Acta Agrophysica, 1999, 24, 87-95

METODA EMISJI AKUSTYCZNEJ W BADANIU PROCESÓW PĘKANIA TKANEK ROŚLINNYCH*

K. Konstankiewicz, A. Zdunek

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego, Polska Akademia Nauk
ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

S t r e s z c z e n i e. W wyniku odkształcania tkanki roślinnej zachodzą w niej nieodwracalne procesy fizyczne, prowadzą w konsekwencji do osiągnięcia stanu wytrzymałości. Jednym z tych nieodwracalnych procesów jest niszczenie struktury komórkowej, które zachodzi poprzez pękanie błon komórkowych oraz utratę spójności w warstwie pektynowych lamelli. W wyniku tych zjawisk emitowany jest sygnał emisji akustycznej. W pracy opisano metodę emisji akustycznej i jej zastosowanie do badań procesów pękania tkanek roślinnych.

S ł o w a k l u c z o w e: metoda emisji akustycznej, pękanie

WSTĘP

Materiał roślinny jest poddawany działaniom sił zewnętrznych podczas całego procesu produkcyjnego. Działanie ciężkich maszyn rolniczych podczas wzrostu roślin, zbioru jak i przechowywania powoduje powstawanie mechanicznych uszkodzeń zewnętrznych i wewnętrznych co w konsekwencji prowadzi do ogromnych strat w produkcji roślinnej. Działanie mechanicznych czynników zewnętrznych objawia się m.in. powstawaniem mikrouszkodzeń, które są bezpośrednią przyczyną psucia się i obniżenia jakości całego zbioru. Z tych powodów od wielu lat prowadzone są intensywne badania właściwości mechanicznych materiałów roślinnych. W szczególności ważne jest określenie warunków mechanicznych powstawania mikropęknięć tkanki roślinnej głównie pod wpływem zadanego naprężenia i odkształcenia, [1,3-5,8-11].

Badanie procesów pękania tkanek roślinnych jest ściśle związane z ich właściwościami mechanicznymi, ponieważ inicjacja i propagacja pęknięcia zależy od stanu (rozkładu) naprężeń w tkance [4-6]. W badaniach właściwości mechanicznych używa się zazwyczaj maszyn wytrzymałościowych, które umożliwiają zadawanie różnych programów odkształceń. Najczęściej wynik testu uzyskuje się w postaci zależności naprężenie – odkształcenie [1,3,8,10]. Na tego typu krzywych proces pękania

*Praca finansowana przez Komitet Badań Naukowych, Nr. 5P 06F 003 10.

określa się poprzez analizę ich nachylenia. Zniszczenie mechaniczne tkanki roślinnej (ang. failure) objawia się jako nagły spadek naprężenia próbki lub osiągnięcie przez krzywą odkształcenie - naprężenie plateau. W materiałoznawstwie stan ten określany jest jako wytrzymałość materiału. Dla tkanek roślinnych przyjmuje się, że osiągnięcie stanu wytrzymałości jest skutkiem między innymi procesów pękania struktury, a ich skala jest na tyle duża by spowodować wyraźną zmianę nachylenia krzywej naprężenie - odkształcenie.

Procesy chemiczne prowadzące do psucia się tkanki roślinnej (np. zjawisko ciemnej plamistości) są najczęściej skutkiem przerwania półprzepuszczalnej błony plazmatycznej i reakcji enzymów wewnątrzkomórkowych z tlenem [2,13]. Dlatego bardzo ważne jest poznanie warunków mechanicznych powstawania pęknięć błon komórkowych w jak najwcześniejszej fazie deformacji. Pęknięcia w tej skali mają niewielki wpływ na wartość naprężenia całej próbki i nie mogą być zarejestrowane przy pomocy klasycznych maszyn wytrzymałościowych.

Celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie metody emisji akustycznej, która może być stosowana do wykrywania i charakteryzowania pęknięć różnego typu materiałów, między innymi pod wpływem sił zewnętrznych. Zaprezentowana zostanie metodyka i aparatura do rejestracji sygnału emisji akustycznej emitowanego przez tkankę roślinną w wyniku jej odkształcania.

