

EFEKT CIEPLNY MIKROFALOWEGO OGRZEWANIA BULWY ZIEMNIAKA

Tomasz Jakubowski

Katedra Techniki Rolno-Spożywczej, Uniwersytet Rolniczy
ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków
e-mail: tjakubowski@ar.krakow.pl

Streszczenie. Celem pracy było określenie ciepła jakie pochłania bulwa ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania oraz budowa liniowego modelu regresyjnego opartego na zależnościach korelacyjnych pomiędzy jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego a wielkością ciepła jakie pochłania bulwa. W badaniach wykorzystano urządzenie generujące promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości 2,45 GHz. Jako materiału do badań użyto bulw bardzo wczesnej odmiany ziemniaka Velox będących w stadium pełnej dojrzałości technicznej. W obliczeniach korzystano z I zasady termodynamiki, prawa Joule'a i drugiej zasady kalorymetrii. Wyniki badań wskazują, że między jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego i wartością ciepła dostarczoną bulwom ziemniaka w trakcie ich mikrofalowego ogrzewania zachodzi wysoka korelacja liniowa.

Słowa kluczowe: ziemniak, mikrofałe, ciepło, model

WYKAZ OZNACZEŃ

D_J – jednostkowa dawka promieniowania mikrofalowego ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$),
 c_w – ciepło właściwe bulwy ziemniaka (wartość stała = 3440) ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) za Lewickim (1999),
 m – masa bulwy ziemniaka (kg),
 Q – energia pochłonięta przez bulwę ziemniaka (kJ) (ilość ciepła dostarczonego ciału powodująca zmianę temperatury o ΔT),
 T_p – temperatura początkowa bulwy ziemniaka (K),
 T_k – temperatura końcowa bulwy ziemniaka (K),
 ΔT – różnica między T_k a T_p .

WSTĘP

Najczęściej spotykanymi metodami w obliczeniach i modelowaniu pól elektromagnetycznych wysokiej częstotliwości są metody różnic skończonych w dziedzinie

czasu (*Finite Difference Time Domain – FDTD*). Dotychczas prowadzono badania nad wpływem promieniowania mikrofalowego o częstotliwości 450-2100 MHz na tkankę zwierzęcą. Badania te dotyczyły wyznaczania współczynnika SAR (*Specific Absorption Rate*) określającego efekt termiczny powstały w wyniku ekspozycji tkanek na działanie pola elektromagnetycznego w obiekcie biologicznym (Ciosk i in. 2005), głębokości wnikania modulowanej impulsowo energii mikrofalowej do tkanki biologicznej (Kieliszek i in. 2006) oraz dokonano walidacji metody obliczania energii mikrofalowej absorbowanej przez organizm żywy (Kubacki i in. 2007).

Promieniowanie elektromagnetyczne, obok konwekcji i przewodzenia ciepła, jest jednym ze sposobów transportu energii. Ruch drgający ładunku elektrycznego w drgających cząsteczkach wywołuje promieniowanie cieplne, które może być pochłonięte przez inne ciało. W termodynamice klasycznej ciepłem określa się zmianę energii wewnętrznej układu nie powodującej wykonania pracy makroskopowej. Zgodnie z I zasadą termodynamiki w układzie zamkniętym ciepło dopływające do układu zmienia energię wewnętrzną lub powoduje wykonanie pracy przez układ. Zaznaczyć należy, że przepływ energii będący ciepłem zmienia entropię układu (termodynamiczną funkcję stanu). Mikrofałe to rodzaj promieniowania elektromagnetycznego o długości fali pomiędzy podczerwienią i falami ultrakrótkimi co odpowiada długości fali z zakresu od 1 cm do 1 m (częstotliwość odpowiednio od 30 GHz do 300 MHz). W odróżnieniu od innych rodzajów fal elektromagnetycznych promieniowanie mikrofalowe powoduje tylko rotację molekuł w zmiennym polu elektrycznym bez naruszania trwałości wiązań chemicznych w nich istniejących. Energia transportowana poprzez promieniowanie mikrofalowe jest znacznie mniejsza niż energia dysocjacji wiązania chemicznego, nawet tak słabego jak wiązanie wodorowe. Oddziaływanie promieniowania mikrofalowego z materią przebiega jednak przede wszystkim ze względu na reorientację cząstek materii obdarzonych ładunkiem bądź też będących układami biegunowymi w polu elektromagnetycznym o bardzo wysokiej częstotliwości. Promieniowanie mikrofalowe może być pochłaniane przez materię na dwa różne sposoby. Pierwszym z nich jest polaryzacja dipolowa - jeśli w materiale są obecne cząsteczki chemiczne będące dipolami, to w wyniku działania pola elektrycznego fali elektromagnetycznej starają się ustawić zgodnie z kierunkiem i zwrotem tego pola. Wektor pola elektrycznego zmienia zwrot co pół okresu fali promieniowania. Dipole zmieniają więc również ustawienie, podążając za polem. Podczas obrotów uderzają w sąsiadujące z nimi cząsteczki, przekazując im nabytą od promieniowania energię. Te przekazują ją kolejnym w ten sposób ciepło rozprzestrzenia się równomiernie w materiale. Drugi mechanizm pochłaniania promieniowania mikrofalowego opiera się na przewodnictwie jonowym – gdy w materiale znajdują się jony, zaczynają one przemieszczać się zgodnie z kierunkiem

