

problemy agrofizyki

POLSKA AKADEMIA NAUK • ZAKŁAD AGROFIZYKI



Ossolineum

zeszyt 38

rok 1982

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
ZAKŁAD AGROFIZYKI

PROBLEMY AGROFIZYKI 38

GRAŻYNA SKUBISZ

ZAGADNIENIE SPRĘŻYSTOŚCI ŻDŹBŁA ZBÓŻ

WROCLAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK · ŁÓDŹ
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK
1982

Komitet redakcyjny

prof. dr JAN GLIŃSKI (redaktor naczelny)

prof. dr IGNACY DECHNIK, doc. dr BOGUSŁAW SZOT

Redaktor Wydawnictwa Hanna Jurek

Redaktor techniczny Elżbieta Garnarczyk

© Copyright by Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1982.
Printed in Poland

PL ISSN 0137-6586

ISBN 83-04-01374-6

Zakład Narodowy im. Ossolińskich — Wydawnictwo. Wrocław 1982.
Nakład: 380 egz. Objętość: ark. wyd. 3,40, ark. druk. 3,75. Papier
offsetowy kl. V, 70 g, 61 x 86. Oddano do drukarni 4 XI 1982.
Druk ukończono w grudniu 1982. Wrocławska Drukarnia Naukowa.
Zam. 2155/82 — H-13. Cena zł 35.—

1. WSTĘP

Wyleganie zbóż podczas wegetacji stanowi poważny problem w rolnictwie, gdyż proces ten wpływa ujemnie na wysokość plonów, jak też na możliwość racjonalnego i maksymalnego wykorzystania maszyn żniwnych. Wysokość plonów uzyskiwana z jednostki powierzchni zależy w dużym stopniu od właściwego doboru odmian, rodzaju stosowanych zabiegów agrotechnicznych, a także od wielkości strat powodowanych wyleganiem. Straty ilościowe spowodowane zjawiskiem wylegania roślin są olbrzymie, osiągają niejednokrotnie kilkadziesiąt procent możliwego do uzyskania plonu ziarna i słomy, powodując jednocześnie dodatkowy wzrost nakładów pracy i zmniejszenie przepustowości maszyn. W związku z tym wielokrotnie podejmowano próby badań, których celem była ocena strat powstałych na skutek wylegania roślin. Do osiągnięcia tego celu niezbędna jest znajomość parametrów mechanicznych źdźbła. Jednakże z uwagi na fakt, że źdźbło zbóż stanowi materiał niejednorodny i jego właściwości fizyczne zmieniają się podczas wegetacji, szczególnie trudne jest opracowanie odpowiedniej metodyki badań takiego materiału.

Zagadnienie sprężystości źdźbła związane jest ściśle z wielostronnym poznaniem różnych czynników zewnętrznych i wewnętrznych, determinujących stan fizyczny roślin. Stąd też jako cel pracy przyjęto:

- przegląd dotychczas stosowanych metod i sposobów oceny cech fizycznych źdźbła związanych z wyleganiem zbóż,
- zastosowanie opracowanej w Zakładzie Agrofizyki PAN w Lublinie nowej metody badań dla określania współczynnika sprężystości źdźbła dwóch odmian pszenicy ozimej przy uwzględnieniu poszczególnych okresów fenologicznych.

2. DOTYCHCZAS STOSOWANE METODY

Ocena różnych gatunków i odmian pod kątem podatności i odporności na wyleganie była tematem wielu badań /49, 59/. W dalszym ciągu jest przedmiotem różnego rodzaju prac z zakresu mechaniki łączy, anatomii, struktury, składu chemicznego, morfologii, fizjologii, wpływu warunków glebowo-klimatycznych itp. Do oceny tego zjawiska stosowane są tzw. współczynniki sztywności Ruebenbauera i Riegerowej /53/, wskaźniki charakteryzujące wytrzymałość na zginanie całego łączy Grafiusa i Browna /23/ oraz Ragasitsa /52/. W doświadczeniach i hodowli nowych odmian powszechnie stosuje się skalę bonitacji 5- lub 10-stopniową, określającą stan wylegania zboża, a pośrednio wytrzymałość roślin na działanie różnych czynników zewnętrznych. Metoda ta jest obciążona jednak indywidualnym błędem wynikającym z subiektywnej oceny badającego, a jej wyniki mogą być jedynie przydatne przy porównywaniu poszczególnych odmian w konkretnych warunkach wzrostu i rozwoju roślin. Słabe strony bonitacji prowadziły wielokrotnie do poszukiwań takich metod pomiarów, za pomocą których można byłoby wyznaczyć odtwarzalne wartości stabilności łączy.

Badania właściwości mechanicznych łączy roślin (przede wszystkim zbóż) szczególnie silnie rozwinęły się na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat, z uwagi na intensywne próby wyjaśniania przyczyn wylegania roślin oraz szeroko wprowadzoną mechanizację zbioru. Wykonano pomiary w szerokim zakresie odkształceń mechanicznych łączy, określając wartości siły w procesie zginania /1, 2, 11, 12, 20, 24, 26, 30, 36, 45, 47, 50, 51, 54, 57, 58, 61, 62, 66-68/, zgniatania /69/, rozciągania /1-3, 9, 22, 45, 50/ i cięcia /1, 2, 22, 35/.

Wyznaczono też moment zginający /5, 47/, naprężenia /1, 5, 66/, sztywność 4, 5, 20, 43, 47, 54, 55, 62, 67/, współczynnik sprężystości /3, 11-15, 20, 24, 26, 45, 58, 61/ dla fragmentów łączy lub całej łączy zarówno roślin zbożowych, jak i bawełny, tytoniu, lucerny, trawy itd. Przy przeprowadzaniu prób zginania stosowano ogólnie dwie zasady: jednostronne sztywne zamocowanie zginanej łączy przy punktowym obciążeniu wolnego końca /12, 14, 20, 45, 50, 54, 58, 61/ lub dwustronne podparcie ze środko-

wym obciążeniem /1,2,4,5,11,13,36,45,48,62,66,68/. Na podstawie uzyskanych parametrów wytrzymałościowych (moment zginający, naprężenia, sztywność, współczynnik sprężystości) dokonywano oceny mechanicznej wytrzymałości źdźbła w procesie zginania, rozciągania, zgniatania i cięcia. Badania prowadzono na całych źdźbłach lub jego wybranych odcinkach.

W ostatnich latach stosuje się również syntetyczne regulatory wzrostu w celu uzyskania stabilizacji łodygi. W związku z tym rozwinięto badania zmierzające do oceny odporności zbóż na wyleganie po zastosowaniu preparatu odpornościowego /45,54,66/.

Wielu badaczy wskazało współczynnik sprężystości jako odpowiednią wielkość charakteryzującą właściwości wytrzymałościowe źdźbła. Stwierdzono, że wartość tego parametru wyznaczona w procesie zginania międzywęźli źdźbła (6-centymetrowe odcinki ze środka międzywęźli) dwóch odmian pszenicy zmienia się w przedziale $23,9-53,7 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ /13/, dla całego zaś źdźbła zawiera się w granicach od $19,9$ do $51,1 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ /14/. Natomiast w badaniach dłuższych odcinków źdźbła (10-centymetrowych pierwszego i drugiego międzywęźla) uzyskano następujące wartości tego parametru: $5,5-12,8 \times 10^9 \text{ N/mm}^2$ dla pszenicy ozimej, $5,2-15,9 \times 10^9 \text{ N/mm}^2$ dla pszenicy jarej i $18,1-24,1 \times 10^9 \text{ N/mm}^2$ dla owsa /26/. Badania zaś współczynnika sprężystości wyznaczonego w procesie zginania odcinków źdźbła pszenicy ozimej (o długości 2 cm) za pomocą interferometru holograficznego w czterech fazach fenologicznych (kłoszenia, dojrzałości młeczej, woskowej i pełnej) wykazały zmienność tego parametru w granicach od $0,62$ do $4,44 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ /20/. Z kolei współczynnik sprężystości źdźbła jęczmienia (wyznaczony w procesie zginania całego źdźbła) zmieniał się w granicach $929-7126 \text{ N/mm}^2$ i badania te wykazały liniową zależność omawianego parametru z odpornością na wyleganie /28/. Ponadto badania te wykazały, że parametr ten jest najsilniej skorelowany (ujemnie) ze stopniem wylegania spośród wszystkich analizowanych wskaźników fizycznych (moduł Younga przy różnych sposobach pomiaru siły zginającej, naprężenia zginające) i morfologicznych (stosunek grubości do długości źdźbła, stosunek grubości ścianki do

długości źdźbła). Podobną współzależność wylegania z modułem Younga źdźbła stwierdzono u jęczmienia i pszenicy (45-47) oraz u owsa /25/.

Przeprowadzone badania współczynnika sprężystości w procesie rozciągania wykazały także dużą zmienność tej wielkości dla dwóch odmian pszenicy w granicach $19,6-58,4 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ /8/ oraz $0,1-25,0 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ /4,38/. Jednakże inni autorzy /10,45/ stwierdzają, że metody oparte na procesie rozciągania nie są odpowiednie do charakteryzowania właściwości wytrzymałościowych źdźbła. Sugerowano, że wyleganie zbóż odbywa się przez wyboczenie, które następuje przy pewnym krytycznym stosunku promienia krzywizny do średnicy zewnętrznej źdźbła /45, 46/. Odporność na wyboczenie ma dwie składowe: geometryczny moment bezwładności oraz moduł Younga. Opierając się na rozważaniach teoretycznych, przewidywano wyboczenie źdźbła na jednej trzeciej wysokości od ziemi. Praktyczne próby potwierdziły te założenia w przypadku jęczmienia, natomiast przy ocenie pszenicy nie wystąpiła taka zgodność. Fakt ten jest spowodowany prawdopodobnie nieregularną zbieżnością źdźbła pszenicy do przyjętego kształtu w postaci stożka, szczególnie w obrębie dolnych międzywęźli, zmianami grubości ścianki lub zmianą wartości modułu Younga wzdłuż źdźbła. Neenan /45/ wskazał, że należałoby zbadać zmienność tych wielkości na długości źdźbła, żeby możliwe było przewidywanie punktu wyboczenia. Uzyskana wartość współczynnika sprężystości dla pszenicy zawierała się w granicach: $93-1422 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$ zielone źdźbło, dojrzałe zaś $126-313 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$. Parametr ten pozwolił na uchwycenie zmian wytrzymałościowych źdźbła obydwu rodzajów zbóż (pszenicy i jęczmienia) pod wpływem działania preparatu odpornościowego. Z kolei badania wytrzymałościowe źdźbła zbóż prowadzone w kanale aerodynamicznym sugerują, że idealną rośliną jest ta, która charakteryzuje się dużą wartością modułu Younga w części znajdującej się przy korzeniach, niższy zaś moduł w pobliżu kłosa, aby mogła wykazywać większą elastyczność /24/. Prowadzone natomiast badania w celu określenia modułu sprężystości postaciowej źdźbła (dla międzywęźli dwóch odmian jęczmienia) dowiodły, że na wartość tego parametru wywierają istotny wpływ warunki klimatyczne i agrotechniczne, a jego wartości zmieniają się wg równania $y = a + bx + cx^2$ /15/. Badano również moduł sprężystości łodygi

tytoniu, stosując ten parametr do przewidywania ugięć łodyg poddawanych działaniu siły /11/. Przy ocenie właściwości mechanicznych tej rośliny zastosowano też metodę standardową "ASTM" powszechnie używaną do badań sprężystości drewna /6/. Uzyskana według tej metody wielkość modułu sprężystości dla łodygi tytoniu wynosiła $2,8 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$. Przewodzone także badania wytrzymałościowe łodygi bawełny, wyznaczając siłę zginającą oraz jej sprężystość /12/. W efekcie uzyskano zależność liniową między tymi parametrami. Współczynnik sprężystości korelował z wilgotnością, a jego wartość zmieniała się w przedziale $57-348 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$. Ponadto stosowano metodę impulsową ultradźwiękową do wyznaczenia modułu Younga źdźbła pszenicy /34/. Metoda ta wykorzystuje zjawisko prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w łodydze, a ściślej w tkankach mechanicznych źdźbła. Aby wyznaczyć współczynnik sprężystości przyjęto, że gęstość na całej długości źdźbła jest stała. Wyznaczony w ten sposób moduł Younga źdźbła pszenicy ozimej obejmuje wartości $160-12\ 000 \text{ N/mm}^2$.