METODA EMISJI AKUSTYCZNEJ

Terminem emisja akustyczna (w skrócie EA) określa się zjawisko tworzenia i propagacji fal sprężystych w wyniku nagłego uwolnienia zmagazynowanej energii w pewnym punkcie badanego ośrodka. Natomiast źródłem sygnału emisji akustycznej określa się miejsce lub element strukturalny emitujący sygnał EA.

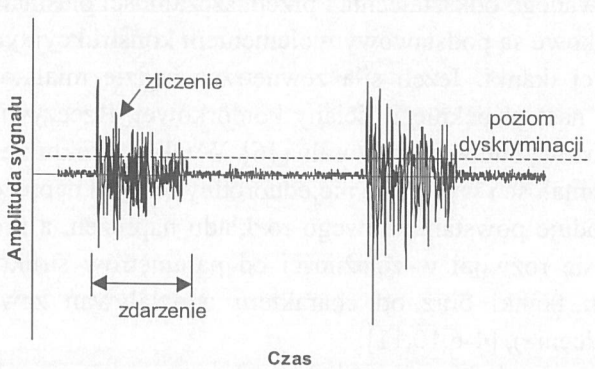
Fale sprężyste nazywane sygnałem emisji akustycznej propagują w materiale i mogą być zarejestrowane na jego brzegach przez specjalne czujniki. Częstotliwość sygnału emisji akustycznej zależy od charakteru źródła i może mieć zakres od kilku Hz do 1 MHz. Tak szeroki zakres częstotliwości i niewielka amplituda sygnału emisji akustycznej narzuca ogromne wymagania urządzeniom do rejestracji sygnału EA [7]. W celu poprawnego rejestrowania sygnału EA należy dobrać odpowiednie czujniki do charakteru źródła sygnału emisji akustycznej. Należy również zapewnić odpowiedni kontakt czujnika z badanym materiałem. Bardzo duże znaczenie na rejestrowany sygnał ma aparatura wzmacniająca i zapisująca. Musi się ona charakteryzować odpowiednią czułością w pełnym zakresie częstotliwości i jednocześnie nie może wprowadzać własnych szumów do rejestrowanego sygnału. W czasie pomiarów sygnału emisji akustycznej należy również zadbać o to by wyeliminować szumy pochodzące z otoczenia.

W torze pomiarowym sygnału emisji akustycznej powinny znajdować się kolejno następujące elementy: czujnik EA, przedwzmacniacz, filtr górno-przepustowy, wzmacniacz oraz system rejestrujący. Po wyjściu z czujnika elektryczny sygnał EA jest

wstępnie wzmacniany przez przedwzmacniacz i filtrowany z częstości zakłócających pomiar. Przedwzmacniacz powinien być umieszczony w odległości nie mniejszej niż 40 cm z powodu niskiej amplitudy sygnału elektrycznego. Dalej sygnał emisji akustycznej zostaje ponownie wzmacniany (wzmacniacz o regulowanym wzmocnieniu). W dalszej części sygnał EA jest najczęściej analizowany w dwóch niezależnych torach pomiarowych.

W jednym z nich, sygnał napięciowy po wzmocnieniu jest rejestrowany z wysoką częstotliwością w postaci zależności amplituda – czas. Celem tego typu analizy jest określenie charakterystyki źródła sygnału EA. Analiza sygnału EA w postaci zależności amplituda-czas wymaga wiedzy na temat rozchodzenia się fali w badanym ośrodku, funkcji przejścia materiał – czujnik oraz funkcji zniekształcenia samego urządzenia pomiarowego. Zagadnienia te najczęściej są bardzo trudne do poznania co ogranicza stosowalność tego typu analizy [7,12].