pola elektrycznego (dodatnie w jedną, a ujemne w przeciwną stronę). Zderzając się po drodze z innymi cząsteczkami, powodują rozprzestrzenianie się energii cieplnej w materiale (Szóstka 2006, Wiśniewski 2005, Czarczyński 2003).

W pracach autorstwa Marksa i in. (2005ab), Jakubowskiego (2008ab) dotyczących wpływu promieniowania mikrofalowego o częstotliwości 2,45 GHz na rośliny ziemniaka (*Solanum tuberosum*) aby określić energię jaką pochłania bulwa w trakcie jej napromieniowania mikrofalami posługiwano się parametrami będącymi kompilacją: mocy urządzenia generującego mikrofałe (W), czasu ekspozycji materiału (s) oraz masą ogrzewanego materiału (g) (wsadu). W efekcie otrzymywano dwa parametry:

- dawkę całkowitą promieniowania mikrofalowego (kJ) (iloczyn mocy urządzenia generującego mikrofałe (W) i czasu ekspozycji (s)),
- dawkę jednostkową promieniowania mikrofalowego (D_j) ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) (iloraz dawki całkowitej promieniowania mikrofalowego (kJ) i masy bulwy ziemniaka (kg)).

Słuszność takiego postępowania bazuje na założeniu, że bulwa ziemniaka pozostająca we wnętrzu komory reaktora mikrofalowego powinna zostać równomiernie napromieniowana. Aby zapewnić równomierność napromieniowania materiału wewnątrz komory reaktora bulwa ziemniaka umieszczana była na obrotowym dnie. Wyrażanie energii jaka została pochłonięta przez bulwę w trakcie jej napromieniowania mikrofalami poprzez dawkę całkowitą i dawkę jednostkową promieniowania mikrofalowego jest o tyle wskazane, że jako metoda nieinwazyjna nie powoduje zniszczenia badanego materiału – pozwala to na poczynienie obserwacji reakcji rośliny potomnej na napromieniowanie mikrofalami. Celem nadrzędnym pracy było określenie ciepła jakie pochłania bulwa ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania poprzez bezpośredni pomiar jej temperatury. Celem kolejnym była budowa liniowego modelu regresyjnego opartego na zależnościach korelacyjnych pomiędzy jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego a wielkością ciepła jakie pochłania bulwa ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania.

ZAKRES PRACY I MATERIAŁ

Badania prowadzono w roku 2008 z wykorzystaniem urządzenia generującego promieniowanie mikrofalowe o częstotliwości 2,45 GHz. Urządzenie posiadało regulację mocy w zakresie 100-1000 W i wyposażone było w precyzyjny wyłącznik czasowy. W doświadczeniu wykorzystano bulwy bardzo wczesnej odmiany ziemniaka Velox będące w stadium pełnej dojrzałości technicznej. W doborze odmiany kierowano się wynikami badań autora (Jakubowski 2008a) wg których bulwy ziemniaka odmiany Velox, w porównaniu z odmianami Felka Bona i Rosa-

ra, uzyskała najwyższe współczynniki korelacji pomiędzy wartościami jednostkowej dawki promieniowania mikrofalowego a przyrostem temperatury. Zaznaczyć należy, że w przywołanych powyżej badaniach, przeprowadzona analiza wariancji nie wykazała statystycznie istotnego zróżnicowania między bulwami odmian ziemniaków Velox, Felka Bona i Rosara. Bulwy do badań pobrano kierując się jednorodnością ich masy (tab. 1). Materiał do badań przechowywano przez okres dwóch miesięcy w chłodni wg zaleceń Sęka i Przybył (2004).

