma_{i2} r dr = F_1(r, \gamma_{n2}, \gamma_{i2}) \Big|_{R_I}^{R_{II}} = F_1(R_{II}, \gamma_{n2}, \gamma_{i2}) - F_1(R_I, \gamma_{n2}, \gamma_{i2}), \quad (5.71)$$

$$\int_0^{R_I} r \sin \gamma_{i1} r dr = F_2(r, \gamma_{i1}) \Big|_0^{R_I} = F_2(R_I, \gamma_{i1}) - F_2(0, \gamma_{i1}) \quad (5.72)$$

$$\int_{R_I}^{R_{II}} r \sin \gamma_{i2} r dr = F_2(r, \gamma_{i2}) \Big|_{R_I}^{R_{II}} = F_2(R_{II}, \gamma_{i2}) - F_2(R_I, \gamma_{i2}) \quad (5.73)$$

Ostatecznie układ równań (5.65), po uwzględnieniu wyników (5.70÷5.73) ma postać:

$$\sum_{n=1}^N A_n \left\{ [F_1(R_I, \gamma_{n1}, \gamma_{i1}) - F_1(0, \gamma_{n1}, \gamma_{i1})] + \frac{g_i}{g_n} [F_1(R_{II}, \gamma_{n2}, \gamma_{i2})] \right\} = \text{dla } i=1, 2, \dots, N. \\ = [F_2(R_I, \gamma_{i1}) - F_2(0, \gamma_{i1})] + g_i [F_2(R_{II}, \gamma_{i2}) - F_2(R_I, \gamma_{i2})] \quad (5.74)$$

Po obliczeniu z tego układu równań stałych A_n , wyznaczymy C_n z prostej zależności [60]:

$$C_n = A_n \frac{\sin \gamma_{n1} R_I}{\sin \gamma_{n2} R_I}. \quad (5.75)$$

W efekcie uzyskuje się poszukiwane rozwiązanie opisywane w poszczególnych obszarach równaniami (5.45) i (5.46) pozwalające określić zawartość wody w suszonej kuli warstwowej.

Otrzymanie rozwiązania dla kuli warstwowej i sferoidy możliwe jest za pomocą metod numerycznych. Dodatkowo, analizując rozwiązanie otrzymane dla kuli, należy wziąć pod uwagę, że otrzymane wyniki w postaci szeregów wystarczy rozpatrywać ograniczając się do kilku wyrazów szeregu, a do celów praktycznych wystarczy pierwszy wyraz szeregu [52].

Uzyskanie pełnych rozwiązań równania suszenia dla niejednorodnej sferoidy wydłużonej będzie kolejnym krokiem, pozwalającym na wprowadzenie do nich czynnika charakteryzującego wpływ pola elektrycznego.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wielka energochłonność procesów suszarniczych zmusza do ciągłego poszukiwania czynników, które mogłyby ją obniżyć oraz poszukiwania takich sposobów przekazywania energii, w przypadku których sprawność całego procesu byłaby największa. Szczególnie duże nakłady energetyczne na suszenie, w tym suszenie konwekcyjne, ponoszone są w technice rolniczej. Z tego powodu naturalnym wydaje się wprowadzenie do już stosowanych metod suszarniczych czynników wspomagających proces, opierających się o łatwą w przekazywaniu i sterowaniu energię elektryczną.

Weryfikację tezy o możliwości wpływania na kinetykę wymiany masy w procesie suszenia dielektrycznych ciał stałych przeprowadzono w oparciu o eksperymentalne stanowisko laboratoryjne. Dzięki stanowisku możliwe było ingerowanie w przebieg procesu suszenia ziarna zbóż. Ziarno zbóż stanowi przykład ciała dielektrycznego o budowie warstwowej. Za wybraniem takiego typu wsadu suszarniczego przemawia powszechność występowania procesu konwekcyjnego suszenia ziarna zbóż. Stanowisko pozwala na suszenie konwekcyjne w obecności pola elektrycznego. Daje to możliwość generowania sił elektrostrykcyjnych w suszonym wsadzie i otaczającym go środowisku. Ponadto jest możliwa analiza wpływu pola elektrycznego z wiatrem jonowym. Możliwość zasilania strumienia powietrza ozonem wpłynęła na dodatkową weryfikację informacji na temat przyspieszania procesu suszenia przez domieszkowanie powietrza ozonem.