Drugim sposobem analizy sygnału EA jest wykorzystanie metody opartej na przekształceniu sygnału czasowego do postaci tzw. deskryptorów. Celem uzyskania informacji o źródle sygnału EA wybiera się pewne jego charakterystyczne parametry i bada się ich zależności od czasu i czynników zewnętrznych. Parametry te zapisywane są w przedziałach czasowych. Jeżeli dla amplitudy otrzymywanego sygnału ustalimy pewien próg, nazywany poziomem dyskryminacji, wówczas każde przejście amplitudy ponad ten poziom jest rejestrowane jako zliczenie. Grupy sygnału AE o charakterze tłumionej sinusoidy nazywane są zdarzeniem (Rys. 1). Te dwa deskryptory: liczba zliczeń i liczba zdarzeń zapisywane w określonych przedziałach czasowych (bramkach czasowych) są nazywane tempem zliczeń i tempem zdarzeń. Oprócz tych dwóch wymienionych parametrów stosuje się również inne oparte na przekształceniu zależności czasowych lub widmowych sygnału EA. Szczegółowe definicje i opis deskryptorów sygnału EA można znaleźć w pracach [7,12].



Rys. 1. Sposób uzyskiwania deskryptorów (zliczenia i zdarzenia) sygnału emisji akustycznej.
Fig. 1. The determination of acoustic emission descriptors (counts and events).

Bardzo użytecznym sposobem analizy sygnału emisji akustycznej jest przedstawienie powyższych parametrów w postaci zsumowanej (suma zliczeń, suma zdarzeń) i przedstawienie ich w postaci zależności aktualnej sumy zliczeń (lub sumy zdarzeń) od wybranego parametru zewnętrznego, np. odkształcenia, naprężenia, temperatury. Analiza tego typu zależności daje informację o procesach zachodzących w źródłach sygnału EA badanych struktur.

Źródła sygnału EA w tkankach roślinnych

Źródłem sygnału emisji akustycznej w tkance roślinnej są zmiany jej struktury wywołane działaniem sił zewnętrznych [4,9-11].

W ogólności tkanka roślinna składa się z trzech podstawowych komponentów: a) komórki parenchymy o cienkich ścianach i wypełnione cieczą wewnątrzkomórkową, b) międzykomórkowe pektynowe lamelle (blaszki środkowe), które są elementem łączącym komórki między sobą, c) międzykomórkowe przestwory (przestrzenie międzykomórkowe), które zawierać mogą ciecz lub gaz.

Każda komórka roślinna składa się ze ścian komórkowych otaczających cytoplasmę, jądro oraz vacuole, która zawiera około 90% płynów komórkowych. Cytoplasma otoczona jest półprzepuszczalną błoną nazywaną plasmalemmą. Komórki roślinne mają kształt wielościanów, który jest wynikiem istnienia wewnątrz komórki ciśnienia nazywanego turgorem.

Kiedy tkanka roślinna jest ściskana, każda jej komórka przejmuje część zewnętrznego obciążenia. Mogą zachodzić wówczas następujące procesy [9]:

1. Komórki zmieniają swój kształt.
2. Naprężenie ścian komórkowych wzrasta z powodu wzrostu stosunku powierzchni ścian komórkowych do jej objętości.
3. Wzrasta turgor komórek.
4. Wypływanie poza komórkę płynów wewnątrzkomórkowych z prędkością zależną od prędkości zadawanego odkształcenia i przepuszczalności plasmalemmy.

Ściany komórkowe są podstawowym elementem konstrukcyjnym i odpowiadają za wytrzymałość całej tkanki. Jeżeli siła zewnętrzna będzie miała wystarczająco dużą wartość wówczas nastąpi pęknięcie ściany komórkowej. Rzeczywista tkanka roślinna posiada bardzo złożoną budowę strukturalną [6]. W takiej strukturze ściany komórkowe mają różną wytrzymałość i występuje niejednorodny rozkład naprężeń. Przyłożenie siły zewnętrznej powoduje powstanie nowego rozkładu naprężeń, a proces pękania takiej struktury będzie się rozwijał w zależności od parametrów strukturalnych badanego materiału, turgoru tkanki oraz od charakteru oddziaływań zewnętrznych (np. od prędkości odkształcenia), [4-6,10,11].

