

DEFEKTOSKOPIA RENTGENOWSKA I JEJ WYKORZYSTANIE W BADANIACH AGROFIZYCZNYCH

W. Woźniak

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: wanda@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W pracy krótko przedstawiono historię odkrycia i zastosowania promieni X. Omówiono zjawiska spowodowane promieniami X, ich oddziaływanie z materią, zastosowanie w medycynie, technice i w badaniach materiałów roślinnych. Przedstawiono perspektywy rozwoju rentgenografii i nowe rozwiązania aparaturowe.

Słowa kluczowe: rentgenografia, odkrycie, wykorzystanie, agrofizyka.

"Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923) - Fizyk niemiecki, profesor uniwersytetu w Strasburgu, Giessen, Würzburgu i Monachium. Badając promienie katodowe przy przechodzeniu przez różne ciała, odkrył i zbadał nowy rodzaj promieni, które nazwał promieniami X. Wskazał sposób ich wykorzystania w medycynie i skonstruował pierwszą lampę rentgenowską. W 1901 roku jako pierwszy otrzymał nagrodę Nobla z dziedziny fizyki."

(Ilustrowana Encyklopedia dla Wszystkich – Fizyka)

Odkrycie

Pierwsza publikacja Roentgena o nowym odkryciu - rok 1895 - zaczyna się następująco [26] :

"Gdy wyładowanie dużej cewki indukcyjnej odbywa się w próżniowej rurze do wyładowań, osłoniętej czarną tekturą, można zauważyć w zaciemnionym pokoju fluorescencję ekranu papierowego, pokrytego platyno-cyjankiem baru – niezależ-

nie od tego, którą stroną ekran jest zwrócony do rury. Fluorescencję widać nawet z odległości dwóch metrów".

Roentgen wykazał, że promieniowanie nowego rodzaju o nieznanym dotychczas zdolności przenikania wydobywa się ze szkła lub ciężkiego metalu, gdy kieruje się na te materiały promienie katodowe, tj. swobodne elektrony o dużej energii kinetycznej. Promieniowanie to, zwane początkowo promieniowaniem X, zaczęto badać na świecie, już w niecały miesiąc po ogłoszeniu pierwszej publikacji Roentgena.

Zjawiska spowodowane promieniami Roentgena

Promieniowanie rentgenowskie wywołuje cały szereg procesów i zjawisk, z których najważniejsze to [36]:

Zjawisko luminescencji. Promieniowanie rentgenowskie wywołuje świecenie niektórych związków, np. cyjanopłytynianu baru, wolframanu wapnia, krzemianu cynku czy siarczku cynku z domieszkami srebra lub miedzi.

Działanie fotochemiczne. Promienie rentgenowskie, podobnie jak światło, wywołują zaczernienie kliszy fotograficznej.

Działanie jonizujące. Pod wpływem promieniowania rentgenowskiego wzrasta przewodnictwo elektryczne niektórych substancji. Jest to efekt szczególnie łatwo zauważalny w gazach.

Działanie chemiczne. Promieniowanie rentgenowskie wywoływać może reakcje chemiczne, np. pod jego wpływem w wodzie powstaje nadtlenek wodoru.

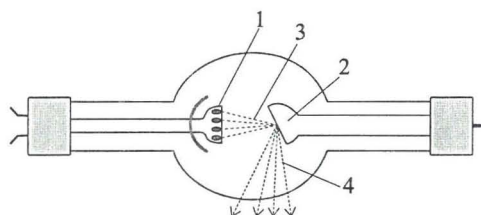
Działanie biologiczne. Pod wpływem napromieniowania w żywych komórkach zachodzą zmiany morfologiczne i funkcjonalne.

Wzbudzenie i jonizacja atomów są pierwotnymi efektami oddziaływania promieni rentgenowskich z materią (można to dostrzec w przypadku jonizacji), wszystkie zaś pozostałe wymienione zjawiska zachodzą w ich następstwie. Są więc zjawiskami towarzyszącymi (wtórnymi).

Cechą charakterystyczną wszystkich wymienionych zjawisk są przemiany, jakim ulega energia promieni rentgenowskich. Zmienia ona w czasie zjawiska swoją postać, przechodząc z energii promieniowania w inne rodzaje energii - chemiczną, wzbudzenia i inne.

Widmo emisyjne lamp rentgenowskich

Najpowszechniej stosowanym źródłem promieniowania X jest lampa rentgenowska. Jest to lampa próżniowa z żarzoną katodą (Rys. 1), w której anoda wykonana jest z metalu o wysokiej liczbie atomowej, najczęściej z wolframu.



Rys. 1. Schemat lampy rentgenowskiej; 1 – rozżarzona katoda, 2 – anoda, 3 – promienie katodowe, 4 – promienie rentgenowskie.

Fig. 1. Roentgen lamp scheme; 1 – heated cathode, 2 – anode, 3 – cathode rays, 4 – X-ray.

Rozżarzona katoda emituje elektrony przyspieszane następnie pod wpływem wysokiego napięcia, zwykle około $10^4 - 10^5$ V, przyłożonego między anodą i katodą. Elektrony uderzają w anodę (antykatodę) i zostają gwałtownie zahamowane na skutek oddziaływania z atomami anody, a ich utracona energia kinetyczna przekształca się w promieniowanie. Tę część widma promieniowania rentgenowskiego, która powstaje na skutek hamowania elektronów w materiale anody, nazywa się *promieniowaniem hamowania*.

Nagła zmiana prędkości elektronu z v na v' powoduje emisję fotonu o energii $h\nu$ spełniającej prawo zachowania energii:

$$h\nu = 1/2mv^2 - 1/2mv'^2 \quad (1)$$

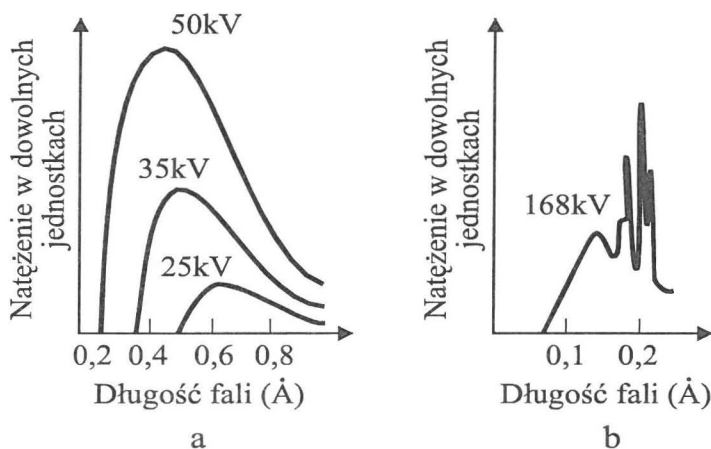
Częstotliwość emitowanego fotonu jest tym większa, im silniej hamowany jest elektron. Przy dużej liczbie elektronów padających na anodę występują wszystkie końcowe prędkości v' hamowania elektronów i dlatego widmo promieniowania hamowania jest widmem ciągłym (Rys. 2a). Maksymalna możliwa częstotliwość ν promieniowania hamowania występuje dla $v' = 0$ i określona jest maksymalną energią kinetyczną padających elektronów, ta zaś określona jest przez wartość napięcia U pomiędzy katodą i anodą:

$$h\nu_{max} = 1/2mv^2 = eU \quad (2)$$

Ciągłe widmo promieniowania hamowania ma więc ściśle określoną krótko-falową granicę, której wartość zależy od napięcia U przyłożonego do lampy rentgenowskiej.