Przeprowadzone w pracy badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Weryfikacja hipotezy mówiącej, że siły elektrostrykcyjne mogą wpływać na kinetykę suszenia [73] dała wynik negatywny. Mimo, że analiza rozkładu pola elektrycznego wewnątrz modelowej sferoidy umieszczonej w jednorodnym polu elektrycznym wskazuje na występowanie w niej niejednorodnego pola elektrycznego [64] oraz naprężeń mechanicznych [3], które mogą spowodować zmniejszenie zdolności do zatrzymywania wody, to przeprowadzone próby porównawcze suszenia dielektryka umieszczonego w polu elektrostatycznym nie wykazały różnic w kinetyce procesu (rozdział 3.1).

2. Zastosowanie układu pomiarowego z matrycą elektrod ostrzowych umożliwiło wytworzenie pola wraz z towarzyszącym mu wiatrem jonowym, co pozwoliło na pozytywną weryfikację hipotezy o wspomaganianiu procesu suszenia konwekcyjnego [65,76] przez wiatr jonowy. Zjawisko intensyfikacji bezpośredniego odparowania wody w obecności pola elektrycznego z wiatrem jonowym można

wykorzystywać również przy suszeniu dielektrycznych ciał stałych. Różnice w kinetyce przebiegu takiego procesu suszenia widoczne są zwłaszcza w początkowym okresie suszenia, przy dużej wilgotności suszonego dielektryka (rozdział 3.2). Utrzymanie wspomaganie na wyższym poziomie przez cały okres suszenia możliwe jest po zastosowaniu stabilizacji natężenia prądu ulotu, a tym samym natężenia wiatru jonowego.

3. Opisany w pracy mechanizm intensyfikacji wymiany ciepła i masy, przez zaburzenie laminarności strugi powietrza otaczającej suszony materiał przez wiatr jonowy, wydaje się bardziej prawdopodobny od założenia istnienia w otoczeniu cienkiego przewodu „pierścienia przewodzącego ciepło”, wewnątrz którego wymiana ciepła opiera się nie o konwekcję, ale o przewodzenie [40].

4. Weryfikacja danych o zmniejszeniu zapotrzebowania energetycznego przy suszeniu konwekcyjnym powietrzem domieszkowanym ozonem [33-36] nie znalazła potwierdzenia w testach eksperymentalnych (rozdział 3.3).

5. Współczynniki oszczędności energii $q\%$ [63] wyznaczone przy temperaturach 303, 313, 323 K wskazują na możliwość przyspieszenia procesu suszenia rzędu kilkunastu i więcej procent (rozdział 3.5). Tendencja wzrostowa utrzymuje się wraz ze wzrostem natężenia prądu ulotu oraz natężenia pola elektrycznego. Konieczne jest przy tym przekroczenie pewnej wartości progowej natężenia pola elektrycznego i prądu ulotu. W badanych eksperymentalnie przypadkach przyspieszenie zachodziło przy wartościach natężenia większych niż 200 kV m^{-1} i gęstości prądu ulotu $1,49 \text{ mA m}^{-2}$.

6. Obliczone liczby kryterialne, charakteryzujące przebieg suszenia, dodatkowo potwierdzają przyspieszenie procesu suszenia zaobserwowane przy analizie krzywych suszenia oraz dają możliwość porównania procesu z innymi procesami o podobnej naturze.

Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość wykorzystania w procesie suszenia konwekcyjnego materiałów dielektrycznych pola elektrycznego z prądem ulotu pod warunkiem, że proces będzie przebiegał przy laminarnym strumieniu czynnika suszącego. Oznacza to możliwość korzystania z „elektrycznych” mechanizmów intensyfikowania suszenia ciepła innych niż grzejnictwo oporowe czy mikrofalowe.

Dla studentów wydziałów elektrycznych praktycznie stykających się z problemami suszarnictwa oraz inżynierów elektryków, wnioski z niniejszej pracy stanowić mogą przesłankę do wprowadzania elementów nowej technologii do istniejących, czy aktualnie projektowanych, urządzeń suszarniczych.