Tabela 1. Charakterystyka bulw ziemniaka użytych w doświadczeniu

Table 1. Characteristics of potato tubers used in the experiment

Liczba bulw Number of tubers	Masa bulwy – Mass of tubers (g)			Odchylenie standardowe Standard deviation	Zmienność Variation (%)
	Średnia Medium	Minimalna Minimum	Maksymalna Maximum		
400 sztuk – pcs	43,3	27,1	69,8	8,9	20,4

Zakresem pracy objęto:

- 400 bulw ziemniaka podzielonych na 40 prób po 10 sztuk każda,
- 4 czasy napromieniowania mikrofalami: 10, 20, 30 i 60 s,
- oraz 10 wartości mocy urządzenia generującego mikrofałe: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 i 1000 W.

METODA BADAŃ

Przed rozpoczęciem doświadczenia bulwy ziemniaka wyjęto z chłodni i ustabilizowano termicznie przez okres 48 godzin w pomieszczeniu gdzie średnia temperatura wynosiła około 19°C. W losowo wybranych 10 bulwach zmierzono temperaturę początkową (T_p). Bezpośrednio przed umieszczeniem w komorze urządzenia generującego mikrofałe określono masę bulwy przy użyciu wagi laboratoryjnej o dokładności pomiaru 0,1 g. Pojedynczą bulwę ziemniaka umieszczano na obrotowym talerzu we wnętrzu szczelnej komory urządzenia generującego mikrofałe. Natychmiast po napromieniowaniu bulwy dokonywano pomiaru jej temperatury (T_k) przy użyciu termometru kontaktowego o dokładności pomiaru 0,1°C wyposażonego w sondę igłową. W celu wykonania pomiaru temperatury wnętrza bulwy dokonywano prostopadłego do podłoża nakłucia perydermy na głębokości 10 mm. Nakłucia dokonywano w trzech miejscach bulwy ziemniaka: w części pępkowej w pobliżu przyczepu stolonu, w części wierzchołkowej w pobliżu oczka wierzchołkowego i w części środkowej.

Korzystając z I zasady termodynamiki (wg której przyrost energii wewnętrznej układu jest równy sumie pracy wykonanej nad układem przez siły zewnętrzne i dostarczonego do układu ciepła) oraz wykorzystując prawo Joule'a (wyrażające zasadę zachowania energii dla przypadku, gdy energia elektryczna jest zamieniana na energię cieplną) i zgodnie z drugą zasadą kalorymetrii (gdzie ilość ciepła potrzebna do ogrzania ciała o masie m od temperatury T_p do temperatury T_k) wykorzystując poniższy wzór (nr 1) obliczono ciepło dostarczone bulwie ziemniaka (Wiśniewski 2005).

$$Q = m \cdot cw \cdot (Tk - Tp) \quad (1)$$

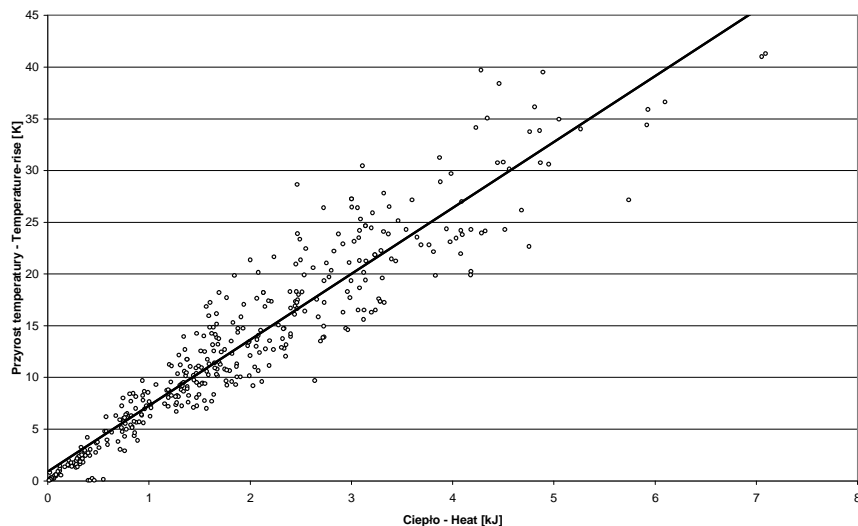
Każde ciało składa się z atomów, które znajdują się w nieustannym i chaotycznym ruchu, zwanym ruchem cieplnym (termicznym). Miarą intensywności tego ruchu jest średnia energia kinetyczna atomów, do której jest proporcjonalna temperatura bezwzględna danego ciała. Ilość ciepła przekazywana przez jedno ciało drugiemu ma więc sens energii kinetycznej ruchu cieplnego przekazywanej przez atomy jednego ciała – atomom drugiego ciała. Ogrzewanie ciała oznacza zatem zwiększenie intensywności ruchu cieplnego atomów ciała. Zaznaczyć należy, że ciepło nie jest energią lecz pracą spożytkowaną przy przekazaniu energii pomiędzy ciałami o różnej temperaturze. Analizę regresji i badanie powiązań korelacyjnych prowadzono z użyciem pakietu *STATISTICA 8.0* wg zaleceń Stanisza (2007).