Jeżeli przyłożone napięcie przyspieszające jest dostatecznie wysokie, rozprędzone w lampie elektrony zderzając się z anodą powodują również wzbudzenie atomów. Powrotowi atomów do stanu podstawowego towarzyszy emisja promieniowania elektromagnetycznego o ściśle określonych energiach, zgodnych z układem poziomów energetycznych atomów anody. Tę część widma rentgenowskiego nazywa się *widmem liniowym* lub *charakterystycznym*.

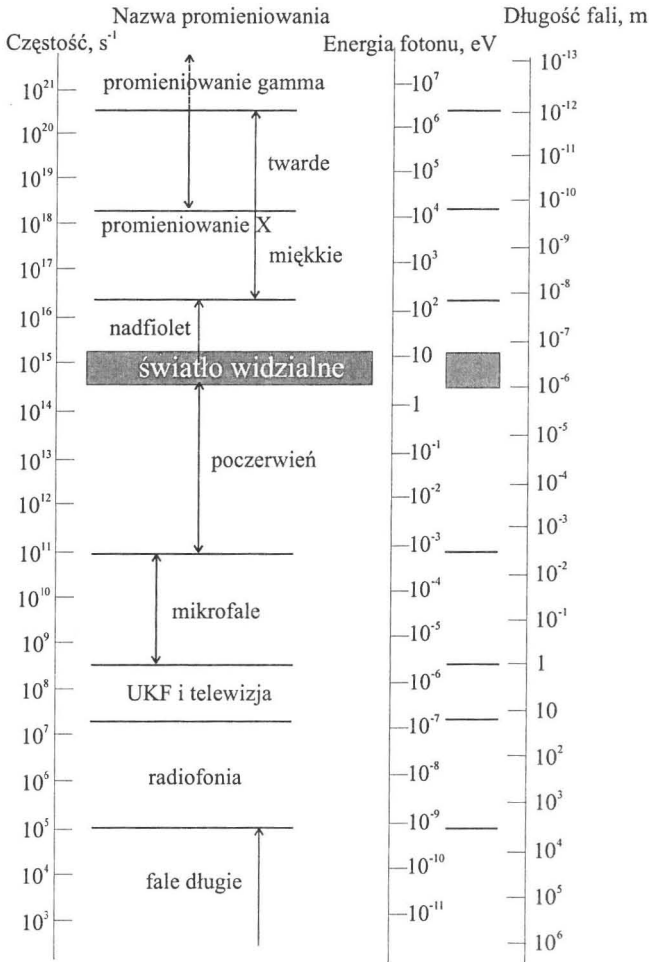
Widmo promieniowania lampy rentgenowskiej składa się więc w rzeczywistości z dwu części: przy mniejszych napięciach przyspieszających występuje tylko *widmo ciągłe* (Rys. 2a), a przy większych nakłada się na nie *widmo liniowe* (Rys. 2b).



Rys. 2. Rozkład widmowy emitowanej energii promieniowania w zależności od długości fali dla anody wolframowej [36].

Fig. 2. Spectral analysis of the emitted radiation energy depending on the length of wave for a wolfram anode [36].

Długości fal promieniowania rentgenowskiego są o kilka rzędów wielkości mniejsze niż dla światła widzialnego (10 nm - 0,001 nm), częstości zaś i energie - odpowiednio większe (Rys. 3). Promieniowanie o małej długości i dużej przenikliwości nosi nazwę *twardego*, zaś o większej długości fali i mniejszej przenikliwości - promieniowania *miękkiego* [31].



Rys. 3. Widmo promieniowania elektromagnetycznego [31].
 Fig. 3. The spectrum of electromagnetic radiation [31].

Oddziaływanie promieniowania rentgenowskiego z materia

Wiązka promieni rentgenowskich przechodząca przez ośrodek materialny ulega osłabieniu. Zmniejszenie natężenia wiązki I po przejściu drogi x zachodzi zgodnie z prawem Bouguera-Lamberta:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{3}$$

gdzie: I_0 - natężenie wiązki promieniowania padającego (dla $x = 0$).

Wielkość μ ma wymiar m^{-1} i jest nazywana *liniowym współczynnikiem osłabienia*. Współczynnik osłabienia zależy od własności substancji pochłaniającej oraz od długości fali promieniowania i równy jest sumie współczynników pochłaniania τ i rozpraszania δ :

$$\mu = \tau + \delta \quad (4)$$

Współczynnik pochłaniania τ silnie zależy od liczby atomowej Z substancji pochłaniającej oraz od długości fali λ promieniowania rentgenowskiego. Po przeprowadzeniu odpowiednich przekształceń i analizie widm absorpcyjnych promieniowania rentgenowskiego, τ można wyrazić zależnością:

$$\tau = c \lambda^3 Z^4 \quad (5)$$

gdzie c - wielkość stała.

Współczynnik pochłaniania rośnie w przybliżeniu proporcjonalnie do trzeciej potęgi długości fali i czwartej potęgi liczby atomowej. Oznacza to, że im bardziej miękkie promieniowanie, tym silniej jest pochłaniane przez materię oraz, że pierwiastki o wyższej liczbie atomowej są lepszymi absorbentami. Równanie (5) jest więc bardzo ważne z praktycznego punktu widzenia.

Zastosowanie w medycynie i technice

Zastosowania promieni Roentgena w medycynie znane są powszechnie. Tkanki miękkie słabiej pochłaniają promieniowanie rentgenowskie dlatego, że zawierają przede wszystkim pierwiastki lekkie, o małym Z , kości zaś pochłaniają je silniej dzięki większej zawartości pierwiastków o wysokich liczbach atomowych. Jeżeli zdolność absorpcyjna badanego obiektu różni się tylko w nieznanym stopniu od zdolności absorpcyjnej otaczającego ośrodka wywołuje się wtedy sztuczny kontrast stosując tzw. środki cieniujące. Napięcia od 50 kV do 100 kV wystarczają do uzyskania promieni dostatecznie twardych do celów diagnostycznych. Promienie te uwidaczniają kości i metale.

Promienie X stosuje się również w terapii rentgenowskiej. Terapia rentgenowska możliwa jest dzięki temu, że chora tkanka, np. nowotworowa, jest bardziej wrażliwa na zniszczenie niż otaczająca ją tkanka zdrowa. Aby zniszczyć głęboko umiejscowiony nowotwór, przy minimalnym uszkodzeniu warstwy otaczającej, stosuje się bardzo twarde promienie Roentgena, otrzymane przy napięciach od 200 kV do 1000 kV, a nawet większych.