7. PIŚMIENNICTWO

1. Adamkiewicz J., Pietrzyk W., Złonkiewicz Z., Ścibisz M.: Pomiar rezystancji ziarniaków zbóż poddanych działaniu naprężeń mechanicznych. Materiały konferencyjne V Sympozjum Naukowe AR, Szczecin, 255-256, 1993.
2. Ashmann G., Kronig R.: The influence of electric fields on the convective heat transfer in liquids. *Appl. Sci. Res.*, A2, 235-244, 1950.
3. Baran J.: Influence of some material properties on electrostrictive effects within a dielectric model of grain. *Proc. of the 11th Congress on Agr. Eng.*, Dublin, 4, 2205-2210, 1989.
4. Baran J.: Elektrostatyczne efekty strykcyjne w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej. Praca doktorska, Politechnika Lubelska, Wydział Elektryczny, Lublin, 1990.
5. Basow A.M., Izakow F.A.: Elektrozemoocistelnjye masziny. *Maszynostrojenie*. Moskwa, 1968.
6. Bolkowski S.: Elektrotechnika teoretyczna. Teoria obwodów elektrycznych. WNT, Warszawa, 1986.
7. Brandt S.: Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych. PWN, Warszawa, 1975.
8. Brandt S.: Analiza danych. Metody statystyczne i obliczeniowe. PWN, Warszawa, 1998.
9. Brown, G.H., Hoyler, C.N., Bierwirth, R. A.: Theory and Application of Radio Frequency Heating. D. Van Nostrand Co. Inc., New York, 1947.
10. Cebeci T., Bradshaw P.: Physical i computational aspects of convective heat transfer. Springer-Verlag, Nowy Jork, Berlin, Heudenberg, Tokio, 1984.
11. Chelkowski A.: Fizyka dielektryków. PWN, Warszawa, 1993.
12. DeHann H.J.: The influence of electric fields on the convective heat transfer in liquids. *Appl. Sci. Res.* A3, 85-88, 1951.
13. DiMattia D.G., Amyotte P. R., Hamdullahpur F.: Fluidized bed drying of large particles. *Trans. ASAE*, 39(5), 1745-1750, 1996.
14. Evers A.D., Lindley J.: The particle-size distribution on wheat endosperm grain. *J. Sci. Fd. Agric.*, 28, 98-102, 1977.
15. Firov O.B, Lozanskij E.D.: Teorija iskry. Atomizdat, Moskva, 1975.
16. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa, 1988.
17. Frings H.: Factors determining the effects of radio-frequency electromagnetic fields and materials they infest. *J.Econ.Entomol.*, 45(3), 396-408, 1952.
18. Hanzelik F.: Dielectrical properties of wheat grains. *Acta Tech. Agric. XXV Univ. Agric. Nitra*, Czechosłowacja, 1984.
19. Hauser J.: Podstawy elektrotermicznego przetwarzania energii. Zakład Wydawniczy K. Domke, Poznań, 1996.
20. Hering M.: Podstawy elektrotermii. WNT, T. II, Warszawa, 1998.
21. Hering M.: Podstawy elektrotermii. WNT, T. I, Warszawa, 1992.
22. Hippel A: Theory in dielectric materials and applications, MIT Press, Cambridge, Mass. and John Wiley and Sons, Inc., New York, 1954.
23. Höbler T.: Ruch i wymienniki ciepła, WNT, Warszawa, 1968.
24. Holliday D., Resnick R.: Fizyka. PWN, Warszawa, 1984.
25. Horyński M., Pietrzyk W., Walusiak S.: Investigations of mechanical stress influence on grain dielectric permeability changes. XXI C.I.G.R. World Congress and AgEng'94 Conference on Agricultural Engineering, Mediolan, 1994.
26. Hustrulid A., Flikke A.M.: *Trans. Am. Society. Agric. Eng.*, 2, 112-114, 1959.
27. Januszajtis A.: Fizyka dla politechnik. Pola. PWN, Warszawa 1986.
28. Kandała C.V.K., Nelson S.O., Lawrence K.C.: Determining moisture content in small wheat samples by dual-frequency RF impedance sensing. *Trans. ASAE*, 39(3), 1185 -1188, 1996.