Komórki roślinne połączone są między sobą przy pomocy pektynowych lamelli. Elementy te mają plastyczną naturę i pozwalają komórkom na zmianę orientacji oraz ich wzajemnej pozycji podczas pękania ścian komórkowych [10]. Na zmianę orientacji i pozycji komórek silny wpływ ma obecność przestrzeni międzykomórkowych.

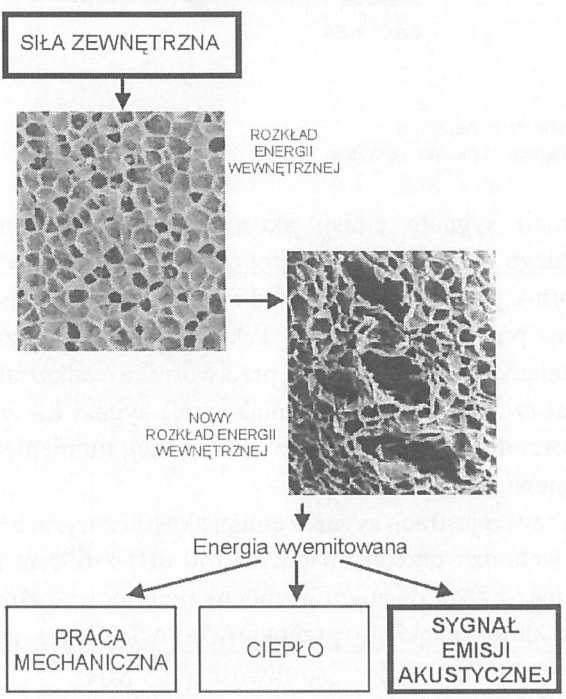
Przestrzenie międzykomórkowe mogą być wypełnione cieczą lub gazem, jednak ich rola i wpływ na właściwości reologiczne nie jest jeszcze do końca poznana.

Powyższe informacje skłaniają do stwierdzenia, że podczas odkształcania tkanki mogą także zachodzić procesy związane z: i) pękaniem ścian komórkowych w wyniku działania sił rozciągających; b) pękaniem międzykomórkowym.

Metoda emisji akustycznej w tkankach roślinnych

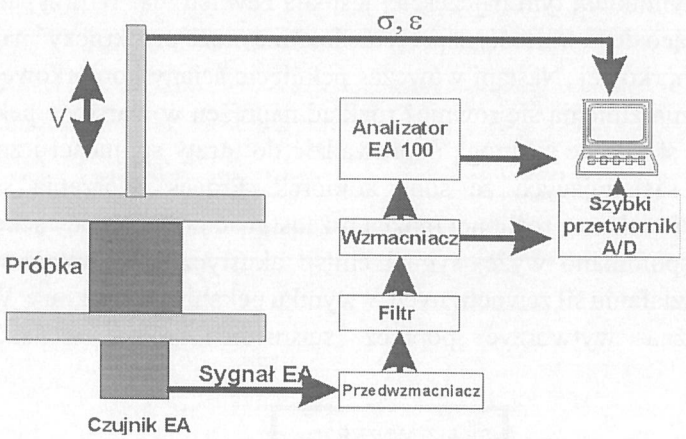
W nie zdeformowanej tkance roślinnej występuje wstępny i niejednorodny rozkład naprężeń. Jeżeli na tkankę zadziała czynnik zewnętrzny wówczas rozkład naprężeń się zmieni. Czynnikiem tym najczęściej jest siła zewnętrzna. W przypadku, gdy siła ta ma wystarczająco dużą wartość, naprężenie lokalne może przekroczyć naprężenie krytyczne ściany komórkowej. Nastąpi wówczas pęknięcie ściany komórkowej. Podczas procesu odkształcania zmienia się również rozkład naprężeń w warstwie pektynowych lamelli. Działające składowe sił mogą doprowadzić do utraty spójności i zmianę wzajemnego położenia sąsiadujących ze sobą komórek. Proces tworzenia się sygnału emisji akustycznej w tkance roślinnej można przedstawić przy pomocy schematu na Rys. 2.