Wykorzystując dyfrakcję promieni Roentgena można badać strukturę złożonych cząsteczek organicznych, albowiem wykazują one uporządkowanie przypominające sieć krystaliczną. W ten sposób wyznaczono odległości między atomami w cząsteczkach organicznych związków chemicznych. Promieni Roentgena używa się do analizy chemicznej, szczególnie do wykrywania niewielkich zanieczyszczeń. Widma rentgenowskie stanowią kryterium rozstrzygające o odkryciu nieznanych dotychczas pierwiastków. Pozwalają odróżnić pierwiastki, których analiza chemiczna jest utrudniona, np. pierwiastki ziem rzadkich.

Obserwacje przeprowadzone przy użyciu raket pozwoliły na odkrycie kilku silnie promieniujących gwiazd rentgenowskich, tj. lokalnych źródeł, które emitują promienie Roentgena o dużym natężeniu, lecz nie wysyłają światła widzialnego, ani fal radiowych.

Innym ważnym zastosowaniem promieni Roentgena jest tzw. **defektoskopia rentgenowska**. Prześwietlanie bloków metalowych pozwala na kontrolę odlewów - wykrywa wady w postaci pęcherzyków powietrza, pęknięć wewnętrznych itp.

Zastosowanie w badaniach materiałów roślinnych

Lata pięćdziesiąte i sześćdziesiąte przyniosły zastosowanie defektoskopii rentgenowskiej w badaniach rolniczych. Milner i Shellenberger [17] zastosowali tę metodę do wykrywania uszkodzeń wewnętrznych ziarna pszenicy. Stwierdzili, że wielokrotne nawilżanie i suszenie pszenicy powoduje spadek gęstości i energii potrzebnej do mielenia ziarna. Zmiany te miały istotny związek z powstałymi uszkodzeniami wewnętrznymi. Przegląd licznych zastosowań promieni Roentgena w ocenie nasion podaje Šimák i in. [35] oraz Kamra [10]. Technika rentgenograficzną stosowało wielu badaczy do wykrywania porażeń nasion przez szkodniki, identyfikowania pełnych i pustych nasion, oznaczania liczby nasion w kłębках buraka cukrowego, określania stopnia rozwoju zarodka i endospermu w nasionach. Ilina [8] zajmował się mechanicznymi uszkodzeniami ryżu i ich wpływem na zdolność kiełkowania nasion, Kamra [9,11] uszkodzeniami nasion sosny zwyczajnej i nasion ogórka.

Technika rentgenograficzna znalazła zastosowanie również przy ocenie jakości owoców i warzyw [18]. Zmiany biochemiczne wynikłe ze zgniecenia tkanek powodują, że absorpcja promieni X jest mniejsza w strukturach tych komórek niż w komórkach zdrowych.

W latach siedemdziesiątych powstały pierwsze urządzenia do selekcji owoców i warzyw z wykorzystaniem tej techniki. Główny problem sprowadzał się do doboru odpowiedniego czasu ekspozycji, co związane było z nieregularnością kształtu badanych obiektów i różną grubością prześwietlanej warstwy.

W 1970 roku Diener [1] zastosował system analizy rentgenowskiej uszkodzonych struktur owoców i warzyw. System ten posiadał jednak wiele niedoskonałości. Nie rozróżniał zagłębienia kielicha i ogonka od miejsc zgniecionych. Problem ten postawił więc dodatkowe wymagania odpowiedniej orientacji owoców w maszynach sortujących tak, aby system mógł być wykorzystany na skalę handlową.

W Polsce jednym z pierwszych eksperymentatorów, który zastosował rentgenografię w badaniach rolniczych był Ostromecki [27]. Badał on uszkodzenia mechaniczne ziarna pszenicy powstałe pod wpływem różnych obciążeń i odnosił je do zdolności kiełkowania nasion.

Na początku lat osiemdziesiątych na szerszą skalę zastosowano tę metodę w Instytucie Agrofizyki w Petersburgu do badania uszkodzeń nasion roślin uprawnych, głównie zbóż (kukurydza, jęczmień i pszenica), a także uszkodzeń będących skutkiem żerowania szkodników [30, 34].

W Instytucie Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk w Lublinie od połowy lat osiemdziesiątych technika ta jest stosowana do badania uszkodzeń mechanicznych ziarna zbóż, głównie pszenicy [3,4,6,7,20-22, 38,39,41,42,45].

Instytut Reprodukcyjności Zwierząt i Badań Żywności PAN w Olsztynie prowadzi badania wpływu uszkodzeń wewnętrznych ziarna jęczmienia browarnego na właściwości technologiczne słodu [2]. Wyniki tych badań mogą znaleźć zastosowanie w browarnictwie.

Uniwersytet Rolniczy w Pradze wykorzystuje metodę rentgenograficzną do identyfikacji uszkodzeń wewnętrznych ziarna pszenicy, jęczmienia paszowego i browarnego z zastosowaniem komputerowej analizy obrazów rentgenowskich [28,29].

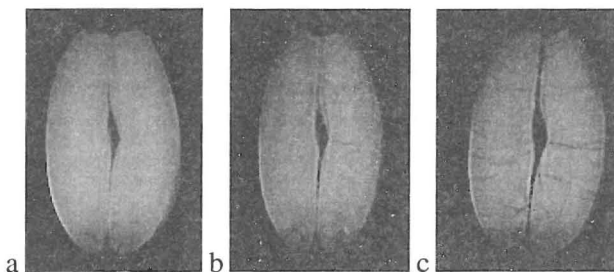
Uszkodzenia mechaniczne ziarna zbóż jak i innych nasion roślin uprawnych rozumiane są jako stan naruszenia naturalnej ciągłości tkanek i komórek. Mogą się objawiać jako pęknięcia okrywy owocowo-nasiennej, sięgające w głąb endospermu (uszkodzenia zewnętrzne) lub jako pęknięcia samego endospermu bez naruszenia warstwy aleuronowej (uszkodzenia wewnętrzne). Uszkodzenia mechaniczne w postaci mikropełnięć okrywy owocowo-nasiennej jak również uszkodzenia bielma nie mogą być identyfikowane wizualnie. Zastosowanie techniki rentgenograficznej w sposób jednoznaczny pozwala ocenić stan fizyczny tkanek obiektu i obserwować zjawisko powstawania uszkodzeń wewnętrznych pod wpływem różnych czynników destrukcyjnych. Ogromną zaletą metody rentgenograficznej w zastosowaniach rolniczych jest możliwość prowadzenia badań nieniszczących. Ziarno w nich użyte może być stosowane do innych badań, na przykład analizy biologicznych skutków uszkodzeń czy oceny parametrów mechanicznych.

Aparatura i metodyka

Do wykrywania uszkodzeń ziarna zbóż i nasion innych roślin używa się małogabarytowego, krótkoogniskowego aparatu rentgenowskiego ELEKTRONIKA 25 produkcji rosyjskiej, którego schemat przedstawia Rys. 4.