29. Kącki E.: Równania różniczkowe cząstkowe w zagadnieniach fizyki i techniki. WNT, Warszawa, 1995.
30. Kłauznicer J., Pluta Z., Staniszewski S.: Wpływ pola elektrycznego na rozwiniętą laminarną konwekcję swobodną w przestrzeni zamkniętej. *Archiwum termodynamiki i spalania*, 9, 3, 453, 1978.
31. Knipper N.V.: Use of high-frequency currents for grain drying. *J. Agr. Engng. Res.* 4 (4): 349-360. Translated from *Nauch. Trud. Elektrif. Selkhoz.*, 2, 185, 1956.
32. Krakowiak J., Pietrzyk, W.: Utilization of strong electrostatic field in drying process. 7th International Symposium on High Voltage Engineering, Dresden, 37-38, 1991.
33. Krejmeric J.: Ozone pretreatment in forage conservation and hay drying. *Proceedings of a conference held in Vilnius, Lithuanian, USSR*, 1988.
34. Krejmeric J.: The investigation of energy saving possibilities while drying grains by active ventilation. *Mechanizacija ir Elektrifikacija, Mokslo-Darbai*, 23, 39-47, 1992.
35. Krejmeric J., Blazinskac V.: Drying a thick layer of barley grain by forced ventilation using ozone. *Mechanizacija ir Elektrifikacija, Mokslo-Darbai*, 21, 50-55, 1989.
36. Krejmeric J., Ziltsov B.W.: Ozonatornaja ustanowka. *Mechanizacija i Elektrifikacija Sielskawo Chozajstwa*, 3, 55-56, 1989.
37. Krysiński W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M.: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II: Statystyka matematyczna.* PWN, Warszawa, 1994.
38. Lawrence K.C., Nelson S.O., Kraszewski A.W.: Temperature dependence of the dielectric properties of wheat. *Trans. of the ASAE*, 33(2), 535-540, 1990.
39. Lityński M.: *Biologiczne podstawy nasiennictwa.* PWN, Warszawa, 1977.
40. Lykoudis P.S., Yu C.P.: The Influence of electric forces on natural thermal convection. *J. Heat and Mass Transfer*, 6, 853-862, 1963.
41. Lykow A.W.: *Teoria przewodzenia ciepła (po rosyjsku).* Państwowe Wydawnictwo Literatury Techniczno-Toretycznej. Moskwa, 1952.
42. Miketinac M.J., Sokhansanj S., Tutek Z.: Determination of heat and mass transfer coefficients in thin layer drying of grain. *Trans. ASAE*, 35(6), 1853-1858, 1992.
43. Mohsenin N.N.: *Electromagnetic radiation properties of foods and agricultural products.* Gordon and Breach Science Publishers, 1984.
44. Moon P., Spencer D.E.: *Field theory Handbook.* Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1961.
45. Moon P., Spencer D.E.: *Teoria pola.* PWN, Warszawa, 1966.
46. Morawski T., Gwarek W.: *Teoria pola elektromagnetycznego.* WNT, Warszawa, 1985.
47. Nelson S.: Dielectric properties of agricultural products, measurements and applications. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, 27(1) 845-869, 1991.
48. Nelson S.O., Lawrence K.C., Kandala C.V.K.: Comparison of RF impedance and DC conductance sensing for single-kernel moisture measurement in corn. *Trans. ASAE*, 33(2), 637-641, 1990.
49. Nelson S.O., Stetson L.E.: Frequency and moisture dependence for the dielectric constant properties of hard red winter wheat. *J. Agr. Eng. Res.*, nr 2, 1976.
50. O'Brien R.J., Shine A.J.: Some effects of an electrical field on heat transfer from a vertical plate in free convection. *J. Heat Transfer*, 2n 114-116, 1967.
51. Ozonек J.: *Laboratorium syntezy ozonu.* Wydawnictwa Uczelniane PL, Lublin, 1993.
52. Pabis S.: *Suszenie płodów rolnych.* PWRiL, 1965.
53. Pabis S., Henderson S.M.: *J.Agr.Eng. Research*, 6, 262-271, 1961.
54. Pabis S., Pabis J.: *Technologia suszenia i czyszczenia nasion,* PWRiL, 1984.