W innych badaniach wyznaczono równocześnie moduł Younga, sztywność oraz momenty gnące dla oceny wytrzymałości źdźbła pszenicy i jęczmienia. Stwierdzono, że w przypadku takiej samej sztywności wielkość tego parametru zależy bardziej od momentu bezwładności u jęczmienia, natomiast u pszenicy od modułu Younga /47/. Wartość współczynnika sprężystości źdźbła jęczmienia zawierała się w przedziale $42,9-63,1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, u pszenicy zaś $53,4-121,1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$. Według tych autorów źdźbło ulega wyboczeniu, gdy jest zgięte w zbyt małą krzywiznę, a moment zginający przy złamaniu i sztywność są ściśle skorelowane. Wielkości te wykazują również zależność od zawartości suchej masy. Ponadto stwierdzono, że opór na zginanie wyliczony z modułu Younga i przekroju poprzecznego jest skorelowany ściśle z oporem na zginanie w polu. Podczas badań wyższe wartości korelacji stwierdzono dla źdźbła pszenicy, niższe natomiast dla jęczmienia.

Liczni badacze uznali sztywność jako odpowiednią wielkość charakteryzującą wytrzymałość źdźbła. Wyznaczając ten parametr dla źdźbła żyta (w procesie zginania 7-centymetrowych odcinków) stwierdzono, że sztywność zwiększa się wraz ze stadium rozwojowym rośliny i ze zwięks-

szającą się zawartością suchej masy /62/. Znaczną zmienność sztywności źdźbła pszenicy udowodniono po zastosowaniu preparatu odpornościowego "Emsuron" (chlorek chlorocholiny i mocznik) /54/. W tym przypadku sztywność wyznaczono zginając źdźbło w środku jego ciężkości. Analizując zmienność sztywności w funkcji siły stwierdzono, że wartość tego parametru jest znacznie mniejsza dla maksymalnej siły zginającej aniżeli dla siły działającej w zakresie odkształceń sprężystych /5/. Dużą rolę w tym przypadku odgrywa również wilgotność źdźbła, jednakże zależność ta nie jest liniowa. Wartość tego parametru przyjmuje minimum przy około 40% wilgotności źdźbła, poniżej zaś i powyżej tej wartości sztywność gwałtownie zwiększa się /67/. Wysoką korelację zanotowano również między sztywnością zginania a oporem na penetrację w powiązaniu ze średnicą źdźbła, która wpływała na zmienność tych parametrów /48/. Uznano, że sztywność w połączeniu ze średnicą międzywęźli jest jedną z dobrych metod oceny podatności roślin na wyleganie. Z kolei badania sztywności odcinków źdźbła pszenicy ozimej wyznaczonej w procesie zginania przy użyciu interferometru holograficznego wykazały zmienność tego parametru w różnych okresach rozwoju roślin od 1,18 do 27,33 $\times 10^3$ N/mm² /20/. Natomiast sztywność trzciny określona metodą drgań oscylacyjnych wzrastała wraz ze średnicą zewnętrzną w przedziale wartości 0,1-2 $\times 10^6$ N/mm² /43/. Według wielu autorów /8,34,55,62,63/ sztywność źdźbła jest parametrem istotnym z punktu widzenia cięcia swobodnego, ponieważ determinuje wielkość pracy w czasie tego procesu.

Charakterystyki wytrzymałościowe uzyskano również przez wyznaczenie naprężeń w procesie rozciągania i ścinania, stosując między innymi metodę standardową ASTM dla materiałów tekstylnych /6/. Określono w ten sposób granicę wytrzymałości na rozciąganie łodygi lucerny, która zawiera się w przedziale od 8,6 do 35,6 N/mm². Natomiast przy ścinaniu uzyskano wartości mieszczące się w granicach od 0,39 do 17,8 N/mm². Naprężenia niszczące dla obydwu charakterystyk wykazały odwrotnie proporcjonalną zależność od wilgotności, a wprost proporcjonalną od gęstości suchej masy /22/. Z kolei badania naprężeń niszczących przy rozciąganiu i ścinaniu międzywęźli trawy dowiodły występowanie maksymalnych wartości tego parametru w zakresie wilgotności 25-30%

oraz udowodniły wpływ celulozy na wzrost naprężeń rozciągających /1-3/. Inni autorzy wykazali zależność liniową między obciążeniem granicznym przy zginaniu a suchą masą /36,50/ oraz zmienność wartości siły niszczącej dla różnych gatunków roślin pastewnych w zależności od wilgotności /51/. Stwierdzono, że mimo występowania dużej zmienności materiału (łodygi lucerny, tymotki, owsa) istnieje możliwość przewidywania granicy wytrzymałości na zginanie, na podstawie liniowej gęstości łodyg tych roślin /50/. Badając naprężenia niszczące źdźbła pszenicy i żyta stwierdzono, że wytrzymałość na rozciąganie maleje w miarę spadku wilgotności poniżej 50% /9/. Z kolei maksymalne naprężenia zginające wyznaczone dla odcinków międzywęźli źdźbła żyta pozwoliły na uchwycenie zmian właściwości wytrzymałościowych spowodowanych działaniem regulatorów wzrostu /54/. W innych badaniach stwierdzono istotną ujemną korelację między stopniem wylegania a maksymalnym naprężeniem zginającym źdźbła jęczmienia /7,28,44/.

Zapoczątkowano również badania modelowe źdźbła zboża za pomocą metody elastooptycznej /32,33/. Scharakteryzowano przebieg naprężeń brzegowych w trzech różnych modelach poprzecznego przekroju źdźbła pszenicy z zachowaniem praw podobieństwa modelowego, uwzględniając moduły sprężystości i parametry geometryczne. Stwierdzono, że wartości badanych parametrów uzależnione są w dużym stopniu od budowy anatomicznej i morfologicznej źdźbła.

Z odpornością na wyleganie wiązano również siłę łamiącą źdźbła podstawowych zbóż /68/ i kukurydzy /30/, dokonując pomiaru 5-centymetrowych odcinków poszczególnych międzywęźli. Sugerowano, że metoda pomiaru siły łamiącej źdźbła może być przydatna w praktycznej selekcji hodowlanej. Istotną rolę w badaniach tego typu odgrywają cechy morfologiczne. Przy badaniach łodyg bawełny udowodniono liniową zależność między maksymalną siłą zginającą i promieniem przekroju poprzecznego w trzeciej potędze /12/.

Właściwości wytrzymałościowe określano również poprzez pomiar siły potrzebnej do zgniecia źdźbła. Metodę tę zastosowano przy selekcji w pracach hodowlanych /69/. Formy rodzicielskie charakteryzowały się średnią wytrzymałością na zgniatanie źdźbła 3120 N. Z otrzymanych

mieszkańców wybrano osobniki o najmniejszej i największej wytrzymałości na zgniatanie, poddając ten materiał dalszym pracom hodowlanym. Po 7 cyklach selekcji uzyskany materiał (pochodzący z linii najbardziej odpornych) wykazał zwiększoną o ponad sto procent wytrzymałość na zgniatanie /6671 N/. Porównując obydwie linie w doświadczeniach polowych stwierdzono, że formy o dużej wytrzymałości $\dot{\text{z}}$ dbła na zgniatanie są znacznie mniej podatne na wyleganie. Wyhodowane w ostatnich latach mieszance wykazują 2-3-krotnie wyższą odporność na wyleganie aniżeli formy wyjściowe sprzed 30 lat.

Na uwagę zasługują prace teoretyczne zmierzające do opisu i oceny właściwości mechanicznych $\dot{\text{z}}$ dbła zbóż. Analizowano stabilność $\dot{\text{z}}$ dbła pszenicy i przedstawiono teoretycznie wpływ zmienności przekroju poprzecznego, nieregularnego kształtu i siły wiatru na krytyczne odkształcenia i kształt deformacji /41/. Uwzględniono również dane doświadczalne dotyczące krytycznych obciążeń, krzywych odkształcenia i ty-pów ugięcia (sprężystego, sprężysto-plastycznego, plastycznego). Analiza ta pozwoliła przedstawić zachowanie się rośliny przy przyjętych parametrach oraz określić zmienność właściwości fizycznych w okresie dojrzewania pod kątem oceny stabilności $\dot{\text{z}}$ dbła. Rozpatrywano także $\dot{\text{z}}$ dbło jako konstrukcję mechaniczną z uwzględnieniem zmian zachodzących podczas wzrostu i rozwoju rośliny /29/. Ponieważ roślina i jej właściwości zmieniają się w czasie, wzięto pod uwagę krótkie przedziały czasowe i wprowadzono pojęcie mechanicznej odporności okresowej (ustalonej w dowolnej fazie wegetacji). Założono, że zmiany w roślinie są procesem ciągłym, więc odporność podczas całego okresu wegetacji ma co najmniej jedną wartość minimalną, którą nazwano odpornością krytyczną. Przy charakterystyce konkretnego materiału roślinnego proponowano uwzględnienie tzw. "okresu krytycznego". W rozważaniach wykorzystano stwierdzenie Eulera /64/ dotyczące wyboczenia sprężystego. Według tej teorii przy określonej smukłości pręta istnieje graniczna wartość osiowego obciążenia pionowego, przy którym pręt może utrzymać się w pozycji pionowej, siła krytyczna zaś jest funkcją modułu Younga, minimalnego momentu bezwładności i długości. Odporność $\dot{\text{z}}$ dbła określono poprzez tzw. współczynnik wylegania. Przeprowadzono ponadto obliczenia

statycznie obciążonego modelu źdźbła zboża, przyjmując metodę "sprężystych parametrów" stosowaną do obliczeń wytrzymałościowych cienkich prętów [37]. Jako model posłużyła ustawiona pionowo rurka prostosiowa o stałym przekroju poprzecznym i stałej sztywności na zginanie, której dolny koniec był utwierdzony, a górny swobodny poddawany obciążeniom. Wyznaczono teoretycznie linię ugięcia i przebieg naprężeń gnących wzdłuż osi modelu źdźbła obciążonego ciężarem kłosa, ciężarem własnym i siłą wiatru (założono, że moduł sprężystości wzdłużnej jest stały dla całego źdźbła). W efekcie zaproponowano uproszczoną metodę obliczeniową do oceny właściwości wytrzymałościowych źdźbła podczas działania rozpatrywanych obciążeń.