Jak wspomniano wyżej sygnał emisji akustycznej powstaje w tkance roślinnej poddanej działaniu sił zewnętrznych w wyniku pękania jej struktury. W praktyce warunki takie można wytworzyć poprzez ściśnięcie próbki w szczękach maszyny



Rys. 2. Schemat powstawania sygnału emisji akustycznej w tkance roślinnej.
Fig. 2. The scheme of acoustic emission signal creation in plant tissue.

wytrzymałościowej. Schemat aparatury używanej w badaniach procesów pękania tkanek roślinnych przedstawiono na Rys. 3. Do badań właściwości mechanicznych i wymuszania procesów pękania tkanek roślinnych zastosowano nowoczesną, jednokolumnową maszynę wytrzymałościową Lloyd LRX. Urządzenie to pozwala na wykonywanie testów ściskania z wybraną prędkością od 0,1 mm/min do 1000 mm/min. Wykonane testy wykazały, że w całym zakresie prędkości odkształcania zastosowana maszyna wytrzymałościowa nie powoduje zakłóceń rejestrowanego sygnału EA powstającego w ściskanym materiale.

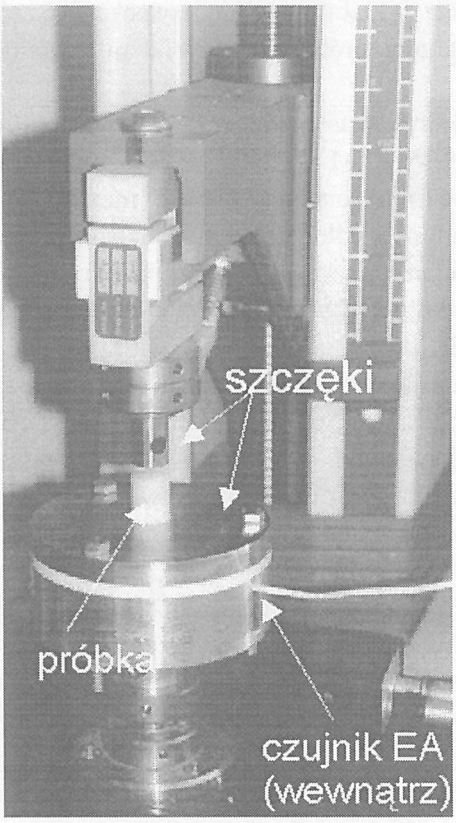


Rys. 3. Schemat aparatury pomiarowej.
Fig. 3. The block diagram of measuring system.

Do rejestracji sygnału emisji akustycznej użyto szerokopasmowego czujnika piezoelektrycznego typu WD o wysokiej czułości w zakresie częstości od 25 kHz do 1 MHz. Przetwornik przymocowany był do dolnej szczęki maszyny wytrzymałościowej dokładnie w osi próbki (Rys. 3 i 4). Takie mocowanie pozwala na wyeliminowanie szumów powstających w wyniku tarcia przetwornika o odkształcany materiał. Na granicy próbka-materiał szczęki (tkanka ziemniaka-stal) sygnał EA przechodzi od materiału o mniejszej gęstości do materiału o gęstości większej, tłumienie i zniekształcenie sygnału jest wówczas niewielkie.

W celu analizy i rejestracji sygnału emisji akustycznej zastosowano zestaw EA 100, w skład którego wchodzi: przedwzmacniacz (40 dB) z filtrem górno-przepustowym (25 kHz), wzmacniacz z regulowanym wzmocnieniem oraz analizator EA 100. Zestaw jest uzupełniony o kartę szybkiego przetwornika A/D, która umożliwia rejestrację 250 μs-owych próbek czasowych z częstotliwością 2,5 MHz.