55. Pathak P.K., Agrawal Y.C., Singh B.P.N.: Thin layer drying model for rapeseed. *Trans. ASAE*, 34(6), 2505-2508, 1991.
56. Pethig R.: Dielectric properties of biological materials: biophysical and medical applications. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, 19(5), 453 - 474, 1984.
57. Pietrzyk W. (Red.): Badanie wpływu pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na właściwości elektryczne nasion. Sprawozdanie z projektu badawczego KBN nr 506169101, Lublin, 1993.
58. Pietrzyk W., Grundas S., Horyński M., Sumorek A.: Wykorzystanie pola elektrostatycznego i ozonu do obniżania energochłonności procesu suszenia ziarna zbóż. *Acta Agrophysica* 16, Inst. Agrofizyki PAN, Lublin, 1998.
59. Pietrzyk W., Horyński M., Walusiak S.: Wpływ pola elektrycznego i naprężeń mechanicznych na przenikalność dielektryczną nasion zbóż. VI Międzynarodowa Sesja Instytutu Techniki Rolniczej Akademii Rolniczej w Szczecinie, Szczecin, 1995.
60. Pietrzyk W., Sumorek A.: Rozwiązanie równania suszenia ciała stałego o strukturze warstwowej. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej "ZKwE'98", Poznań, 1998.
61. Pietrzyk W., Sumorek A.: Równanie suszenia ciała stałego o kształcie sferoidy wydłużonej. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej "ZKwE'97", Poznań, 1997.
62. Pietrzyk W.: Analiza rozkładu pola elektrycznego w dielektrycznej sferoidzie o strukturze warstwowej umieszczonej w jednorodnym polu elektrostatycznym. *Archiwum Elektrotechniki*, XXXV, 2, 583-589, 1986.
63. Pietrzyk W.: Electric field influence on grain. *Acta Agrophysica* 5, Inst. Agrofizyki PAN, Lublin 1996.
64. Pietrzyk W.: Elektrodynamiczne oddziaływanie na ziarniak jednorodnego pola elektrostatycznego. Praca habilitacyjna, AR Lublin, 1984.
65. Sadek S.E., Fax R. G., Hurwitz M.: The influence of electric fields on convective heat and mass transfer from a horizontal surface under forced convection. *Trans. ASME*, 144-148, 1972.
66. Schwartz T.: Elektrotermia. PWT, Warszawa, 1953.
67. Senftleben H.: Die Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder auf Wärmeleitvermögen von Gasen. *Phys. Zeitschr.*, 32, 550, 1931.
68. Senftleben H., Braun W.: Der Einfluss elektrischer Felder auf den Warmestrom in Gasen, *Z. Phys.*, 102, 480-556, 1936.
69. Stuetzer O.M.: Ion Drag Pressure Generation. *Journal of Applied Physics*, 30, 984, 1959.
70. Sumorek A., Pietrzyk W.: Uproszczone rozwiązanie równania suszenia kuli o strukturze warstwowej. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej "ZKwE'99", Poznań, 1999.
71. Szot B., Grundas S.: Zastosowanie zestawu pomiarowego do dokładnego określania wymiarów ziarna zbóż. *Biuletyn IHAR*, 1983.
72. Szydłowski H.: Pracownia fizyczna, PWN, Warszawa, 1980.
73. Taruszkina W.I.: Distribution of ponderomotive forces on grains during separation (in Russian). *M.i E.S.Ch.*, 12, 35-39, 1983.
74. Wert Ch.A., Thomson R.M.: Fizyka ciała stałego. PWN, Warszawa, 1974.
75. Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: Wymiana ciepła. WNT, Warszawa, 1997.
76. Wolny A.: Wpływ pola elektrycznego na suszenie powierzchni cylindrycznej. Materiały VII Sympozjum Suszarnictwa, Politechnika Łódzka, II, 241, 1991.
77. Wolny A., Kaniuk R.: Odparowanie z powierzchni płaskiej i cylindrycznej w polu elektrycznym. XV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Inżynierii Chemicznej i Procesowej, 139-144, Gdańsk, 1995.
78. Woźniak w., Grundas S.: Wpływ nawilżania ziarna pszenicy na jego wytrzymałość mechaniczną. *Biuletyn IA PAN, Nr 1, w Lublinie, Przegł. Zboż.-Młyn.*, 26-28, 1998.

8. STRESZCZENIE

WPLYW POLA ELEKTRYCZNEGO NA KONWEKCYJNE SUSZENIE ZIARNA ZBÓŻ

Suszenie konwekcyjne należy do procesów bardzo energochłonnych. Każdy czynnik, który może ograniczyć zapotrzebowanie na energię, ma duże znaczenie. Jednym z czynników mogących przyśpieszyć proces wymiany ciepła i masy w procesie suszenia konwekcyjnego wydaje się być pole elektryczne.

Praca nie jest prostym opisem zagadnienia suszenia za pomocą energii elektrycznej tj. zjawiska opierającego się na wydzielaniu ciepła bezpośrednio w suszonym materiale. Nie zamieszczono tu opisu zagadnień prostego, elektrycznego nagrzewania rezystancyjnego oraz pominięto suszenie w polu elektrycznym przemiennym z zastosowaniem pól elektromagnetycznych o częstotliwościach radiowych oraz mikrofalowych. W zakresie głównego nurtu rozważań znalazł się wpływ pola elektrostatycznego, często pomijanego ze względu na trudności z zapewnieniem bezpieczeństwa przy przemysłowym wykorzystaniu pola oraz dającego mniej spektakularne efekty niż przy wytwarzaniu ciepła przy nagrzewie rezystancyjnym czy w polu przemiennym.