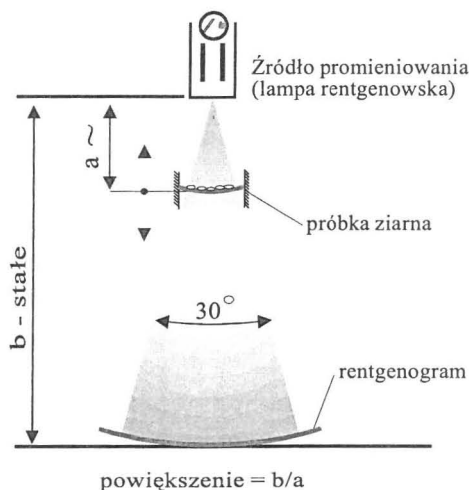
Obrazy można rejestrować na kliszach rentgenowskich lub fotograficznych, filmach lub na papierze fotograficznym. Aparat daje możliwość uzyskania obrazów w powiększeniu od 2 do 10 razy, bez geometrycznej nieostrości. Pozostałe dane techniczne aparatu to: napięcie zasilające 220 V (50 Hz), pobór mocy 70 W, napięcie przyspieszające 10-25 kV, natężenie prądu 30-80 mA, czas ekspozycji 1-16 min.

Miękkie promieniowanie rentgenowskie jest w różnym stopniu pochłaniane przez uszkodzone i nie uszkodzone struktury ziarniaka. Wiązka promieni po przejściu przez badany obiekt daje jego obraz na kliszy. Na obrazie możliwe jest rozróżnienie pole zarodka o wyraźnie jaśniejszym tle w porównaniu z tłem endospermu i ciemniejszej bruzdki (Fot. 1). Uszkodzenia wewnętrzne jako regularne ciemne, ostre cienie, ułożone na ziarna



Fot. 1. Rentgenowskie obrazy ziarniaka pszenicy; a - przed nawilżaniem, b - po nawilżeniu, c - po nawilżeniu i suszeniu.

Photo. 1. X-ray images of wheat kernels; a - before wetting, b - after wetting, c - after wetting and drying.



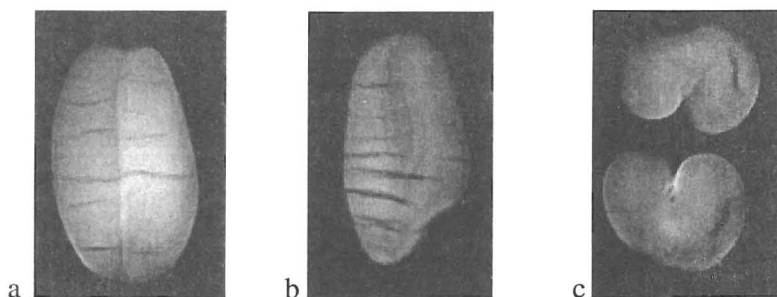
Rys. 4. Schemat aparatu rentgenowskiego.

Fig. 4. Scheme of X-ray camera.

objawiają się w różnej postaci - pęknięcia i szczeliny ogół prostopadle do bruzdki lub jako pęknięcia nieregularne - "gwiazdki", przebiegające wzdłuż i w poprzek ziarniaka. Na rentgenogramach dostrzegalne są również ubytki ziarna i niektóre uszkodzenia warstwy owoconasiennej.

Otrzymane obrazy rentgenowskie można obecnie analizować przy zastosowaniu programu komputerowego „ZIARNA” opracowanego we współpracy Instytutu Agrofizyki PAN w Lublinie i Instytutu Elektroniki Politechniki Łódzkiej [33]. Jest to specjalistyczny, interaktywny program pracujący w środowisku Windows, pozwalający na:

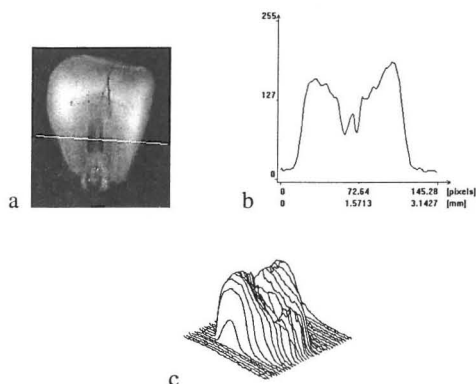
- analizę obrazów rentgenowskich ziarna w trzech różnych projekcjach (Fot. 2), odpowiadających ekspozycji wzdłuż trzech głównych osi ziarna,
- tworzenie rzutów aksonometrycznych obrazów, wykonywanie wykresów jasności obrazów wzdłuż wybranej linii, korekcji kontrastu, skalowanie obrazów, wyświetlanie obrazów w pseudo-kolorach, itp.
- wyznaczanie podstawowych parametrów geometrycznych obrazów (obwód, powierzchnia, długość i szerokość, kolistość i asymetria ziarna),
- wyznaczania parametrów statystycznych obrazów ziarna lub jego fragmentu (histogram, maksimum i minimum skali jasności obrazu, średnia, mediana i odchylenie standardowe),
- określanie pewnych wyróżników struktury ziarna (wskaźniki ilościowe, charakteryzujące ogólny stopień uszkodzenia bielma bądź usytuowanie uszkodzeń względem zarodka),
- sporządzanie dokumentów i raportów w postaci plików dyskowych, które mogą być powtórnie wczytywane do programu lub też wykorzystane w innych programach użytkowych.



Fot. 2. Rentgenowskie obrazy ziarniaków pszenicy w trzech projekcjach: bruzdą do dołu (a), z boku (b), z góry (c).

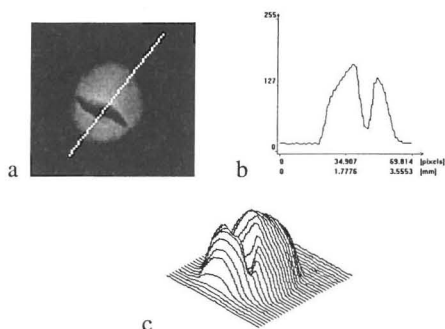
Photo. 2. X-ray image of wheat kernels for three projection: front view (a), side view (b), across view (c).

Wiele opcji systemu ZIARNA może być również wykorzystywanych do analizy ziaren innych zbóż i nasion roślin uprawnych (Fot. 3) oraz niektórych materiałów biologicznych (Fot. 4).



Fot. 3. Rentgenowski obraz ziarna kukurydzy (a), wykres jasności wzdłuż wskazanej linii (b), wykres aksonometryczny (c) [25].

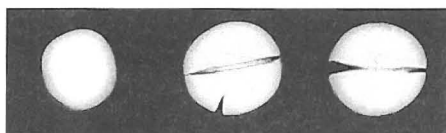
Photo. 3. X-ray image of corn kernel (a), brightness profile along the marked line (b), 3D plot – axonometric projection (c) [25].



Fot. 4. Rentgenowski obraz granul drożdżowej (a), wykres jasności wzdłuż wskazanej linii (b), wykres aksonometryczny (c) [25].

Photo. 4. X-ray image of yeasts granule (a), brightness profile along the marked line (b), 3D plot – axonometric projection (c) [25].