Przytoczony przegląd licznych metod i wyników badań właściwości mechanicznych źdźbła zbóż i łodyg innych roślin, wskazuje na dużą ich zmienność, determinowaną aktualnym stanem fizycznym rośliny oraz wieloma czynnikami wewnętrznymi i zewnętrznymi. W zależności od wytyczonego celu zajmowano się zarówno całym źdźbłem, jak i jego fragmentami, stosując różne metody pomiarów. W większości przypadków oceniono jedynie lokalną zmienność właściwości mechanicznych, a sporadycznie uwzględniono fazy rozwojowe roślin. Stąd też na podstawie dostępnych prac nie można wyciągnąć jednoznacznych wniosków, jasno precyzujących poszczególne elementy mechaniki źdźbła, chociaż stwierdzono pewne zależności między odpornością na wyłeganie a niektórymi jego parametrami mechanicznymi określanymi za pomocą metod uwzględniających przede wszystkim teorię klasycznej fizyki. Aktualny w dalszym ciągu problem wyłęgania zbóż zmusza więc niejako do dalszych poszukiwań, które przybliżyłyby poznanie zbożowych i wieloczynnikowych zagadnień, wiążących się zarówno z kształtowaniem właściwości fizycznych, jak i występującym zakresem zmienności parametrów wytrzymałościowych w czasie wzrostu i rozwoju roślin. Jakkolwiek procesy zginania, rozciągania i cięcia były często wykorzystywane w badaniach, to faktycznie mało jest znana charakterystyka wytrzymałościowa tego typu materiału. Uzasadnione zatem wydaje się prowadzenie badań w celu bliższego poznania zmienności parametrów mechanicznych na długości źdźbła z uwzględnieniem poszczególnych faz rozwojowych roślin.

3. ZASTOSOWANA METODA BADAŃ

3.1. Materiał i warunki badań

3.1.1. Materiał badawczy

Badania przeprowadzono na źdźbłach pszenicy ozimej odmiany Grana i Helenka, pochodzących z doświadczeń rejonizacyjnych Stacji Oceny Odmian w Czesławicach (woj. lubelskie) w latach 1974-1976. Doboru odmian pszenicy ozimej dokonano po konsultacji z hodowcami i specjalistami w zakresie uprawy roślin zbożowych. Badaniem współczynnika sprężystości źdźbła objęto zatem dwie odmiany: względnie odporną na wyleganie Granę i bardzo podatną Helenkę (wg oceny wylegania w skali 10-stopniowej). Jednocześnie dobór podyktowany został dużym udziałem tych odmian w strukturze zasiewów roślin zbożowych na terenie południowo-wschodniej Polski.

Badania przeprowadzono w czterech okresach fenologicznych począwszy od pełni kłoszenia, poprzez dojrzałość mleczną, woskową do pełnej. W każdej fazie pomiarami objęto po 30 źdźbeł (każdej odmiany) o długości odpowiadającej średniej wysokości łanu, a pochodzących ze środkowej części poletka doświadczalnego.

3.1.2. Czynniki agrotechniczne

Poletka doświadczalne zlokalizowane były na glebie brunatnej wytworzonej z lessu. Schemat doświadczeń, uprawę gleby oraz zabiegi agrotechniczne prowadzono zgodnie z instrukcją Centralnego Ośrodka Badania Odmian Roślin Uprawnych. W okresie badań nie stwierdzono żadnych odstępstw od zaplanowanych prac polowych, terminu i gęstości siewu oraz prac pielęgnacyjnych, w związku z czym stronę doświadczalną uznano za prowadzoną prawidłowo. Nawożenie NPK w poszczególnych latach ulegało jedynie minimalnym wahaniom (tab. 1).

Tabela 1. Nawożenie NPK poletek doświadczalnych pszenicy ozimej w Stacji Oceny Odmian w Czesławicach

Nawożenie	Lata badań		
	1973/74	1974/75	1975/76
N	60	60	60
P ₂ O ₅	80	70	80
K ₂ O	120	100	100

3.1.3. Podstawowe dane meteorologiczne

Dane dotyczące średnich temperatur powietrza i sumy opadów atmosferycznych w okresie wegetacji wiosenno-letniej w latach prowadzenia doświadczeń rejonizacyjnych w Stacji Oceny Odmian w Czesławicach zamieszczono w tabelach 2 i 3 na podstawie danych uzyskanych z miejscowej Stacji Klimatycznej. Podano w nich również - dla porównania - dane wieloletnie (1872-1971) z pobliskiej Stacji Klimatycznej IUNG w Puławach.

Tabela 2. Temperatura powietrza (w °C) w okresie prowadzenia doświadczeń rejonizacyjnych w Stacji Oceny Odmian w Czesławicach

Lata badań	Dekada	Miesiąc				
		III	IV	V	VI	VII
1973/1974	I	+0,3	+7,8	+9,5	+12,7	+14,6
	II	+5,1	+6,0	+13,0	+14,2	+16,9
	III	+6,3	+7,1	+11,9	+16,4	+16,5
	Średnia miesiąca	+4,0	+7,0	+11,5	+14,4	+16,0
1974/1975	I	+6,0	+8,0	+13,5	+12,1	+19,7
	II	+5,0	+4,8	+18,4	+18,1	+20,4
	III	+2,4	+8,4	+13,1	+18,5	+17,0
	Średnia miesiąca	+4,4	+7,1	+14,9	+16,2	+19,0
1975/1976	I	-2,8	+8,0	+10,6	+12,3	+15,5
	II	-2,9	+8,8	+12,4	+13,5	+19,1
	III	+0,5	+5,4	+12,2	+18,8	+20,1
	Średnia miesiąca	-1,6	+7,4	+11,7	+14,8	+18,3
Norma miesięczna na podstawie danych 1966-1975 z Czesławic		2,5	8,0	13,8	16,6	18,4
Norma miesięczna na podstawie danych wieloletnich (1872-1971) z Puław		1,5	7,9	13,6	17,0	18,6

Tabela 3. Suma opadów atmosferycznych (w mm) w okresie prowadzenia doświadczeń rejonizacyjnych Stacji Oceny Odmian w Czesławicach

Lata badań	Dekada	Miesiąc				
		III	IV	V	VI	VII
1973/1974	I	2,7	0,9	29,5	67,0	34,6
	II	3,6	2,4	6,4	71,4	58,7
	III	-	13,7	28,9	22,9	17,5
	suma	6,3	17,0	64,8	161,3	110,8
1974/1975	I	0,7	15,3	33,2	18,3	-
	II	7,2	39,3	27,6	41,2	30,6
	III	13,8	8,1	14,9	95,2	97,3
	suma	21,7	62,7	75,7	154,7	127,9
1975/1976	I	7,6	-	0,4	0,2	16,1
	II	4,9	5,5	14,9	37,3	15,1
	III	8,0	24,4	23,3	-	18,1
	suma	20,5	29,9	38,6	37,5	49,3
Norma miesięczna na podstawie danych 1966-1975 z Czesławic		26,8	51,0	69,2	110,7	85,3
Norma miesięczna na podstawie danych wieloletnich (1872-1971) z Puław		31,4	40,2	58,6	70,5	85,3

Dane dotyczące tych elementów meteorologicznych charakteryzują wilgotnościowe i ciepłe warunki wzrostu i rozwoju badanych roślin w poszczególnych latach. Jak wynika z zamieszczonych tabel, w 1974 r. suma opadów była zbliżona do średniej wieloletniej, natomiast w 1975 r. znacznie ją przewyższała, a w 1976 r. była o wiele niższa. Natomiast jeśli chodzi o warunki termiczne, to jedynie w 1975 r. były zbliżone do normy wieloletniej, w pozostałych zaś latach temperatury powietrza były niższe (największe odchylenie zaobserwowano w 1976 r.).

3.2. Opis aparatury i sposób przeprowadzania pomiarów

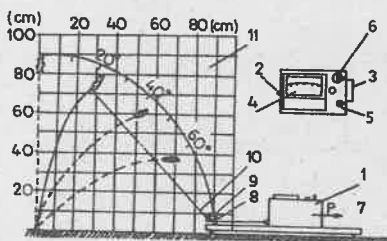
W celu określania parametrów mechanicznych i geometrycznych niezbędnych do wyznaczania współczynnika sprężystości źdźbła pszenicy ozimej zastosowano zestaw trzech aparatów prototypowych, opracowanych i wykonanych w Zakładzie Agrofizyki PAN w Lublinie. W skład zestawu pomiarowego wchodzi:

- elektrodynamometr polowy służący do pomiaru siły zginającej źdźbło w warunkach polowych,
- mikrozrywarka elektromagnetyczna przystosowana do pomiaru siły zginającej dowolny odcinek źdźbła,
- miernik przekroju łodygi służący do pomiaru zredukowanej średnicy zewnętrznej i wewnętrznej źdźbła,

Aparaty te zostały już opatentowane i są wykorzystywane w niektórych placówkach naukowych.

Elektrodynamometr polowy (rys. 1) składa się z elektronicznego dynamometru, prowadnicy i uzupełniającego wyposażenia.

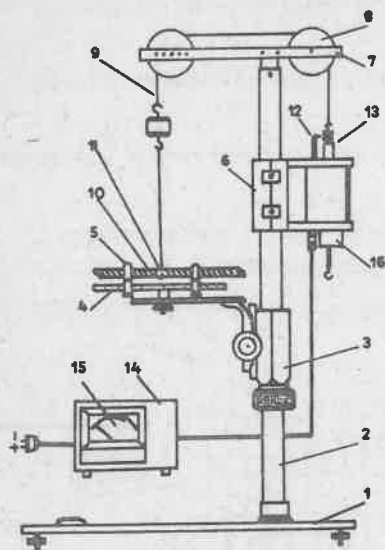
Elektroniczny dynamometr (1) ma zaczep (2) do linki odkształcającej źdźbło, uchwyt (3) do ręcznego przesuwu, wyskalowany w jednostkach siły miernik (4) oraz dwa zakresy pomiarowe: od 0 do 0,25 N (5) i od 0 do 50 N (6). Na prowadnicy (7) osadzony jest krążek obrotowy (8) i umieszczony na przecięciu jego średnic kątomierz (9), przy którym znajduje się dynamometr. Linkę dynamometru (10), przechodzącą



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego wraz z elektrodynamometrem polowym (opis w tekście)

od zaczepu poprzez krążek, mocuje się u nasady kłosa. Elektrodynamometr działa na zasadzie przetwornika pojemnościowego, w którym mierzona siła powoduje zmianę pojemności kondensatora, a jej wielkość jest odczytywana na mierniku wyskalowanym w jednostkach siły. W celu wyko-

niania pomiaru wartości siły zginającej źdźbło w warunkach polowych, prowadnicę elektrodynamometru umieszcza się przed źdźbłem rosnącym w polu, w odległości około 10% mniejszej od jego wysokości. Zginania źdźbła dokonuje się za pomocą linki (zamocowanej u nasady kłosa), poprzez ręczne przesuwanie dynamometru po prowadnicy i odczytuje się wartość siły. Umieszczony tuż za źdźbłem wyskalowany ekran (11) umożliwia pomiar wysokości rośliny, kąta działania siły i strzałki ugięcia, które to wielkości rejestruje się na taśmie filmowej w czasie pomiarów. Dokładność wyrażana współczynnikiem zmienności wynosi 7,38%.