Ziarno zbóż traktowane jest jako materiał dielektryczny. Dzięki temu możliwe jest rozszerzenie rozważań na inne materiały o podobnych właściwościach elektrycznych. W rozważaniach wzięto pod uwagę charakterystyczne właściwości budowy wewnętrznej i kształt suszonego materiału.

Główne zagadnienia, których dotyczy niniejsza publikacja to:

1. Wpływ sił elektrostrykcyjnych na kinetykę suszenia.
2. Weryfikacja hipotezy mówiącej, że wiatr jonowy może wspomagać proces suszenia konwekcyjnego.

Weryfikację tezy o możliwości wpływania na kinetykę wymiany masy w procesie suszenia dielektrycznych ciał stałych przeprowadzono w oparciu o eksperymentalne stanowisko laboratoryjne. Dzięki stanowisku możliwe było ingerowanie w przebieg procesu suszenia ziarna zbóż.

Z racji wykonywanych obowiązków, niekonięcznie związanych bezpośrednio z samym procesem suszenia, a często z aparaturą służącą do automatyzowania lub kontrolowania procesu, inżynierowie elektrycy już na poziomie projektowania urządzeń mają wpływ na kształtowanie ostatecznego mechanizmu działania sprzętu suszarniczego. Prezentowany w pracy sposób analizy energochłonności procesu może posłużyć do oceny efektywności projektowanego urządzenia. Zarówno

studenci wydziałów elektrycznych praktycznie stykający się z problemem suszarnictwa ziarna jak i dyplomowani inżynierowie powinni pamiętać, że straty spowodowane niewłaściwym sposobem dosuszania ziarna mogą osiągać nawet 100%. W związku z tym zagadnienie doboru odpowiedniego sposobu dosuszania wilgotnego ziarna stanowi przedmiot zainteresowań nie tylko specjalistów z dziedziny technologii zbóż.

9. SUMMARY

THE INFLUENCE OF ELECTRIC FIELD ON CONVECTIVE GRAIN DRYING PROCESS

The convection drying belongs to very energy-consuming processes. Any agent, which can limit energy consumption, has large meaning. The agent being able to accelerate heat and mass process exchange in the convection drying appears to be an electric field.

The composition is not a plain description of drying by means of electric energy i.e. a phenomena based on the heat generation inside the dried material. There is no description of a straight, resistance heating. The description of drying in an alternating electric field with the use of radiowave and microwave frequencies is neglected. The influence of the electrostatic field is in the range of the main trend of the considerations, which is often neglected because of the difficulties to provide safety at industrial utilization and giving less spectacular effects at heat generation than the heat generation carried out in the alternating electric field.

The dried grain is treated as a dielectric material. Thanks to this, it is possible to wide the considerations to some other materials of similar electric proprieties. The attention is paid on the characteristic properties of the internal structure of a dried material and its shape.

The main problems referred to in the publication are:

1. The influence of ponderomotive forces on the kinetics of drying.
2. The verification of the hypothesis stating that the ionic wind can increase convection drying process.

The verification of the hypothesis on the possibility of influence on mass exchange kinetics during drying of solids was carried out on the basis of experimental tests. Thanks to the test stand, it was possible to influence on the grain drying process.

Electric engineers have some influence on the final construction and operation of drying equipment at the stage of design which belongs to their professionals procedures not necessarily directly connected with the drying process, but also related to the administration and control of such processes.

The presented analysis of energy consumption in drying processes can serve to estimate effectiveness of designed devices. Both students of electric faculties practically adjoining with the problem of grain drying and qualified graduated engineers should remember that losses caused by improper methods of drying can reach even 100 %. The problem of selection of the adequate method of the grain drying makes the object of interest not only for specialists on grain drying technology.

Adres autora

Andrzej Sumorek
Politechnika Lubelska
Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki Ogólnej
ul. Nadbystrzycka 38 A
20-618 Lublin
Polska
tel.: (+48 081) 53 81 301
fax: (+48 081) 53 81 299 (525 46 01)
e-mail: sumek@elektron.pol.lublin.pl
www: <http://elektron.pol.lublin.pl/users/sumek/>