WYNIKI BADAŃ

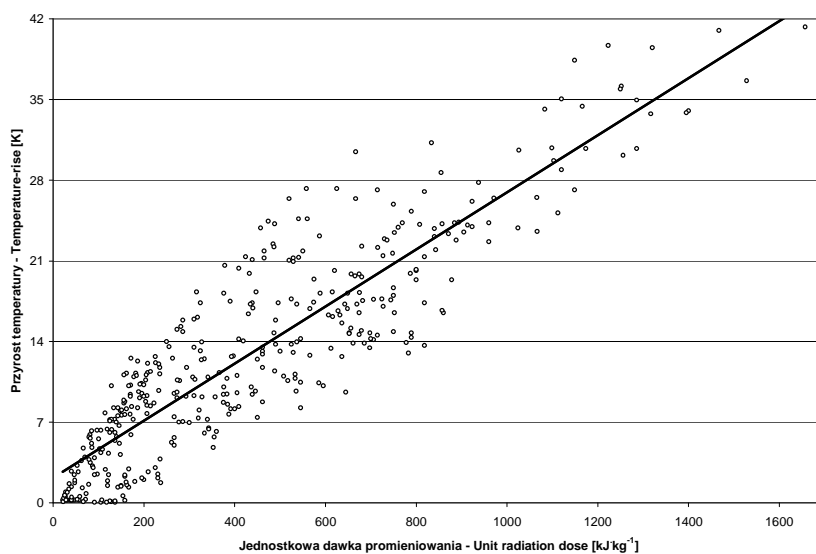
Na rysunkach 1-2 zobrazowano korelacyjne zależności pomiędzy przyrostem temperatury w ogrzewanych bulwach ziemniaków a jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego (D_j) i wartością ciepła (Q). W tabeli 2, dla każdej badanej zależności, przedstawiono liniowe równanie regresji oraz poprzez wartość współczynnika determinacji wyrażono dopasowanie równania do zmiennych rzeczywistych.

Na rysunku 3 zobrazowano powiązania między jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego (D_j) i wartością ciepła (Q) dostarczoną bulwom ziemniaka w trakcie ich mikrofalowego ogrzewania. Aby zbadać związek między powyższymi wartościami wykonano analizę regresji na podstawie której wyznaczono model opisany poniższą funkcją (2). W tabeli 3 zestawiono podsumowanie wykonanej analizy regresji. Parametry modelu szacowano metodą najmniejszych kwadratów (Stanisz 2007).

$$Q = 0,004D_j + 307,2 \quad (2)$$



Rys. 1. Zależność między ciepłem pochłoniętym przez bulwę ziemniaka a przyrostem jej temperatury
Fig. 1. Dependence between heat absorbed by potato tuber and increase of its temperature