Konfiguracja aparatury zaprezentowanej na Rys. 3 umożliwia jednoczesną rejestrację następujących wielkości fizycznych: odkształcenie próbki lub jej naprężenie, liczba

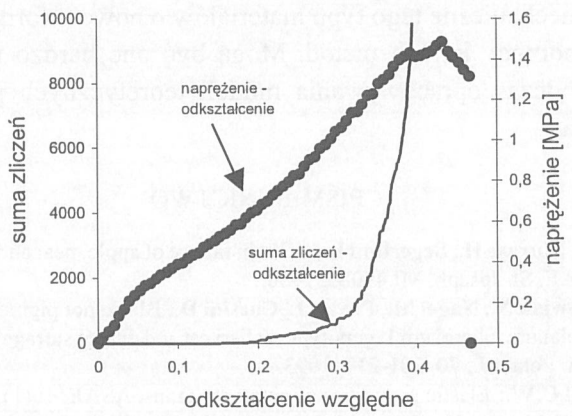


Rys. 4. Umiejscowienie próbki i czujnika EA.
Fig. 4. The placing of the sample and the EA transducer.

zliczeń, liczba zdarzeń, wartość skuteczna sygnału EA, wartość szczytowa sygnału EA oraz 140 próbek czasowych sygnału EA z częstotliwością 2,5 MHz.

Pomiary sygnału EA w tkankach roślinnych

Metoda emisji akustycznej i aparatura zaprezentowana w niniejszej pracy pozwala na prowadzenie badań nad wpływem różnych czynników na procesy pękania tkanek roślinnych. Szczególnie użyteczna jest analiza zależności parametrów sygnału EA od wybranego parametru mechanicznego (Rys. 5). Tego typu zależności pozwalają określić warunki mechaniczne powodujące rozpoczęcie procesu pękania badanego materiału roślinnego. Umożliwiają również ocenę skali procesów pękania poprzez obserwację nachylenia uzyskiwanej krzywej np. suma zliczeń – odkształcenie. Odkształcane walcowej próbki tkanki bulwy ziemniaka o wymiarach 5 mm X 10 mm (wysokość X średnica) z prędkością 20 mm/min wykazały, że zliczenia sygnału EA można zarejestrować przy stosunkowo małych wartościach odkształcenia i naprężenia próbki w porównaniu ze stanem



Rys. 5. Charakterystyki uzyskane przy użyciu metody emisji akustycznej.
Fig. 5. The characteristics obtained by acoustic emission method.

wytrzymałości próbki (Rys. 5). Badania te potwierdzają hipotezę, że procesy pękania tkanki roślinnej zachodzą stopniowo, a stan wytrzymałości próbki jest wynikiem powolnej propagacji pęknięć.

W celu sprawdzenia przydatności metody emisji akustycznej w badaniu procesów pękania tkanek roślinnych wykonano szereg testów. Miały one na celu udzielenie odpowiedzi na pytanie czy warunki mechaniczne (określone przy pomocy metody EA), które powodują pękanie tkanki roślinnej zmieniają się według przewidywań istniejących modeli mechanicznych tkanek roślinnych. Badania wykazały, że zmiana ciśnienia wewnątrzkomórkowego tkanki roślinnej wywołuje zmiany w warunkach mechanicznych powodujących rozpoczęcie rejestracji sygnału EA [14]. Otrzymane wyniki są zgodne z modelem zaproponowanym przez Pitt'a [10,11]. Wykonano również badania mające na celu sprawdzenie, czy sygnał emisji akustycznej zależy od typu badanej tkanki [6]. Eksperyment pokazał, że zależność suma zliczeń sygnału EA – unormowane naprężenie są różne dla tkanek rdzenia zewnętrznego i rdzenia wewnętrznego bulwy ziemniaka. Wyniki te wskazują na to, że istnieć może zależność pomiędzy budową tkanki roślinnej a procesami jej pękania.

Szczegółowy opis procesów pękania tkanek roślinnych wymaga uzupełnienia badań przy pomocy metody emisji akustycznej o badania mikroskopowe. Jednak badanie tego typu zjawisk metodami mikroskopowymi jest niezmiernie trudne ze względu na: trudności ze zlokalizowaniem źródła sygnału EA, zamykanie się pęknięć po ustąpieniu przyłożonej siły, stochastyczny charakter procesów pękania, brak teoretycznych wskazówek lokalizacji pęknięć (brak mechaniki pękania struktur takich jak tkanki roślinne).