Poniżej pokazano przykładowe obrazy rentgenowskie nasion grochu (Fot. 5), buraka cukrowego (Fot. 6), kukurydzy (Fot. 7), i fasoli (Fot. 8).



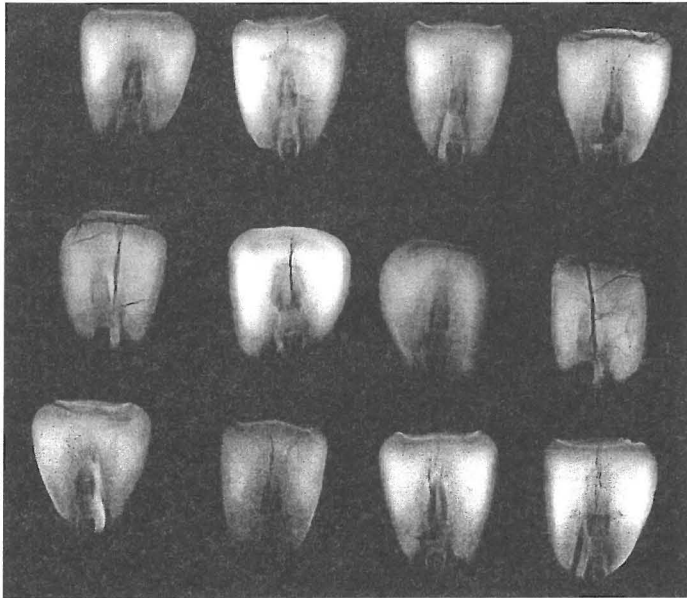
Fot. 5. Rentgenowski obraz nasion grochu.

Photo. 5. X-ray image of pea seeds.



Fot. 6. Rentgenowski obraz nasion buraka cukrowego.

Photo. 6. X-ray image of sugar-beet seeds.



Fot. 7. Rentgenowski obraz ziarna kukurydzy.
Photo. 7. X-ray image of corn kernel.



Fot. 8. Rentgenowski obraz nasion fasoli.
Photo. 8. X-ray image of bean seeds.

Stan uszkodzenia ziarna może być opisany dwojako:

- liczbą ziarniaków z uszkodzeniami wewnętrznymi w testowanej próbie,
- cyfrowym wskaźnikiem uszkodzeń.

Zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Niewczasa [19,20,22,24] wskaźniki uszkodzeń oparte są na odpowiednim podziale obrazu ziarniaka/nasiona i cyfrowym zapisie układu jego uszkodzeń.

Najczęściej stosowane to:

- *Wskaźniki sumaryczne* - *Is*. Ich wielkość określona jest liczbą prostokątów, w których stwierdzono uszkodzenia. Nie uwzględniają one usytuowania uszko-

dzeń, ale nadają się do oceny ilościowej skutków oddziaływania różnych czynników o charakterze destrukcyjnym.

- *Wskaźniki pozycyjne - Ip.* Uwzględniają położenie uszkodzeń z dokładnością do przyjętego podziału obrazu ziarna. Szczególnym przypadkiem jest wskaźnik binarny BI, oparty na dwójkowym systemie zapisu uszkodzeń. Można go stosować przy analizie skutków biologicznych uszkodzeń endospermu oraz przy określaniu kierunku penetracji wody w trakcie nawilżania i suszenia ziarna.

- *Wskaźniki mieszane (pozycyjno-sumaryczne) - Im.* Uwzględniają położenie uszkodzeń i ich rozmiar z dokładnością do przyjętego podziału na strefy obrazu ziarna.

Wyniki badań

Przeprowadzone w roku 1986 badania z pięcioma odmianami pszenicy jarej, wykazały duże zróżnicowanie w stanie uszkodzeń wewnętrznych ziarna [7]. Materiał badawczy stanowiły dwie odmiany pszenicy *Triticum durum* i trzy - *Triticum aestivum*. Ziarno w pełni dojrzałe, o wilgotności około 12%, zbierane ręcznie, poddawano detekcji rentgenograficznej w laboratorium Instytutu w Petersburgu. Analiza uzyskanych wyników wykazała bardzo duże zróżnicowanie w liczbie ziarniaków z uszkodzeniami bielma w obrębie badanych odmian pszenicy (Tab.1).

Tabela 1. Procentowy udział ziarniaków z uszkodzeniami wewnętrznymi w testowanych próbach pszenicy jarej [3]

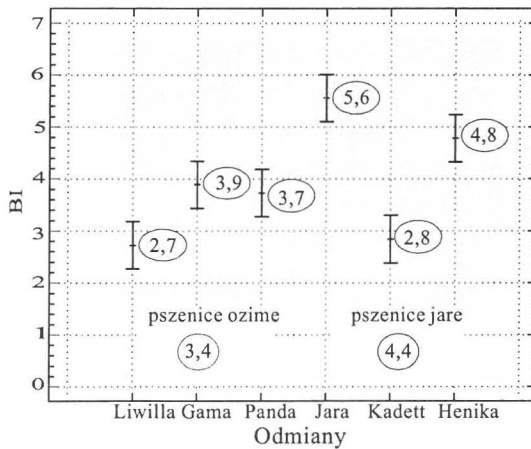
Table 1. Percent of kernels with internal damage in tested samples of spring wheat [3]

<i>Triticum durum</i>		<i>Triticum aestivum</i>		
Miradur	Cando	LGR 36/11	Alfa	Jara
7,0	21,0	45,6	29,6	45,8

W obrębie *Triticum durum* odmiana Miradur wykazała najniższy poziom uszkodzeń, podczas gdy odmiana Cando miała trzykrotnie więcej uszkodzonych ziarniaków. W obrębie pszenic zwyczajnych ród LGR 36/11 i odmiana Jara charakteryzowały się wysoką liczebnością uszkodzonych ziarniaków podczas gdy Alfa miała takich ziarniaków zdecydowanie mniej. Początkowo przypuszczano, że przyczyną powstawania uszkodzeń mogło być zróżnicowane tempo wysychania ziarna po opadach atmosferycznych. Jednakże z powodu braku danych dotyczących szczegółowych obserwacji klimatycznych w okresie dojrzewania teza ta nie mogła być potwierdzona.

Podjęte w tym celu badania laboratoryjne, dotyczące wyjaśnienia przyczyn powstawania uszkodzeń wewnętrznych, pozwoliły na bardziej szczegółowe analizy [30,39,42,44,45].

Ziarno kilku odmian pszenicy ozimej i jarej o wilgotności około 10% i zróżnicowanej strukturze bielma - szklistej i mączystej (szkliste mają wyższą zawartość białka) poddano intensywnemu nawilżaniu - przez zanurzenie w wodzie destylowanej [41]. Po doprowadzeniu do trzech poziomów wilgotności - 16, 21 i 26% (1, 3 i 6 godzin moczenia) ziarniaki prześwietlano. Analiza obrazów pozwoliła stwierdzić, że intensywne nawilżanie ziarna powoduje uszkodzenie bielma. Wielkość uszkodzenia, opisana wskaźnikami binarnymi *BI*, różni się nie tylko w obrębie gatunków, ale i odmian (Rys. 5).