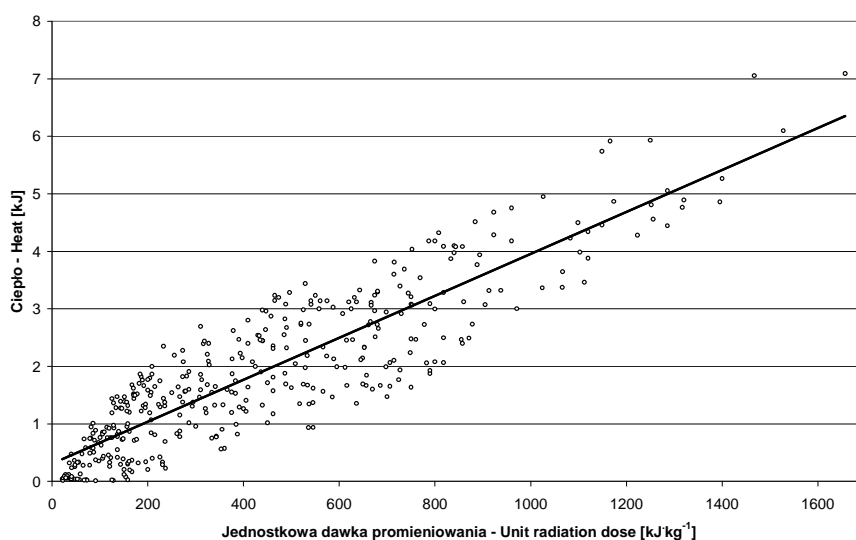


Rys. 2. Zależność między jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego a przyrostem temperatury bulwy ziemniaka
Fig. 2. Dependence between unit dose of microwave radiation and increase of potato tuber temperature

Tabela 2. Statystyczne zależności pomiędzy badanymi parametrami (*istotne dla $\alpha = 0,05$)**Table 2.** Statistical relations between the examined parameters (*significant for $\alpha = 0.05$)

Rodzaj zależności Relation type	Współczynnik korelacji Correlation coefficient	Równanie regresji Regression equation	Współczynnik determinacji Determination coefficient
$Q - \Delta T$	0,94*	$y = 0,0064x + 0,887$	0,89
$D_J - \Delta T$	0,90*	$y = 2 \cdot 10^{-05}x + 2,183$	0,81
$D_J - Q$	0,89*	$y = 0,0036x + 307,2$	0,80

Równania empiryczne ważne dla przedziału zmiennych niezależnych 0,1-41,3 (K)
Empirical equations valid for a range of independent variables 0.1-41.3 (K)

**Rys. 3.** Zależność między jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego a ciepłem pochłoniętym przez bulwę ziemniaka**Fig. 3.** Dependence between unit dose of microwave radiation and heat absorbed by potato tuber

Obliczony współczynnik determinacji wynosi 0,80 co oznacza, że zaprezentowany model liniowy wyjaśnia 80% zmienności wartości ciepła jakie otrzymuje bulwa ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania a 20% może być kwestią wpływu innych nieuwzględnionych w modelu czynników. W przypadku zaprezentowanego doświadczenia mianem „innych czynników” określić można:

- energię spożytkowaną na parowanie bulwy ziemniaka,
- energię spożytkowaną na zmianę objętości bulwy z uwzględnieniem zmian zachodzących w jej strukturach wewnętrznych,
- energię spożytkowaną na procesy chemiczne zachodzące w komórkach i strukturach komórkowych.

Tabela 3. Wyniki analizy regresji dla oszacowanego modelu
Table 3. Results of regression analysis for estimated model

	0,89 (istotny dla $\alpha = 0,05$) (significant for $\alpha = 0.05$)
Współczynnik korelacji liniowej Coefficient of linear correlation	
Współczynnik determinacji Coefficient of determination	0,80
Skorygowany współczynnik determinacji Corrected coefficient of determination	0,80
Wartość statystyki F (df=1,398) Value of F statistics (df=1.398)	1561,9
Poziom prawdopodobieństwa Probability level	0,0000
Błąd standardowy estymacji Standard error of estimation	610,43
Błąd standardowy BETA BETA standard error	0,022588

Zaznaczyć należy, że parowanie bulwy ziemniaka zachodzi w każdej temperaturze a jego intensywność wzrasta wraz z jej wzrostem. Parowanie może mieć charakter zewnętrzny, na zewnątrz bulwy ziemniaka, oraz wewnętrzny – do przestrzeni międzykomórkowych. Niewątpliwie jednak, przeważająca część energii dostarczanej bulwie ziemniaka w trakcie jej mikrofalowego ogrzewania przeznaczana jest na zmianę jej temperatury. Zdaniem Winiwarter'a (1992) i Cempela (1998)

energia to uporządkowana aktywność więc jeśli jakiś układ (procesor energii) przetwarza ją to tworzy energię ekwiwalentną. W trakcie transformacji energii wejściowej na inną jej formę w obrębie systemu występować będzie dyssypacja. Obliczony błąd standardowy estymacji oznacza, że prognoza wartości zmiennej zależnej (wartość ciepła bulwy) w oparciu o oszacowany model może być obciążona błędem 2,26%.