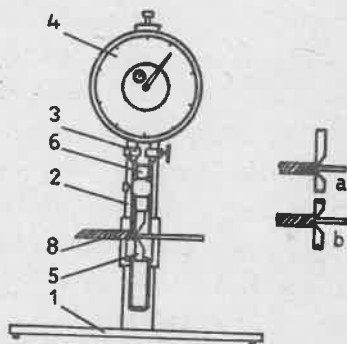
Rys. 2. Schemat mikrozrywarki elektromagnetycznej (opis w tekście)

Mikrozrywarka elektromagnetyczna (rys. 2) składa się ze statywu pomiarowego, zespołu sterującego oraz przystawki służącej do ustalania strzałki ugięcia. Statyw pomiarowy składa się z podstawy (1) i kolumny (2). Na kolumnie osadzone są: ruchomy stolik pomiarowy (3) z listwą (4) mającą przesuwane na dowolną odległość zaczepy do źdźbła (5), korpus mocujący obudowę elektromagnesu (6), a na szczycie poprzeczny wysięgnik (7) mocujący nieruchomy układ krążków (8), przez które przechodzi linka (9) odkształcająca źdźbło (10), zakończona uchwytem (11). Na płycie górnej obudowy cewki elektromagnesu znajduje się wskaźnik (12) określający skrajne położenie rdzenia (13). Rdzeń u dołu ma wydłużenie w postaci pręta zakończonego zaczepem do dodatkowego obciążenia układu przy pomiarach wartości oporów równoważonych siłą ponad 4 N. W skład zespołu sterującego (14) wchodzi układ elektroniczny i miernik z aretowaną wskazówką (15). Przystawka (16) z podziałką milimetrową służy do ustalenia dowolnej strzałki ugięcia w zakresie od 0 do 10 mm. Zasada działania polega na stopniowym wzroście prądu elektrycznego w obwodzie elektromagne-

su, co tym samym powoduje narastanie siły oddziałującej na umieszczony w cewce ruchomy rdzeń. Wartość prądu zasilającego górną cewkę elektromagnesu jest wskazywana na mierniku wyczechowanym w jednostkach siły. Zakres pomiarowy przyrządu wynosi od 0 do 4 N z możliwością jego zwiększenia do 300% poprzez obciążenie rdzenia.

Podczas wykonywania pomiarów siły zginającej, żdźbło znajduje się w zaczepach listwy pomiarowej. (rozstawionej w stałej odległości odpowiadającej długości badanego odcinka), do której przytwierdzono podporę umożliwiającą przeprowadzenie pomiarów bez zakłóceń, spowodowanych jego ciężarem. Zginanie odcinka żdźbła dokonuje się za pomocą uchwytu założonego w środku jego długości. W momencie odkształcenia żdźbła o ustaloną strzałkę ugięcia (5 mm) następuje aretowanie wskaźnika, a na mierniku odczytuje się wartość siły zginającej. Współczynnik zmienności dla tej metody wynosi 2,87%.

Miernik przekroju łodygi (rys. 3) składa się ze statywu i stożka pomiarowego. Statyw składa się z podstawy (1) i kolumny (2). Na kolumnie zamocowane jest jarzmo (3) z osadzonym na nim czujnikiem zegarowym (4), kowadełko (5), na którego ostrzu opiera się zakończony również ostrzem trzpień mierniczy czujnika (6). Na stożek pomiarowy (7) nasuwa się odcinek żdźbła (8) do oporu powodowanego ciężarem stożka w



Rys. 3. Schemat miernika przekroju łodygi (opis w tekście)

pozycji pionowej. Zakres pomiarowy przyrządu wynosi od 0 do 10 mm, a dokładność odczytu 0,01 mm. Stawiając ostrze przyrządu na krawędzi przeciętnego żdźbła odczytuje się wartość średnicy okręgu opisanego na przekroju poprzecznym żdźbła, tzn. zredukowanej średnicy zewnętrznej (rys. 3-a). Natomiast dokonując pomiaru na stożku tuż przy żdźbłie otrzymuje się wartość średnicy okręgu wpisanego w przekrój poprzeczny żdźbła, tzn. zredukowanej średnicy wewnętrznej (rys. 3-b). Współczynnik zmienności wynosi 3,41% przy pomiarze średnicy zewnętrznej i 6,35% przy wykonywaniu pomiaru średnicy wewnętrznej.

3.3. Zastosowanie rozważania teoretycznego do wyznaczania współczynnika sprężystości

Uzyskane z pomiarów dane dotyczą przede wszystkim wartości siły zginającej oraz podstawowych cech geometrycznych żdźbła. W celu wyznaczenia współczynnika sprężystości w procesie zginania żdźbła poszukiwano różnych rozwiązań teoretycznych, które w sposób przybliżony charakteryzowałyby ten parametr. Między innymi wyprowadzono wyrażenie w postaci całki eliptycznej pierwszego rodzaju, opierając się na teoretycznych założeniach Timoszenki [65], dotyczących ugięcia belki o duże kąty. Jednakże uzyskane wyniki wskazywały, że adaptowanie tej teorii do charakterystyki materiałów niejednorodnych, jakim jest żdźbło, daje wielkości nieporównywalne (przy różnych kątach ugięcia) oraz znaczny rozrzut wartości, powodowany prawdopodobnie warunkami brzegowymi, stosowanymi przy rozwiązywaniu całki, w wyrażeniu matematycznym opisującym zginanie. W rezultacie dalszych poszukiwań adaptowano teorię ugięcia belki o małe kąty, stosując odpowiednie rozważania teoretyczne [27, 65]. Pozwoliły one wystarczająco dokładnie wyznaczyć współczynnik sprężystości bez względu na wielkość kąta ugięcia żdźbła.

Omawiając przyjęte rozważania w celu wyznaczania współczynnika sprężystości całego żdźbła i jego odcinków przyjęto ujednolicone następujące symbole:

- P - siła zginania,
- $P^1 = P \cdot \cos \beta$,
- β - kąt działania siły,
- l - długość
- y - strzałka ugięcia,
- E - współczynnik sprężystości,
- $E \cdot J$ - sztywność,
- ϕ_z - zredukowana średnica zewnętrzna,
- ϕ_w - zredukowana średnica wewnętrzna,
- M_g, M_A - moment gnący,
- G_z - grubość ścianki.

W celu wyznaczenia współczynnika sprężystości dla odcinków żdźbła, zastosowano najbardziej zbliżoną do oceny tego typu materiału - teorię zginania belki sprężystej o przekroju kołowym, podpartej na dwóch końcach, gdzie siła skupiona działa w środku długości belki. Wówczas reakcje na podporach R_A i R_B są jednakowe i wynoszą $\frac{P}{2}$ (rys. 4).

Rozważamy przedział, w którym x zmienia się od 0 do $\frac{l}{2}$. Dla przyjętego układu osi x, y równanie momentu gnącego i osi ugiętej wyraża się następująco:

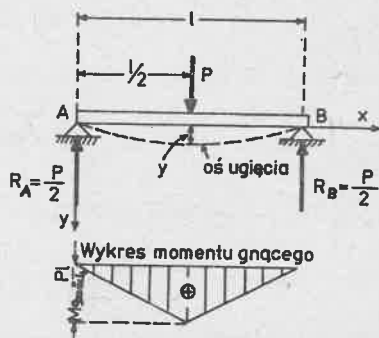
$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = - Mg, \quad (1)$$

gdzie

$$Mg = \frac{P}{2} x,$$

wówczas

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = - \frac{P}{2} x.$$



Rys. 4. Wykres dotyczy teorii zginania belki podpartej na dwóch końcach

Następnie rozwiązujemy równanie różniczkowe drugiego stopnia, a więc w tym celu dwukrotnie je całkujemy

$$EJ \frac{dy}{dx} = - \frac{P}{2} \frac{x^2}{2} + C$$

$$EJy = - \frac{P}{2} \frac{x^3}{3} + Cx + D \quad (2)$$

Uzyskujemy warunki brzegowe

1) $Y_x = 0$ stąd $D=0$

- warunek ten wynika z braku ugięcia na podporze,

2) $\frac{dy}{dx} x = \frac{1}{2} = 0$

- pochodna wynosi 0, ponieważ w środku długości belki występuje minimum.

z tego

$$-\frac{P}{4} x^2 + C = 0,$$

$$C = \frac{Pl^2}{16}.$$

Z kolei wstawiamy C i D do równania (2) i wówczas otrzymujemy

$$EJy = -\frac{P}{12} x^3 + \frac{Pl^2}{16} x,$$

dla $x = \frac{l}{2},$

$$EJy = -\frac{P}{12} \cdot \frac{l^3}{8} + \frac{Pl^3}{32} = \frac{Pl^3}{48},$$

stąd ugięcie y belki wyraża się wzorem

$$y = \frac{Pl^3}{48EJ}. \quad (3)$$

Przekształcając wzór (3), uzyskujemy wyrażenie dla współczynnika sprężystości.

$$E = \frac{Pl^3}{48yJ}. \quad (4)$$

Moment bezwładności wyrażony jest wzorem:

$$J = \frac{\pi}{64} (\phi_z^4 - \phi_w^4). \quad (5)$$

Wielkości geometryczne (średnice) mierzono w punkcie przyłożenia siły zginającej t w środku długości odcinka. Wielkości te pozwoliły jednocześnie wyznaczyć grubość ścianki żdźbła:

$$G_z = \frac{\phi_z - \phi_w}{2} \quad (6)$$

Znajomość tego parametru jest konieczna z kolei do określenia zależności między sprężystością żdźbła a jego parametrami geometrycznymi.

Do wyznaczania współczynnika sprężystości całego żdźbła zastosowano teorię zginania belki sprężystej o przekroju kołowym, podpartej na jednym końcu. Siła zginająca P działa na końcu belki o długości l (rys. 5).

Z warunków równowagi wyznaczamy

$$R = P, \quad M_A = P \cdot l.$$

Dla przyjętego układu osi x, y moment gnący wyraża się na całej długości belki jednym równaniem

$$M_g = -M_A + R \cdot x,$$

$$M_g = -Pl + P \cdot x.$$

Stąd też równanie różniczkowe osi ugiętej przybiera postać

$$EJ \frac{d^2 y}{dx^2} = P \cdot x, \quad (7)$$

które dwukrotnie całkujemy i uzyskujemy:

$$EJ \frac{dy}{dx} = Plx - P \frac{x^2}{2} + C,$$

$$EJy = Pl \frac{x^2}{2} - P \frac{x^3}{6} + Cx + D. \quad (8)$$

W miejscu utwierdzenia A ugięcie i kąt nachylenia osi ugiętej są równe zero. Uzyskujemy wówczas dwa warunki brzegowe

$$y_{x=0} = 0 \quad \text{i} \quad \left(\frac{dy}{dx} \right)_{x=0} = 0, \quad \text{z których wyznaczamy stałe całkowania}$$

$$C = 0 \quad \text{i} \quad D = 0,$$

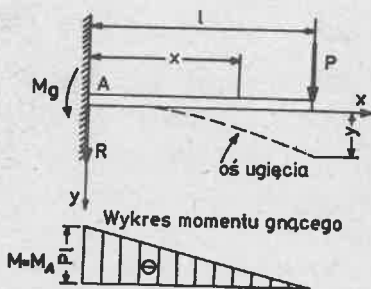
Ostatecznie otrzymujemy ze wzoru (8) wyrażenie na ugięcie y belki

$$y = \frac{Pl}{6EJ} x^2, \left(3 - \frac{x}{l} \right),$$

natomiast dla $x = l$ w punkcie B ugięcie wyraża się

$$y = \frac{Pl^3}{3EJ}. \quad (9)$$

Przekształcając wzór (7) wyznaczamy współczynnik sprężystości belki:



Rys. 5. Wykres dotyczy teorii zginania belki podpartej na jednym końcu

$$E = \frac{Pl^3}{3yJ} \quad (10)$$

Adaptując wzór (10) do badań sprężystości źdźbła stosujemy nieco inne oznaczenia zgodnie z przyjętą metodyką pomiarów. Wówczas współczynnik sprężystości wyraża się wzorem:

$$E = \frac{P'l^3}{3yJ'} \quad (11)$$

Teoria ta stosowana jest do ugięcia belki o małe kąty. Natomiast średni moment bezwładności przy badaniu całego źdźbła wyznaczono na podstawie wartości charakteryzujących jego odcinki.