Rys. 5. Średnie wartości wskaźników uszkodzeń *BI* ziarna pszenicy ozimej i jarej [41].

Fig. 5. Mean values of binary indexes *BI* of winter and spring wheat grain [41].

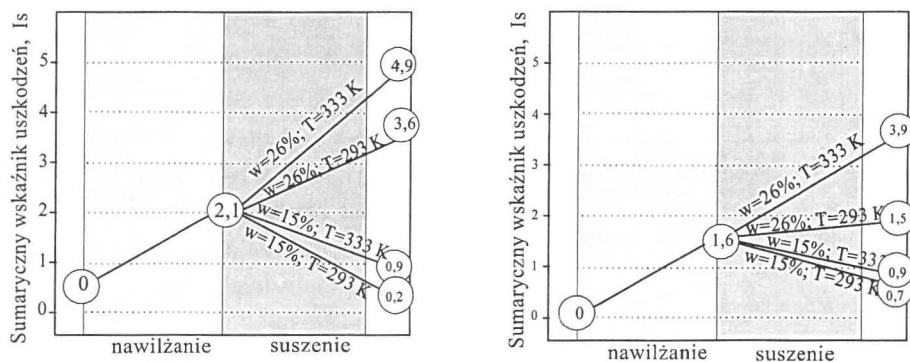
W Tabeli 2 przedstawiono średnie wartości binarnych wskaźników uszkodzeń *BI* ziarna pszenicy jarej odmiany Henika, nawilżanego w wodzie oraz w komorze klimatyzacyjnej.

Niezależnie od typu bielma i sposobu nawilżania, początkowemu wzrostowi wilgotności ziarna towarzyszył wzrost uszkodzeń wewnętrznych. Najwięcej uszkodzeń ujawniło się po 3 godzinach nawilżania w wodzie (ziarna osiągnęły wilgotność około 21%) - $BI = 6,2$. Dla prób ziarna nawilżanych w komorze klimatyzacyjnej najczęściej pęknięć zaobserwowano przy wilgotności około 15% - $BI = 3,9$. Przy wyższej wilgotności następował spadek obserwowanych uszkodzeń. Oznacza to, że wzrost nasycenia komórek endospermu wodą i tym samym wzrost ich objętości powoduje, że widoczne wcześniej pęknięcia zmniejszają się poniżej granicy wykrywalności metodą rentgenograficzną [39].

Tabela 2. Średnie wartości binarnego wskaźnika uszkodzeń ziarna pszenicy jarej cv. Henika [39]
Table 2. Mean values of binary indexes of wheat grain of cv. Henika [39]

Sposób nawilżania	Wilgotność [%]	Typ bielma		Średnie
		Szklisty	Mączysty	
Woda	10	0	0	0
	16	4,1	1,9	3,0
	21	6,7	5,6	6,2
	26	5,7	4,6	5,2
	Średnie	5,5	4,0	4,8
Komora klimatyzacyjna	10	0	0	0
	13	2,1	2,7	2,4
	15	3,8	3,9	3,9
	18	3,3	2,3	2,8
	21	2,6	1,7	2,2
	26	0,6	0,9	0,8
Średnie		2,5	2,3	2,4

Badano również wpływ suszenia (po intensywnym nawilżaniu ziarna) na powstawanie uszkodzeń wewnętrznych. Próby ziarna o mączystej i szklistej strukturze bielma nawilżono w wodzie do wilgotności - 15% i 26% i następnie wysuszono w temperaturach 293K i 333K. Okazało się, że obydwa te procesy - zarówno nawilżanie jak i suszenie są powodem pęknięcia bielma [40]. Intensywne suszenie ($T = 333\text{ K}$) ziarna o wysokiej wilgotności ($w = 26\%$) powoduje większą destrukcję bielma niż nawilżanie (Rys. 6).



Rys. 6. Sumaryczny wskaźnik uszkodzeń (I_s) ziarna pszenicy cv. Henika po nawilżaniu i suszeniu.

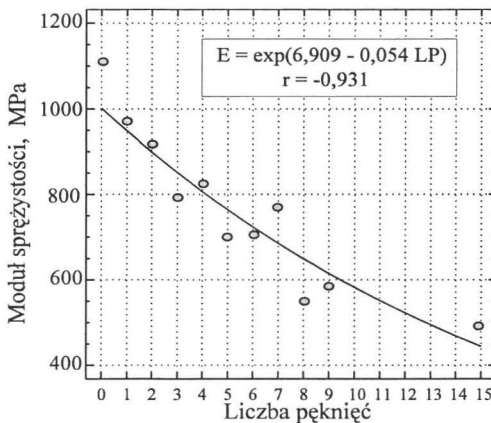
a) szklista struktura bielma, b) mączysta struktura bielma [44].

Fig. 6. Mean values of summary indices (I_s) of wheat grain cv. Henika after wetting and drying,

a) vitreous, b) mealy [44].

Główną przyczyną pęknięć bielma są naprężenia wewnętrzne towarzyszące wysokim gradientom wilgotności, jakie powstają podczas nawilżania i suszenia ziarna. Odpowiednio przygotowany eksperyment połowy potwierdził przypuszczenia, że wysoki gradient wilgotności wynikały z upalnego dnia, rosy i opadów atmosferycznych jest przyczyną powstawania uszkodzeń wewnętrznych ziarna już w okresie przedzbiorowym [3,4]. Stan fizyczny ziarna jest uwarunkowany przebiegiem pogody w ciągu dwóch tygodni przed zbiorem oraz zawartością białka w ziarnie, a uszkodzenia bielma mogą pojawić się na długo przed zbiorem i są tym większe im większe wahania pogodowe. Wyższy poziom nawożenia azotowego powoduje również istotny wzrost uszkodzeń. Stąd wniosek, że stosowanie intensywnych upraw pszenicy, zmierzających do wzrostu zawartości białka może pociągać za sobą spadek odporności ziarna na uszkodzenia mechaniczne.

Ziarno zbóż podlega stresom fizycznym nie tylko w warunkach polowych przed zbiorem, ale i w trakcie obrotu pozbiorowej. Takie czynniki jak: odmiana, wilgotność, temperatura, liczba popękanych ziarniaków, temperatura suszącego powietrza mogą istotnie wpływać na wytrzymałość mechaniczną ziarna.



Rys. 6. Zależność modułu sprężystości ziarna od liczby pęknięć [38].

Fig. 6. Modulus of elasticity vs. number of cracks of wheat grain [38].

Potwierdziły to badania poszukujące związku między parametrami wytrzymałościowymi a uszkodzeniami wewnętrznymi ziarna [40,43]. Obraz ziarniaka rejestrowano na kliszach rentgenowskich i na jego podstawie określono stan uszkodzeń. Po prześwietleniu ziarniaki poddawano jednoosiowemu ścisłaniu rejestrując siłę, energię i odkształcenie. Analiza uzyskanych wyników wykazała ścisły związek wytrzymałości ziarna i modułu sprężystości z typem bielma oraz liczbą pęknięć wewnętrznych (Rys. 6).