PODSUMOWANIE

Ciepło jest formą energii oddziaływania między układem termodynamicznym a otoczeniem. Wyniki badań wskazują, że między jednostkową dawką promieniowania mikrofalowego (D_f) i wartością ciepła (Q) dostarczoną bulwom ziemniaka w trakcie ich mikrofalowego ogrzewania zachodzi wysoka korelacja liniowa (wartości współczynnika korelacji 0,89). W przypadku prognozowania wartości ciepła bulwy (Q) dokonanej w oparciu o oszacowany model wynik może być obciążony błędem 2,26%. Reasumując stwierdzić można, że w przypadku prowadzenia prac do-

świadczalnych dotyczących napromieniowania mikrofalami bulw ziemniaka, wyrażanie efektu napromieniowania (wartości ciepła pochłoniętego przez bulwę) w dawce jednostkowej (D_J) jest prostym, nieinwazyjnym sposobem pozwalającym na ocenę tego wpływu na późniejsze procesy ontogenezy roślin potomnych.

PIŚMIENNICTWO

- Cempel C., 1993. Theory of energy transformation systems and their application in diagnostics of operating systems, *Applied Mathematics and Computer Science*, 3, 533-548.
- Ciosk K., Krawczyk A., Kubacki R., 2005. Wyznaczanie współczynnika SAR w obiekcie biologicznym przy polaryzacji pionowej pola. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12, 84-86.
- Czarczyński W., 2003. Podstawy techniki mikrofalowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 9-13.
- Jakubowski T., 2008a. Wpływ pola mikrofalowego na dynamikę zmian masy i temperatury bulwy ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza*, 6(104), 63-70.
- Jakubowski T. 2008b. Wpływ promieniowania mikrofalowego na wybrane wskaźniki oceny przechowalniczej bulw ziemniaka. *Acta Agrophysica*, 12(2), 357-366.
- Kieliszek J., Roman Kubacki R., 2006. Pulse Modulated Microwave Fields Analysis in Biological Structures. *Przegląd Elektrotechniczny*, 5, 48-49.
- Kubacki R., Sobiech J., Krawczyk A., 2007. Validation of calculation method of the microwave energy absorbed by organisms. *Przegląd Elektrotechniczny*, 7-8, 119-120
- Lewicki P. 1999. Inżynieria procesowa i aparatura w PRS. WNT. Warszawa, 327
- Marks N., Jakubowski T., 2005a. Wpływ promieniowania mikrofalowego na trwałość przechowalniczą bulw ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza*, 6(81), 57-64.
- Marks N., Lipiec J., Jakubowski T., 2005b. Ocena przydatności metod fizycznych do zwalczania przechowalniczych chorób bulw ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza*, 7 (67), 169-175
- Sęk T., Przybył J., 2004. Zbiór, obróbka i przechowalnictwo roślin okopowych. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, 90-103.
- Stanisz A., 2007. Modele liniowe i nieliniowe. Wydawnictwo StatSoft. Kraków, 21-35.
- Szóstka J., 2006. Mikrofałe. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 131-144.
- Winiwarter P., Cempel C., 1992. Life Symptoms – the Behaviour of Open Systems with Limited Energy Dissipation Capacity and Evolution, *System Research*, Vol3, No 4, 9-34.
- Wiśniewski S., 2005. Termodynamika techniczna. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 14.

THERMAL EFFECT OF POTATO TUBER MICROWAVE HEATING

Tomasz Jakubowski

Agricultural and Food Technology Section, Agricultural University
ul. Balicka 116 B, 30-149 Kraków
e-mail: tjakubowski@ar.krakow.pl

Abstract. The purpose of the work was to determine the heat absorbed by potato tuber while it is exposed to microwave heating, and to construct a linear regression model based on correlation dependencies between unit dose of microwave radiation and volume of heat absorbed by tuber. The

researcher used equipment generating microwave radiation at frequency of 2.45 GHz. Tubers of very early potato variety Velox were used as material under investigation. The tubers were at the stage of full technical maturity. The first law of thermodynamics, Joule's law and the second law of calorimetry were used in the computations. Research results indicate high linear correlation between unit dose of microwave radiation and volume of heat supplied to potato tubers during microwave heating.

Key words: potato, microwaves, heat, model