3.4. Zakres badań

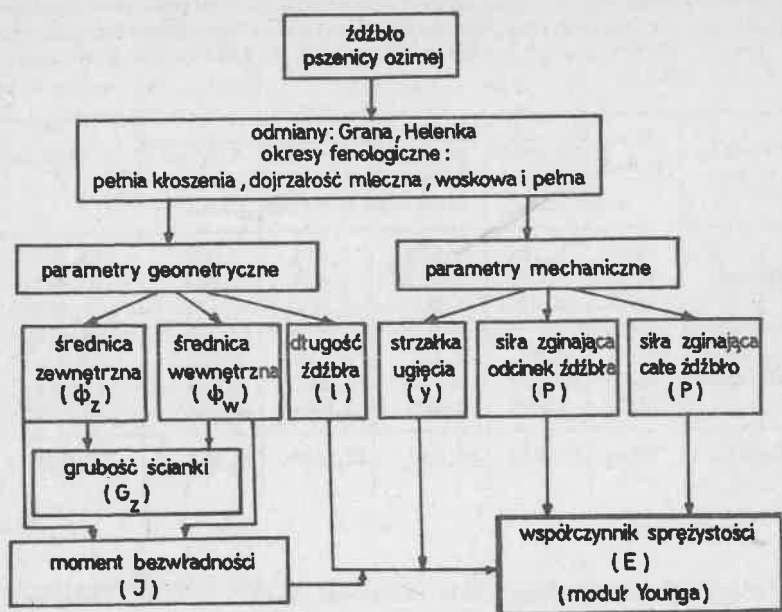
Uzyskane z pomiarów dane liczbowe wykorzystano do wyznaczenia współczynnika sprężystości źdźbła (stosując przyjęte rozważania teoretyczne), a otrzymane wyniki opracowano statystycznie. Ogółem analizie statystycznej poddano prawie 64 000 danych (tab. 4). Przeprowadzono analizy wariancji dla klasyfikacji podwójnych, stosując model nieortogonalny. Porównywano istotność różnic pomiędzy odmianami, okresami dojrzalności, kątami ugięcia źdźbła i latami badań. Wartości funkcji testowych F^0 uzyskane z analiz wariancji porównywano z wartościami granicznymi $F_{0,05}$ odczytanymi z tablic F-Snedecora. Dalsze wnioskowanie przeprowadzono za pomocą półprzedziałów ufności Duncana. W celu opisu zmienności współczynnika sprężystości na długości źdźbła, przyjęto parabolę o równaniu $y = a + bx + cx^2 + \frac{e}{x}$ jako funkcję najbardziej zbliżoną do krzywej doświadczalnej. Natomiast zmienność parametrów geometrycznych (średnica zewnętrzna i grubość ścianki) wzdłuż źdźbła scharakteryzowano wielomianem: $y = a + bx + cx^2 + dx^3$. Obliczono także współczynniki korelacji pomiędzy współczynnikiem sprężystości, siłą zginającą a parametrami geometrycznymi źdźbła.

Wybrane dwie odmiany pszenicy badano w czterech okresach fenologicznych zachowując zawsze ten sam cykl pomiarów i jednakową ilość powtórzeń. Identyfikacji poszczególnych faz fenologicznych dokonywano przy współudziale specjalistów z zakresu hodowli roślin.

Tabela 4. Liczebność danych z badań polowych i laboratoryjnych źdźbła dwóch odmian pszenicy ozimej przyjętych do analizy statystycznej

Odmiany	Lata badań	Okresy dojrzałości				Ogółem
		pełnia kłoszenia	dojrzałość mlec zna	dojrzałość woskowa	dojrzałość pełna	
Grana	1974	2,764	2,685	2,271	3,035	10,755
	1975	3,075	2,941	2,989	1,962	10,967
	1976	2,210	1,900	1,560	2,175	7,845
Helenka	1974	3,867	3,157	2,717	3,333	13,074
	1975	3,572	3,042	2,947	2,411	11,972
	1976	2,495	2,305	2,075	2,445	9,320
Ogółem	1974-1976	17,983	16,030	14,559	15,361	63,933

Pierwszy etap każdego cyklu obejmował pomiary polowe. Określano siłę powodującą ugięcie źdźbła od 20 do 70 stopni (co 10 stopni), fotografowano kolejne jego położenie (rys. 1) i w efekcie wyznaczono wartości współczynnika sprężystości według wzoru 11. Badania te prowadzono w latach 1974-1975. Po zakończeniu pomiarów polowych wycinano u podstawy te same źdźbła, numerowano je i umieszczano w pojemnikach foliowych (w celu zachowania wilgotności). Drugi etap obejmował badania laboratoryjne, rozpoczynające się od pomiarów morfologicznych (długość całkowita; długość międzywęźli). Wówczas też zaznaczono 6-centymetrowe odcinki w kolejności od kłosa do podstawy źdźbła i wykonywano pomiary siły zginającej za pomocą mikrozrywarki elektromagnetycznej (w latach 1974-1976). Bezpośrednio po tych badaniach źdźbło przecinano w miejscach, gdzie działała siła zginająca i dokonywano pomiaru średnicy zewnętrznej i wewnętrznej za pomocą miernika przekroju łodygi. Z kolei korzystając z przyjętej teorii (wzór 4) wyznaczono wartości współczynnika sprężystości poszczególnych odcinków źdźbła oraz grubość jego ścianki (wg wzoru 6). Schemat blokowy zakresu badań przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy zakresu badań

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Charakterystyka współczynnika sprężystości i żółbta na podstawie badań polowych

Na podstawie wyników badań polowych stwierdzono, że wielkość kąta ugięcia żółbta w przedziale od 40 do 50 stopni nie ma istotnego wpływu na zmienność wartości współczynnika sprężystości. Jak wynika z analizy statystycznej (tab. 5-11), wartości uzyskane dla odmiany Grana w konkretnych fazach fenologicznych nie wykazały przy porównaniach istotnych różnic nawet w pełnym zakresie ugięcia żółbta, tj. od 20 do 70 stopni, chociaż zauważono pewne zróżnicowanie tych wielkości, co jest spowodowane niewątpliwie niejednorodnością badanego materiału. Z kolei odmiana Helenka wykazywała znacznie większą zmienność pod tym względem i

między najmniejszymi a największymi ugięciami *śdźbła* stwierdzono istotne różnice.

Uzyskane średnie wartości współczynnika sprężystości dla *śdźbła* odmiany Grana zawierają się w przedziale 1818-3760 N/mm², przy czym w 1974 r. w granicach 1341-3421 N/mm², w 1975 r. zaś w przedziale

Tabela 5. Wartości funkcji testowych uzyskanych w analizie wariancji (na podstawie danych z badań polowych)

Odmiana		Funkcja testowa	Lata badań	
			1974	1975
Grana	kąty ugięcia (A)	F^0 $F_{0,05}$	0,387 4,37	1,301 2,22
	okresy dojrzałości (B)	F^0 $F_{0,05}$	20,892 2,62	40,753 2,61
	interakcja (AB)	F^0 $F_{0,05}$	0,133 2,08	0,527 2,08
Helenka	kąty ugięcia (A)	F^0 $F_{0,05}$	5,262 2,22	2,748 2,22
	okresy dojrzałości (B)	F^0 $F_{0,05}$	10,191 2,61	45,796 2,61
	interakcja (AB)	F^0 $F_{0,05}$	0,347 2,08	0,576 2,08

2371-4099 N/mm². Zróżnicowanie to aczkolwiek nie poszerza w poszczególnych latach granic między skrajnymi wartościami (sięgających 2000 N/mm²), to jednak w okresie wegetacji wiosenno-letniej o dużej ilości opadów (1975) bezwzględne wartości współczynnika istotnie wzrastają. Można by stąd wnioskować, że obfite opady atmosferyczne jednoznacznie powodują zwiększenie sprężystości *śdźbła*. Analizując zróżnicowanie między fazami fenologicznymi udowodniono, że najniższe wartości współczynnika sprężystości związane są z okresem kłosaenia, najwyższe zaś z chwilą uzyskania przez rośliny dojrzałości i pełnej.

Tabela 6. Wartości funkcji testowych uzyskanych w analizie wariancji
(na podstawie danych z badań polowych)

	Funkcja testowa	Lata badań	
		1974	1975
Odmiany (A)	F^0	12,642	75,118
	$F_{0,05}$	3,84	3,84
Okresy dojrzałości (B)	F^0	37,759	205,998
	$F_{0,05}$	2,60	2,60
Interakcja (AB)	F^0	9,842	6,223
	$F_{0,05}$	2,60	2,60

Tabela 7. Średnie wartości współczynnika sprężystości (N/mm^2) źdźbła pszenicy ozimej Grana przy różnych kątach ugięcia w warunkach polowych

Okres dojrzałości	Kąt ugięcia	Lata badań		Średnia 1974-1975
		1974	1975	
Pełnia kłoszenia	20	2,010	2,104	2,061
	30	1,821	2,091	1,966
	40	1,654	1,977	1,828
	50	1,459	1,907	1,701
	60	1,417	1,850	1,656
	70	1,688	1,829	1,766
Średnia	20-70	1,677	1,960	1,818
Dojrzałość mleczna	20	1,560	2,371	1,972
	30	1,531	2,531	2,040
	40	1,442	2,720	2,092
	50	1,271	2,849	2,073
	60	1,192	2,917	2,055
	70	0,981	3,098	1,948
Średnia	20-70	1,341	2,726	2,033
Dojrzałość woskowa	20	2,449	2,568	2,497
	30	2,591	2,658	2,618
	40	2,537	2,824	2,652
	50	2,434	3,040	2,691
	60	2,562	3,087	2,802
	70	2,532	3,511	2,996
Średnia	20-70	2,516	2,929	2,722
Dojrzałość pełna	20	3,598	3,737	3,650
	30	3,710	3,804	3,745
	40	3,271	3,939	3,526
	50	3,255	4,221	3,641
	60	3,520	4,457	3,890
	70	2,614	4,821	3,765
Średnia	20-70	3,421	4,099	3,760

Tabela 8. Średnie wartości współczynnika sprężystości (N/mm^2) żdźbła pszenicy ozimej Helenka przy różnych kątach ugięcia w warunkach polowych

Okres dojrzałości	Kąt ugięcia	Lata badań		Średnia 1974-1975
		1974	1975	
Pełnia kłoszenia	20	1,738	2,314	2,020
	30	1,686	2,467	2,062
	40	1,687	2,656	2,153
	50	1,695	2,849	2,250
	60	1,780	3,186	2,456
	70	2,228	3,134	2,672
Średnia	20-70	1,801	2,765	2,283
Dojrzałość mleczna	20	1,721	2,790	2,214
	30	1,954	2,877	2,381
	40	2,097	2,965	2,498
	50	2,224	3,147	2,667
	60	2,593	3,374	2,976
	70	3,516	3,520	3,518
Średnia	20-70	2,326	3,109	2,717
Dojrzałość woskowa	20	1,977	2,488	2,218
	30	1,918	2,546	2,236
	40	2,160	2,825	2,432
	50	2,390	3,073	2,740
	60	2,527	4,053	3,281
	70	3,494	4,296	3,894
Średnia	20-70	2,426	3,203	2,835
Dojrzałość pełna	20	2,382	2,439	2,402
	30	2,878	2,768	2,805
	40	3,021	3,020	3,052
	50	3,866	3,983	4,071
	60	3,932	4,682	4,253
	70	4,747	8,350	6,652
Średnia	20-70	3,456	4,197	3,789

Tabela 9. Istotność różnic między średnimi wartościami współczynnika sprężystości *żdźbła* odmiany Helenka dla poszczególnych kątów ugięcia

Kąty ugięcia (w stopniach)	Lata badań		
	1974	1975	1974-1975
20-30	0	0	0
20-40	0	0	0
20-50	0	0	0
20-60	0	+	+
20-70	+	+	+
30-40	0	0	0
30-50	0	0	0
30-60	0	0	0
30-70	+	+	+
40-50	0	0	0
40-60	0	0	0
40-70	+	0	0
50-60	0	0	0
50-70	+	0	0
60-70	+	0	+

gdzie: + - różnica istotna na korzyść pierwszego kąta ugięcia,
 - - różnica istotna na korzyść drugiego kąta ugięcia,
 0 - brak różnic potwierdzonych statystycznie.