Stosując metodę rentgenograficzną oceniono również stan uszkodzeń wewnętrznych powstałych w ziarnie, które zostało poddane obciążeniom statycznym i dynamicznym [5,20,23]. Przyjęty zakres obciążeń był zbliżony do obciążeń występujących w rzeczywistych procesach technologicznych, takich jak zbiór lub transport ziarna. Rezultaty badań przedstawia Tabela 3. Pszenice jare

charakteryzują się mniejszą odpornością na wewnętrzne uszkodzenia mechaniczne niż pszenice ozime. Obciążenia statyczne i dynamiczne na niższych poziomach nie powodowały jeszcze istotnego wzrostu uszkodzeń w stosunku do prób kontrolnych. Dopiero większe obciążenia spowodowały istotny przyrost uszkodzeń.

Tabela 3. Średnie wartości wskaźnika uszkodzeń IS ziarna pszenicy ozimej i jarej poddanego obciążeniom statycznym i dynamicznym [19]

Table 3. Mean values of summary indices (Is) of winter and spring wheat grain affected by static and dynamic loading [19]

Obciążenia	o z i m a		j a r a		
	Gama	Liwilla	Jara	Kadett	
Kontrola	0,11	0,16	0,36	0,33	
Statyczne	4 Mpa	0,25	0,44	0,52	0,43
	8 MPa	1,33*	1,84*	1,12*	1,17*
Dynamiczne	20 m/s	0,17	0,61*	0,95*	0,61
	25 m/s	0,41	0,96*	2,23*	1,71*
Średnie	0,46	0,80	1,03	0,86	

* - wartość istotnie wyższa w porównaniu z materiałem kontrolnym.

Wyniki badań rentgenograficznych mogą być wykorzystane do ilościowej i jakościowej oceny uszkodzeń ziarna zbóż lub nasion innych, a także do określenia relacji między stanem uszkodzeń wewnętrznych a biologicznymi, mechanicznymi lub technologicznymi skutkami ich występowania.

Nowe rozwiązania - tomografia komputerowa

Dotychczas stosowana metodyka detekcji rentgenowskiej zakładała stałe położenie ziarniaka. Najwięcej uszkodzeń wykrywano przy ekspozycji ziarniaka w jego położeniu stabilnym tj. bruzdką ku dołowi. Pole obrazu jest też w takim położeniu największe. Jednak niewielka zmiana położenia ziarniaka w stosunku do kierunku promieni X wystarczy, aby niektóre pęknięcia zmieniły kształt, rozmiar, w skrajnych przypadkach przestały być widoczne, a ujawniły się inne. Jak dowiodły badania nie ma jednej orientacji ziarna, która umożliwiałaby ujawnienie wszystkich możliwych pęknięć wewnętrznych [6]. Zatem aby wykrywać jak najwięcej uszkodzeń, należałoby dysponować obrazem przestrzennym.

Obecnie uzyskanie obrazów przestrzennych stało się możliwe dzięki tomografii komputerowej. Ze względu na rodzaj wykorzystanego zjawiska fizycznego rozróżnia się tomografy rentgenowskie, w których obiekt prześwietlany jest wiązkami promieniowania rentgenowskiego, a otrzymywany obraz odzwierciedla głównie rozmieszczenie tkanek twardych (tomografia) oraz tomograf NMR (jądrowy rezonans magnetyczny), w którym obiekt umieszczony jest w silnym polu magnetycznym i przenikają go wiązki fal radiowych, a badany sygnał, pochodzący z jądrowego rezonansu magnetycznego, obrazuje rozmieszczenie wody. Ogólnie, tomograf to przyrząd służący do otrzymywania obrazów przekrojów poprzecznych żywych organizmów. Zasada działania tomografu polega na skanowaniu obiektu dwiema przecinającymi się wiązkami i komputerowej rekonstrukcji rozkładu absorbenta w badanym cielem.

„Hounsfield Godfrey Newbold (1919), brytyjski inżynier elektronik, od 1951 roku pracownik laboratoriów naukowych firmy Electric and Musical Industries (EMI) w Londynie

oraz

Cormack Allan Macleod (1924-1998), fizyk amerykański pochodzący z RPA, od 1960 profesor Tufts University w Medford w stanie Massachusetts, specjalista w zakresie biofizyki atomowej (biofizyka)

otrzymali w 1979 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie medycyny za wkład w rozwój technik rentgenowskiej tomografii komputerowej. Badania prowadzili niezależnie:

- C.A. Macleod opracowanie teoretyczne 1963-1964,

- H.G. Newbold w latach 1967-1976 skonstruował prototyp tomografu komputerowego. „

(<http://wiem.onet.pl/wiem/00b6a3.html>)

Zastosowanie tomografii komputerowej poza diagnostyką medyczną staje się w światowej nauce coraz popularniejsze [12,37].

I tak zamknęło się koło „od Nobla do Nobla”, a minęło tylko 78 lat.

PIŚMIENNICTWO

1. **Diener R.G.:** Using X-ray image scan to sort bruised apple. Agr. Engr. 51, 356-361, 1970.
2. **Fornal J., Ornowski A., Grundas S.:** Inner damage of barley grain: structural and technological aspects. 14th ICC Congress on "Quality cereals in a changing world", Haga, 1994.
3. **Geodecki M.:** Uszkodzenia wewnętrzne ziarna pszenicy powstające w okresie przed-zbiorowym. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1999.
4. **Geodecki M.:** Endosperm cracks creation in field condition before wheat harvest. 14th ICC Congress on "Quality cereals in a changing world", Haga, 1994.