WNIOSKI

Wyniki badań przeprowadzonych przy użyciu metody emisji akustycznej świadczą o jej dużej przydatności w badaniu procesów pękania tkanek roślinnych. Uzupełniają charakterystyki mechaniczne tego typu materiałów o nowe informacje bardzo trudne do uzyskania przy pomocy innych metod. Mogą być one bardzo użyteczne w praktyce rolniczej oraz podczas opracowywania modeli teoretycznych procesów odkształceń tkanek roślinnych.

PIŚMIENNICTWO

1. **Dal Fabbro I.M., Murase H., Segerlind L.J.:** Strain failure of apple, pear and potato tissue. ASAE Paper No. 80-3048. ASAE, St. Joseph, MI 49085, 1980.
2. **Dean B.B., Jackowiak N., Nagel M., Pavek J., Corsini D.:** Blackspot pigment development of resistant and susceptible Solanum tuberosum 1. genotypes at harvest and during storage measured by three methods of evaluation. Am. Potato J., 70, 201-217, 1993.
3. **Finney E.E., Hall C.W.:** Elastic properties of potatoes. Trans. ASAE, 10(1), 4-8, 1967.
4. **Haman J., Konstankiewicz K.:** Destruction processes in the cellular medium of plant, 1. Damage of the liquid filled cellular body theoretical approach, Int. Agrophysics, 14, 2000, (in press).

5. **Haman J., Konstankiewicz K.:** Procesy zniszczenia w komórkowym ośrodku roślinnym. Acta Agrophysica, 24, 67-86, 1999.
6. **Haman J., Konstankiewicz K., Zdunek A.:** Badanie procesów pękania tkanek rdzenia wewnętrznego i zewnętrzneo bulwy ziemniaka.. Acta Agrophysica, 24, 97-107, 1999.
7. **Malecki I., Ranachowski J.:** Acoustic Emission, Sources, Methods, Applications (in Polish). Biuro PASCAL, Warsaw, 1994.
8. **Mc Laughlin N.B., Pitt R.E.:** Failure characteristic of apple tissue under cyclic loading. Trans. ASAE, 27(1), 311-319, 1984.
9. **Nilson S.B., Hertz C.H., Falk S.:** On the relation between turgor pressure and tissue rigidity II. Physiologia Plantarum, 11, 818-837, 1958.
10. **Pitt R.E., Chen H.L.:** Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue. Trans. ASAE, 26(4), 1275-1280, 1983.
11. **Pitt R.E.:** Models for the rheology and statistical strength of uniform stressed vegetative tissue. Trans. ASAE, 25(6), 1776-1784, 1982.
12. **Ranachowski Z.:** Methods of the Measurement and Analysis of the Acoustic Emission Signal (in Polish). IFTR Reports, 1/1997, IFTR, Warsaw, 1997.
13. **Reeve R.M.:** Preliminary histological observations of internal blackspot in potatoes. Am. Potato J., 45, 157-167, 1968.
14. **Zdunek A.:** Określanie warunków mechanicznych powodujących pękanie tkanek roślinnych przy użyciu metody pasywnej emisji akustycznej. Wydawnictwa Naukowe FRNA, 2, 161-164, 1999.

THE METHOD OF ACOUSTIC EMISSION IN INVESTIGATION OF CRACKING PROCESSES OF PLANT TISSUES

K. Konstankiewicz, A. Zdunek

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences
Doświadczalna 4, P.O. Box 201, 20-290 Lublin 27

SUMMARY

Irreversible processes occur in plant tissue as a result of deformation. The consequence of these processes is reaching of the sample strength. One of the irreversible processes is cracking of the cellular structure. The cracking processes occur through cracking cell walls and shearing in pectin lamelles. The acoustic emission signal is emitted as a result of these processes. In the presented paper is described the method of acoustic emission and their application to plant tissue cracking investigations.

K e y w o r d s: The method of acoustic emission, cracking