Otrzymane średnie wartości współczynnika sprężystości *żdźbła* odmiany Helenka zawierają się w granicach 2283-3789 N/mm², a w kolejnych latach zmieniają się odpowiednio od 1801 do 3456 N/mm² i od 2765 do 4197 N/mm². Również w tym przypadku stwierdzono wyraźny wpływ nadmiernej ilości opadów atmosferycznych w roku 1975 na zwiększenie sprężystości *żdźbła*. Przedział między granicznymi wartościami współczynnika oscyluje wokół wielkości 1500 N/mm² w obydwu latach. Stadium rozwoju roślin również bardzo wyraźnie wpływa na zmienność sprężystości *żdźbła*, która najniższe wartości współczynnika wykazuje w czasie kłoszenia, a najwyższe podczas dojrzałości pełnej.

Tabela 10. Istotność różnic pomiędzy średnimi wartościami współczynnika sprzężystości źdźbła pszenicy ozimej dla kolejnych okresów dojrzałości w latach 1974-1975

Okresy dojrzałości	Lata badań					
	1974			1975		
	Odmiany					
	Grana	Helenka	Grana	Helenka	Grana	Helenka
Pełnia kłoszenia-dojrzałość mleczna	+	+	-	-	+	-
Pełnia kłoszenia-dojrzałość woskowa	-	-	-	-	-	-
Pełnia kłoszenia-dojrzałość pełna	-	-	-	-	-	-
Dojrzałość mleczna-dojrzałość woskowa	-	+	-	-	-	-
Dojrzałość mleczna-dojrzałość pełna	-	-	-	-	-	-
Dojrzałość woskowa-dojrzałość pełna	-	+	-	-	-	-

gdzie: + - różnica istotna na korzyść pierwszego okresu,
 - - różnica istotna na korzyść drugiego okresu,
 0 - brak różnic potwierdzonych statystycznie.

Tabela 11. Istotność różnic pomiędzy średnimi wartościami współczynnika sprężystości i żdźbła odmian pszenicy ozimej Grana i Helenka

Odmiany	Okresy dojrzałości				Lata badań
	pełnia kłoszenia	dojrzałość mleczna	dojrzałość woskowa	dojrzałość pełna	
Grana - Helenka	-	+	-	-	1974
	-	-	-	-	1975
	-	-	-	-	1974-1975

gdzie: + - różnica istotna na korzyść pierwszej odmiany,

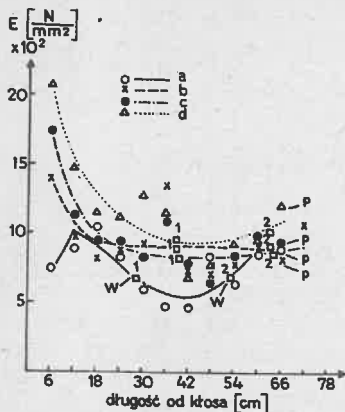
- - różnica istotna na korzyść drugiej odmiany,

0 - brak różnic potwierdzonych statystycznie.

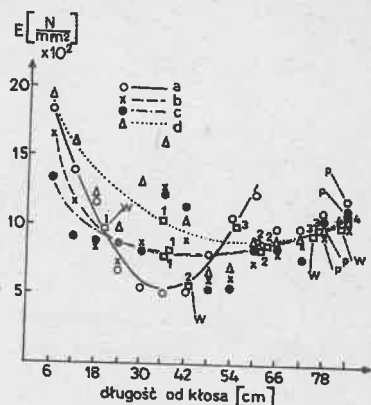
Porównując obydwie odmiany stwierdzono istotne różnice między nimi. Znacznie większą sprężystość wykazała odmiana Helenka aniżeli Grana. Udowodniono tym samym, że najniższe wartości tego parametru wiążą się z krótszym żdźbłem odmiany mniej wylegającej. Istotne różnice między latami i okresami fenologicznymi świadczą z kolei o dużej zmienności właściwości sprężystych żdźbła w okresie rozwoju i dojrzwania roślin, tj. począwszy od kłoszenia do zbioru.

4.2. Charakterystyka współczynnika sprężystości żdźbła na podstawie badań laboratoryjnych

Zmienność współczynnika sprężystości na długości żdźbła odmiany Grana zamyka się w przedziale średnich wartości od 412 do 1973 N/mm², przy czym nie występują tak duże różnice między latami, jak w czasie badań polowych, kiedy to zginano całe żdźbło (rys. 7-9). Przebieg zmienności tego parametru wzdłuż żdźbła - charakteryzowany za pomocą krzywych regresji - wykazał, że największą sprężystość mają pierwsze odcinki żdźbła tuż pod kłosem, najmniejsze zaś współczynniki sprężystości występują powyżej drugiego węzła w początkowych fazach fenologicznych i powyżej trzeciego węzła w późniejszych okresach dojrzałości roślin. Charakter przebiegu krzywych regresji jest podobny we wszystkich okre-



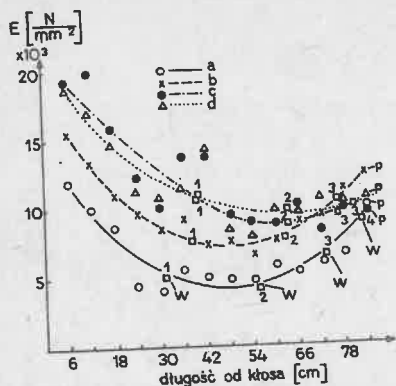
Rys. 7. Rozkład wartości współczynnika sprężystości na długości źdźbła pszenicy ozimej Grana w kolejnych fazach fenologicznych w 1974 r. (p - punkt pomiaru, w - węzeł, a - pełnia kłoszenia, b - dojrzałość mleczna, c - dojrzałość woskowa, d - dojrzałość pełna, 1-4 położenia kolejnych węzłów)



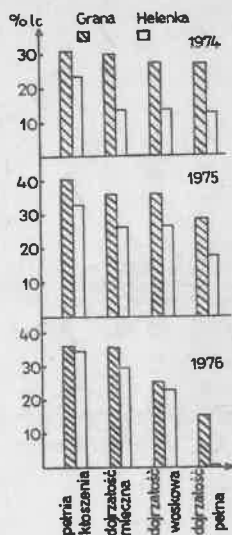
Rys. 8. Rozkład wartości współczynnika sprężystości na długości źdźbła pszenicy ozimej Grana w kolejnych fazach fenologicznych w 1975 r. (objaśn. jak pod rys. 7)

sach fenologicznych, natomiast duże różnice występują między poszczególnymi krzywymi. Podobnie jak w badaniach polowych najmniejszą sprężystością charakteryzowało się źdźbło w pełni kłoszenia, a największą w okresie dojrzałości pełnej. Na podstawie średnich granicznych wartości stwierdzono, że największa zmienność sprężystości źdźbła występowała w roku o znacznym niedoborze opadów atmosferycznych (1976), natomiast najbardziej zawężony przedział wartości zanotowano w 1974 r., kiedy to opady kształtowały się w pobliżu normy.

Zauważono, że minimalne wartości współczynnika sprężystości na długości źdźbła są uzależnione od stanu rozwoju i dojrzewania rośliny. Przyjmując wysokość źdźbła w skali procentowej stwierdzono, że minimum obniża się do jego podstawy wraz z dojrzewaniem i w latach 1974-1976 wynosi 30%-40% w pełni kłoszenia, 33,3%-35,8% w okresie dojrza-



Rys. 9. Rozkład wartości współczynnika sprężystości długości źdźbła pszenicy ozimej Grana w kolejnych fazach fenologicznych w 1976 r. (objaśn. jak rys. 7)



Rys. 10. Położenie minimum współczynnika sprężystości na długości źdźbła pszenicy ozimej (w wartościach względnych) w poszczególnych fazach fenologicznych w latach 1974-1976

łości mlecznej 15,4%-35,8% w woskowej i 15,4%-28,6% w pełnej (rys.10). Należy przypuszczać, że jest to związane z systematycznym wzrostem ciężaru kłosa i zmianami biochemicznymi w źdźble.

Jak wynika z analizy statystycznej uwzględniającej wszystkie wartości ci współczynnika sprężystości na długości źdźbła, występujące różnice między poszczególnymi fazami fenologicznymi są istotne i w pełni potwierdzają udowodnioną zmienność sprężystości (tab. 12-17).