5. **Grundas S., Geodecki M., Niewczas J., Velikanov L.:** Static loading of wheat grain mass of differentiated moisture content. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 103-109, 1993.
6. **Grundas S., Velikanov L., Archipov M.:** Importance of wheat grain orientation for the detection of internal mechanical damage by the X-ray method. *Int. Agrophysics*, 13, 355-361, 1999.
7. **Grundas S., Styk B., Wielikanow L.:** Podatność ziarna pszenicy na uszkodzenia mechaniczne i jego ocena jakościowa. *Zesz. Probl. IHAR. Cześć I. Radzików*, 135-142, 1992.
8. **Iliina W.:** Riengienograficheskij metod opriedielenija treshchinowatosti risa. *Mukomolno-Eliewatomajaja Promyszlienost'*, 6, 1956.
9. **Kamra S.K.:** Determination of mechanical damage on scots pine seed with X-ray contrast method. *Studia Forestalia Suecica*, 8, 1-20, 1963.
10. **Kamra S.K.:** The use of X-rays in seed testing. *Proc. Int. Seed Test. Ass.*, 29, 1, 71-79, 1964a.
11. **Kamra S.K.:** Determination of germinability of cucumber seed with X-ray contrast method. *Proc. Int. Seed Test. Ass.*, 29, 3, 519-534, 1964b.
12. **Kanagawa Y., Furuyama Y., Hattori Y.:** Nondestructive measurement of moisture diffusion coefficient in wood drying. *Drying Technology*, 10(5), 1231-1248, 1992.
13. **Kudra T., Niewczas J., Raghavan G.S.V., Szot B.:** Quality aspects in microwave dried grain. *NABEC-94, Conf. ASAE, Ontario*, 1994.
14. **Kudra T., Niewczas J., Szot B., Raghavan G.S.V.:** Stress cracking during high-intensity drying and its effect on grain quality. *Materiały Konferencyjne VIII Sympozjum Suszarnictwa, Warszawa*, t. I, 137-148, 1994.
15. **Kudra T., Niewczas J., Szot B., Raghavan G.S.V.:** Stress cracking in high-intensity drying: identification and quantification. *Int. Drying Symp., Melbourne*, 1994.
16. **Kudra T., Szot B., Raghavan G.S.V.:** Quality evaluation of microwave dried grains by quantifying internal stress cracks using X-rays. *Proc. 28th Microwave Symposium on "Quality Enhancement Using Microwaves"*, Montreal, 192-197, 1993.
17. **Milner M., Shellenberger J.A.:** Physical properties of wheathered in relation to internal fissuring detected radiographically. *Cereal Chemistry*, 30, 202-212, 1953.
18. **Mohsenin N.N.:** Electromagnetic radiation properties of food and agricultural products. *Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York*, 1984.
19. **Niewczas J.:** The method of determination of the index of mechanical damage of a single kernel by means of X-ray detection. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 389, 89 – 95, 1991.
20. **Niewczas J.:** Ocena uszkodzeń mechanicznych ziarna pszenicy wykrywanych techniką rentgenograficzną. *Acta Agrophysica* 2, 1994.
21. **Niewczas J.:** Utility of measures of internal damage state of wheat grain detected by X-ray technique for assessment of raw material quality. *14th ICC Congress on "Quality cereals in a changing world"*, Haga, 1994.
22. **Niewczas J., Grundas S.:** Application of X-ray method for qualitative evaluation of wheat grain endosperm cracks. *Proc. ICC Symposium on "Cereal Based Foods: New Developments. Praga*, 500-504, 1991.

23. **Niewczas J., Grundas S., Ślipek Z.:** The analysis of increments of internal damage to wheat grain affected by dynamic loading. *Int. Agrophysics*, 8(2), 283-287, 1994.
24. **Niewczas J., Woźniak W.:** Application of the discretization of an X-ray picture of wheat grain for the evaluation of endosperm cracks. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 397, 45-51, 1991.
25. **Niewczas J., Woźniak W.:** Zastosowanie systemu „ZIARNA” do analizy obrazów rentgenowskich materiałów biologicznych. *I Zjazd Naukowy PTA, Referaty i doniesienia*, 81-82, 1997.
26. **Oldenberg O., Rasmussen N.C.:** *Fizyka współczesna*. PWN, Warszawa, 1970.
27. **Ostromęcki K.:** Rentgenograficzna metoda oceny i klasyfikacji mechanicznych uszkodzeń ziarniaków pszenicy. *Biul. IHAR*, 143, 69-74, 1981.
28. **Pecen J.:** Internal damage identification of seeds. *Int. Agrophysics*, 8(2), 289-293, 1994.
29. **Pecen J., Grundas S., Vielikanov L.:** On the need for studies on mechanical damage to wheat grain. *Proc. of International Conf. on "Trends in Agricultural Engineering"*, Praga, 398-403, 1992.
30. **Savin V.N., Arkhipov V., Badenko A.L., Joffe Yu.K., Grun L.B.:** Rentgenografija dlja vyjavlenija vnutrennikh povrezhdenij i ikh vlijanije na urozhajnyje kachestva semjan. *Vest. Selskhoz. Nauki*, 10, Moskwa, 99-105, 1981.
31. **Scholz O.:** *Fizyka atomu w zarysie*. PWN, Warszawa, 1973.
32. **Skubisz G., Vielikanov L.:** Methods of determining strength properties of the winter rape stems. *Int. Agrophysics*, 8(2), 323-326, 1994.
33. **Strumillo P., Niewczas J., Szczypiński P., Makowski P., Woźniak W.:** Computer system for analysis of X-ray images of wheat grains. *International Agrophysics*, vol. 13, 133-140, 1999.
34. **Styk B., Grundas S., Savin N., Vielikanov L.:** Ocenka mekhanicheskikh povrezhdenij zerna jarovoj pszenicy kolorimetriczeskim i rentgenograficeskim metodami. *Miezhdunarodnyj Agropromyshlennyj Zhurnal*, 1, 85-89, 1989.
35. **Šimak M., Gustafsson A., Granstrom A.:** Die Rontgendiagnose in der Samenkontrollic. *Proc. Int. Seed Test. Ass.*, 22, 1, 1-12, 1957.
36. **Tarjan I.:** *Fizyka dla przyrodników*. PWN, Warszawa, 1975.
37. **Toller E.W., Murphy C.:** Factors affecting soil X-ray absorption coefficients with computer tomography. *Trans. of the ASAE*, 34(3), 1047-1053, 1991.
38. **Vielikanow L., Archipov M.V., Grundas S.:** Signification of kernel orientation related to direction of X-ray beam for evaluation of inner cracks. *14th ICC Congress on "Quality cereals in a changing world"*, Haga, 1994.
39. **Woźniak W.:** The effect of two types of moisture treatment of wheat grain on endosperm damage. *Int. Agrophysics*, 9, 165-170, 1995.
40. **Woźniak W.:** Mechanical properties of wheat grain in relation to internal cracks. *Int. Agrophysics*, 15, 59-64, 2001.
41. **Woźniak W., Grundas S., Kocoń J.:** Qualitative effect of moisture treatment of wheat grain by means of X-ray and SEM techniques. *Proc. of ICC Symposium, Prague*, 494-499, 1991.

42. **Woźniak W., Grundas S., Niewczas J.:** Zastosowanie metody kolorymetrycznej i rentgenograficznej w badaniach uszkodzeń mechanicznych ziarna pszenicy. *Annales UMCS, Sekcja AAA*, vol. XLVI/XLVII, 469-475, 1991/1992.
43. **Woźniak W., Niewczas J., Kudra T.:** Internal damage vs. mechanical properties of microwave-dried wheat grain. *Int. Agrophysics*, 13, 259-268, 1999.
44. **Woźniak W., Styk W.:** Internal damage to wheat grain as results of wetting and drying. *Drying Technology*, 1996, 14(2), 349-365.
45. **Woźniak W., Styk W., Geodecki M.:** High relative humidity as cause of inner damage of wheat grain. *Int. Agrophysics*, 8(2), 377-380, 1994.

X-RAY DEFECTOSCOPY AND ITS USE IN AGROPHYSICAL RESEARCH

W. Woźniak

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences
ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: wanda@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. The paper briefly presents the history of the discovery and application of X-ray. Phenomena caused by X-ray, their interaction with matter, their application in medicine, technology, and in the research of plant materials were discussed. Possible chances for the development of roentgenography and new solutions in apparatuses were presents.

Key words: roentgenography, discovery, application, agrophysics.