Właściwości sprężyste źdźbła pozostają w ścisłym związku z jego parametrami geometrycznymi, tj. ze zredukowaną średnicą zewnętrzną i grubością ścianki. Średnie wartości średnicy zewnętrznej obejmują bardzo szeroki przedział 1,94-4,21 mm, a zmienność ta związana jest przede wszystkim z budową źdźbła. W mniejszym stopniu natomiast zależy od

Tabela 12. Wartości funkcji testowych uzyskanych w analizie wariancji (na podstawie danych z badań laboratoryjnych)

	Funkcja testowa	Okresy dojrzałości			
		pełnia kłoszenia	dojrzałość mleczna	dojrzałość woskowa	dojrzałość pełna
Odmiany (A)	F^0	30,703	109,023	34,092	227,814
	$F_{0,05}$	3,84	3,84	3,84	3,84
Lata badań (B)	F^0	87,897	20,264	9,731	85,449
	$F_{0,05}$	2,99	2,99	2,99	2,99
Interakcja (AB)	F^0	8,485	21,368	58,522	84,816
	$F_{0,05}$	2,99	2,99	2,99	2,99

Tabela 13. Wartość funkcji testowych uzyskanych w analizie wariancji (na podstawie danych z badań laboratoryjnych)

	Funkcja testowa	Odmiany	
		Grana	Helenka
Okresy dojrzałości (A)	F^o	15,162	101,782
	$F_{0,05}$	2,60	2,99
Lata badań (B)	F^o	25,024	76,929
	$F_{0,05}$	2,99	2,60
Interakcja (AB)	F^o	50,995	163,217
	$F_{0,05}$	2,01	2,01

Tabela 14. Średnie wartości współczynnika sprężystości (N/mm^2) źdźbła pszenicy ozimej na podstawie badań laboratoryjnych

Odmiany	Lata badań	Okresy dojrzałości			
		pełnia kłoszenia	dojrzałość mleczna	dojrzałość woskowa	dojrzałość pełna
Grana	1974	775	944	1,108	1,202
	1975	956	989	1,116	1,208
	1976	662	923	1,154	1,177
Średnia	1974-1976	798	956	1,128	1,197
Helenka	1974	1,103	1,194	1,345	1,260
	1975	1,391	1,113	1,620	2,092
	1976	992	1,144	1,490	1,322
Średnia	1974-1976	1,151	1,182	1,485	1,552

Tabela 15. Istotność różnic między średnimi wartościami współczynnika sprężystości żdźbła pszenicy ozimej dla kolejnych okresów dojrzałości (na podstawie badań laboratoryjnych)

Okresy dojrzałości	Odmiany					
	1974		1975		1976	
	Grana	Helenka	Grana	Helenka	Grana	Helenka
Pełnia kłoszenia-dojrzałość mleczna	-	0	0	+	-	-
Pełnia kłoszenia-dojrzałość woskowa	-	-	-	-	-	-
Pełnia kłoszenia-dojrzałość pełna	-	-	-	-	-	-
Dojrzałość mleczna-dojrzałość woskowa	-	-	-	-	-	-
Dojrzałość mleczna-dojrzałość pełna	-	0	-	-	-	-
Dojrzałość woskowa-dojrzałość pełna	-	0	-	-	0	+

gdzie: + - różnica istotna na korzyść pierwszego okresu,
 - - różnica istotna na korzyść drugiego okresu,
 0 - brak różnic potwierdzonych statystycznie.

Tabela 16. Istotność różnic pomiędzy średnimi wartościami współczynnika sprężystości źdźbła pszenicy ozimej dla kolejnych okresów dojrzałości (na podstawie badań laboratoryjnych)

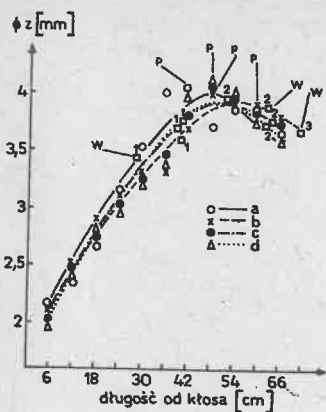
Odmiany	Okresy dojrzałości				Lata badań
	pełnia kłoszenia	dojrzałość mleczna	dojrzałość woskowa	dojrzałość pełna	
Grana-Helenka	-	-	-	0	1974
Grana-Helenka	-	-	-	-	1975
Grana-Helenka	-	-	-	-	1976
Grana-Helenka	-	-	-	-	1974-1976

gdzie: - - różnica istotna na korzyść drugiej odmiany,
0 - brak różnic potwierdzonych statystycznie.

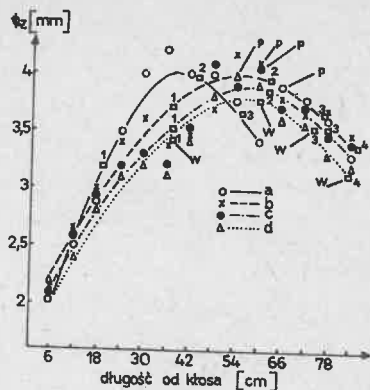
Tabela 17. Istotność różnic między średnimi wartościami współczynnika sprężystości źdźbła pszenicy ozimej dla kolejnych okresów dojrzałości (na podstawie badań laboratoryjnych)

Lata badań	Odmiany	Fazy fenologiczne			
		pełnia kłoszenia	dojrzałość mleczna	dojrzałość woskowa	dojrzałość pełna
1974-1975	Grana Helenka	-	0	0	0
		-	-	-	-
1975-1976	Grana Helenka	+	0	-	0
		+	-	+	+
1974-1976	Grana Helenka	+	0	-	0
		0	+	0	-

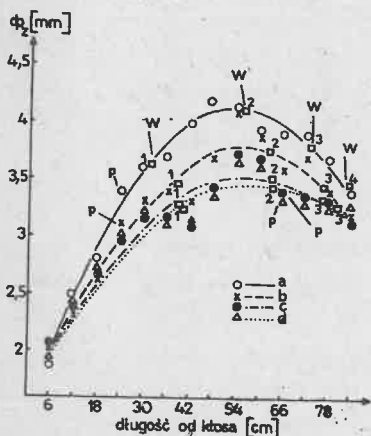
wpływu czynników atmosferycznych w poszczególnych latach. Przedstawione krzywe regresji (rys. 11-13) wskazują jednoznacznie, że parametr ten gwałtownie wzrasta od kłosa do drugiego węzła, czyli do jednej trzeciej



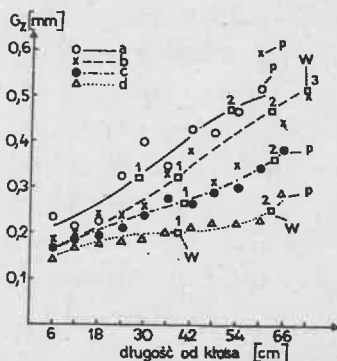
Rys. 11. Zmienność wartości charakteryzujących średnicę zewnętrzną źdźbła pszenicy ozimej Grana z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1974 r. (objaśn. jak na rys. 7)



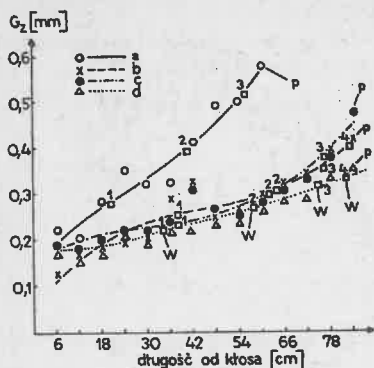
Rys. 12. Zmienność wartości charakteryzujących średnicę zewnętrzną źdźbła pszenicy ozimej Grana z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1975 r. (objaśn. jak na rys. 7)



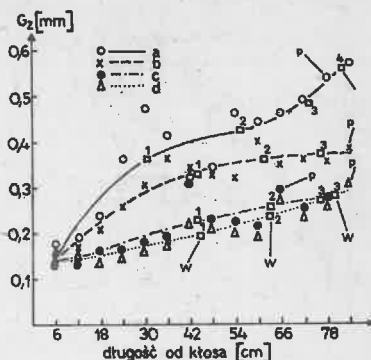
Rys. 13. Zmienność wartości charakteryzujących średnicę zewnętrzną źdźbła pszenicy ozimej Grana z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1976 r. (objaśn. jak na rys. 7)



Rys. 14. Zmienność wartości charakteryzujących grubość ścianki źdźbła pszenicy ozimej Grana z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1974 r. (objaśn. jak pod rys. 7).



Rys. 15. Zmienność wartości charakteryzujących grubość ścianki żdźbła pszenicy ozimej Grana z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1975 r. (objaśn. jak pod rys. 7)

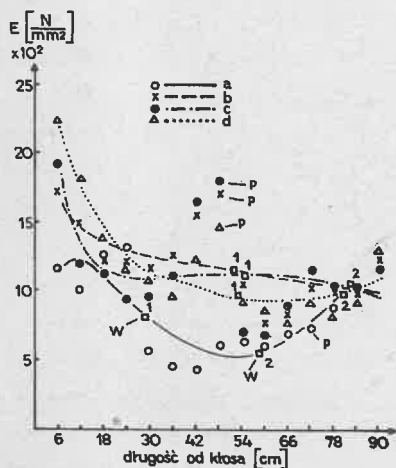


Rys. 16. Zmienność wartości charakteryzujących grubość ścianki żdźbła pszenicy ozimej Grana z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1976 r. (objaśn. jak pod rys. 7)

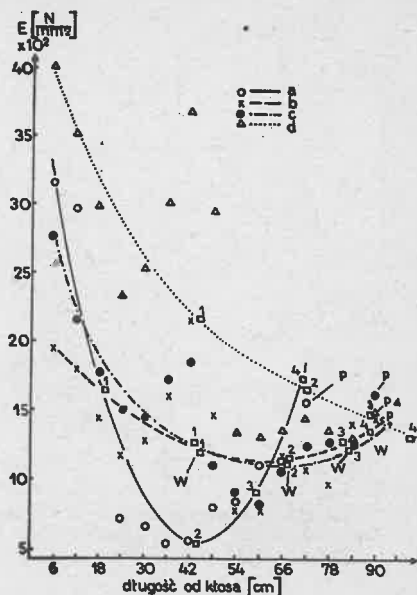
wysokości żdźbła. Poniżej zaś tego miejsca średnica zewnętrzna żdźbła łagodnie, ale systematycznie zmniejsza się. Najmniejsze różnice między poszczególnymi okresami fenologicznymi wystąpiły w 1974 r., kiedy to rozkład opadów atmosferycznych był zbliżony do normy, największe zaś zanotowano w 1976 r. cechującym się znacznymi niedoborami opadów w okresie wiosenno-letnim. Podobną prawidłowość stwierdzono przy charakterystyce współczynnika sprężystości.

Grubość ścianki żdźbła pszenicy Grana wzrasta od kłosa ku podstawie i obejmuje przedział wartości 0,14-0,60 mm. Przedstawione krzywe regresji (rys. 14-16) dla poszczególnych okresów fenologicznych rozcho-
dzą się jak gdyby promieniście od kłosa, zwiększając znacznie różnice między średnimi wartościami charakteryzującymi dalsze odcinki żdźbła. Bardzo małe zróżnicowanie wystąpiło między dojrzałością mleczną, woskową i pełną w 1975 r., gdy opady atmosferyczne przekraczały normę.

Znacznie wyższe wartości współczynnika sprężystości charakteryzują żdźbło odmiany Helenka w porównaniu z Graną. Zmienność średnich



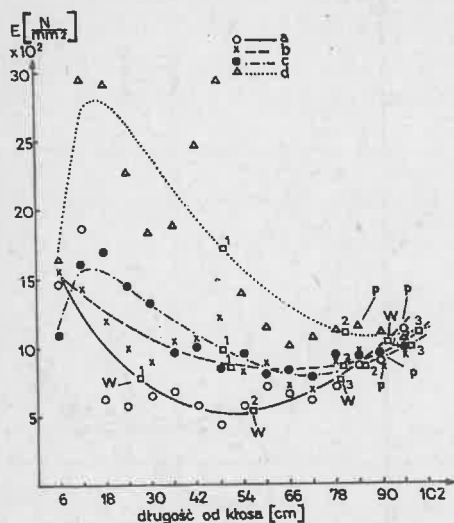
Rys. 17. Rozkład wartości współczynnika sprężystości na długości źdźbła pszenicy ozimej Helenka w kolejnych fazach fenologicznych w 1974 r.
(objaśn. jak pod rys. 7)



Rys. 18. Rozkład wartości współczynnika sprężystości na długości źdźbła pszenicy ozimej Helenka w kolejnych fazach fenologicznych w 1975 r.
(objaśn. jak pod rys. 7)

wartości tego parametru na długości źdźbła zawiera się w granicach 499-4994 N/mm^2 i wykazuje znacznie większe zróżnicowanie w poszczególnych latach badań w konfrontacji z odmianą Grana (595-2014 N/mm^2 w 1974 r., 511-4994 N/mm^2 w 1975 r., 499-2626 N/mm^2 w 1976 r.).

Podobnie jak dla wspomnianej odmiany, przebieg zmienności współczynnika sprężystości wzdłuż źdźbła, przedstawiony za pomocą krzywych regresji, wykazał największą sprężystość początkowych odcinków źdźbła w dokłosiu, najmniejszą zaś powyżej drugiego węzła (rys. 17-19). Charakter przebiegu krzywych jest podobny do większości analizowanych okresów fenologicznych, ale różnice między nimi są znacznie większe niż przy ocenie odmiany Grana. Najmniejszą sprężystością charakteryzowało

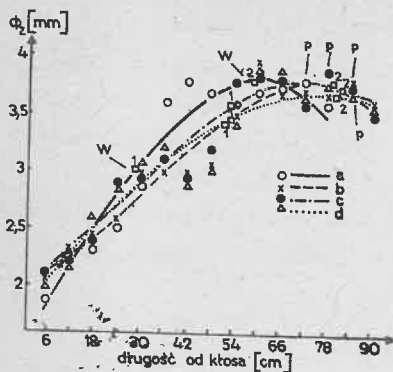


Rys. 19. Rozkład wartości współczynnika sprężystości długości źdźbła pszenicy ozimej Helenka w kolejnych fazach fenologicznych w 1974 r. (objaśn. jak pod rys. 7).

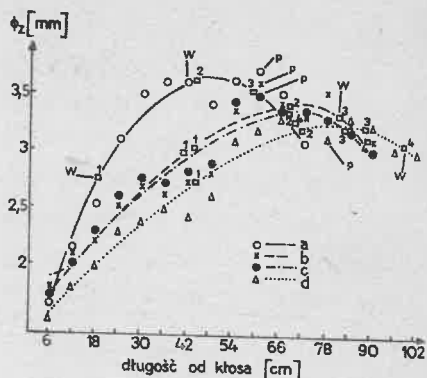
natomiast w pozostałych latach odmiany reagowały odmiennie na zaistniałe warunki atmosferyczne.

Zaobserwowano również przesuwanie się minimum wartości współczynnika sprężystości w czasie rozwoju i dojrzewania roślin. Stwierdzono bowiem, że rozważane ekstremum obniża się znacznie bardziej do jego podstawy wraz z dojrzewaniem aniżeli w przypadku źdźbła odmiany Grana. Począwszy od pełni kłoszenia do dojrzałości pełnej powyższe ekstremum obniża się na źdźble odpowiednio: w okresie kłoszenia 23,1-37,5% podczas dojrzałości młecznej 13,3-29,4% w woskowej 13,3-27,8% i w pełnej 0 - 17,7% jego długości (rys. 10). Stąd też zlokalizowane jest w późniejszych okresach wegetacyjnych znacznie bliżej podstawy źdźbła w porównaniu z odmianą Grana. Oznacza to, że w miarę wzrostu ciężaru kłosa i zmian biochemicznych w źdźble, a więc w kierunku działania największych momentów zginających h.

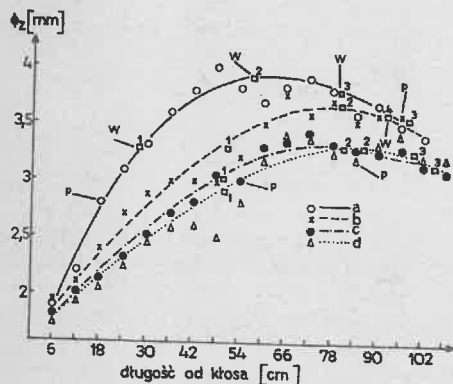
się źdźbło w okresie pełni kłoszenia, a największą podczas dojrzałości pełnej, co jest również potwierdzeniem wyników badań polowych. Potwierdzenie tego faktu znajdujemy w wynikach analizy statystycznej, gdzie stwierdzono istotność różnic przy zdecydowanej większości porównywanych średnich (tab. 15). Stwierdzono także, że największa zmienność sprężystości źdźbła występowała w roku o nadmiernych opadach atmosferycznych (1975), najmniejsza zaś w 1974 r., gdy opady kształtowały się w pobliżu normy. Zatem pewna zbieżność między odmianami nastąpiła tylko w 1974 r.,



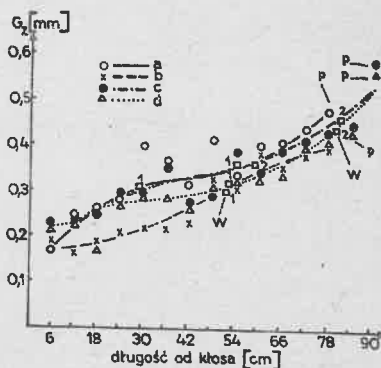
Rys. 20. Zmienność wartości charakteryzujących średnicę zewnętrzną źdźbła pszenicy ozimej Helenka z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1974 r. (objaśn. jak pod rys. 7)



Rys. 21. Zmienność wartości charakteryzujących średnicę zewnętrzną źdźbła pszenicy ozimej Helenka z uwzględnieniem faz fenologicznych w 1975 r. (objaśn. jak pod rys. 7)

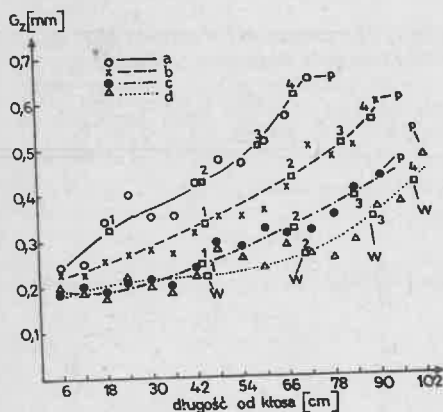


Rys. 22. Zmienność wartości charakteryzujących średnicę zewnętrzną źdźbła pszenicy ozimej Helenka z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1976 r. (objaśn. jak pod rys. 7)

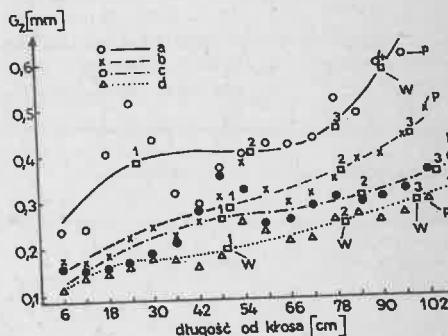


Rys. 23. Zmienność wartości charakteryzujących grubość ścianki źdźbła pszenicy ozimej Helenka z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1974 r. (objaśn. jak pod rys. 7)

Żdźbło odmiany Helenka charakteryzuje się mniejszą średnicą zewnętrzną aniżeli żdźbło Grany, gdyż skrajne wartości obejmują przedział 1,60-3,96 mm. Jednakże przebieg zmienności tej cechy na długości żdźbła jest niemal identyczny z obydwo ma odmianami (rys. 20-22). Zauważono jednakże, że odmiana Helenka bardziej reaguje na zmienność warunków atmosferycznych, co pociąga za sobą znacznie większe zróżnicowanie tego parametru między fazami fenologicznymi w poszczególnych latach. Charakter tych zmian w kolejnych latach jest podobny do Grany, z tym że znacznie rozszerza się przedział wartości.



Rys. 24. Zmienność wartości charakteryzujących grubość ścianki żdźbła pszenicy ozimej Helenka z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1975 r. (objaśn. jak pod rys. 7)



Rys. 25. Zmienność wartości charakteryzujących grubość ścianki żdźbła pszenicy ozimej Helenka z uwzględnieniem kolejnych faz fenologicznych w 1976 r. (objaśn. jak pod rys. 7)

Grubość ścianki żdźbła, podobnie jak u odmiany Grana, wzrasta od kłosa do podstawy żdźbła i obejmuje nieco szerszy przedział wartości (0,11-0,65 mm). Przedstawione przebiegi zmienności (rys. 23-25) świadczą o znacznym zróżnicowaniu w fazach fenologicznych i nie zachowują typowego dla odmiany Grana promienistego rozchodzenia się krzywych cha-

rakteryzujących zmienność tego parametru. W przeciwieństwie do źdźbła odmiany Grana grubość ścianki odmiany Helenka wykazała nieznacznie zróżnicowanie między pkresami fenologicznymi w 1974 r., w pozostałych zaś latach występowały bardzo duże różnice.

Zredukowana średnica zewnętrzna oraz grubość ścianki źdźbła są ściśle skorelowane z wielkością współczynnika sprężystości. Uzyskane współczynniki korelacji świadczą o odwrotnej proporcjonalności między tymi parametrami (tab. 18). Analizując wpływ grubości ścianki na sprężystość, otrzymano wartości współczynnika korelacji od 0,27 do - 0,45, natomiast zależność między średnicą zewnętrzną a sprężystością charakteryzuje się wartościami od - 0,44 do - 0,66. Wynika z tego bardziej widoczny wpływ średnicy zewnętrznej źdźbła na jego sprężystość niż grubości ścianki. Spośród badanych odmian wyższe korelacje dotyczą odmiany Helenka, a więc bardziej podatnej na wyleganie. Prawidłowość ta potwierdza się szczególnie w pierwszych trzech fazach fenologicznych. Z kolei dla odmiany Grana nieco wyższe współczynniki korelacji są związane z dojrzałością pełną. W okresie dojrzałości młecznej cechy geometryczne obydwu odmian najsłabiej wpływały na właściwości sprężyste źdźbła.

5. DYSKUSJA WYNIKÓW

Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że źdźbło pszenicy ozimej wykazuje bardzo dużą zmienność właściwości sprężystych, determinowaną wieloma czynnikami. Oprócz cech odmianowych i wpływu warunków klimatycznych istotną rolę w kształtowaniu się sprężystości odgrywa aktualny stan fizyczny rośliny w poszczególnych jej fazach rozwojowych. W czasie wegetacji wiele parametrów zmienia się, wpływając jednocześnie na zróżnicowanie cech wytrzymałościowych, do których należy również sprężystość. Wzajemne powiązania tych właściwości i wieloczynnikowe zależności tworzą w efekcie zespół elementów decydujących o konstrukcji źdźbła, która w konfrontacji z warunkami środowiska w różny sposób może reagować na działanie sił zewnętrznych. Poznanie właściwości sprężystych źdźbła ujawnia bardzo skomplikowany mechanizm tych wszystkich parametrów, które składają się na ważną cechę fizyczną roślin zbożowych, jaką jest odporność lub podatność na wyleganie.

Tabela 18: Wartości współczynnika korelacji charakteryzujących zależności pomiędzy współczynnikami sprężystości a cechami geometrycznymi źdźbła pszenicy ozimej (na podstawie badań laboratoryjnych)

Odmiana	Pełnia kłoszenia			Graniczne wartości r 0,05
	Grubość ścianki x współczynnik sprężystości	Średnica ścianki x współczynnik sprężystości		
Grana	-0,3820	-0,5896		0,2071
Helenka	-0,3908	-0,6257		0,2050
		Dojrzałość mleczna		
Grana	-0,2698	-0,4401		0,2028
Helenka	-0,3380	-0,5374		0,2050
		Dojrzałość woskowa		
Grana	-0,3389	-0,5322		0,2071
Helenka	-0,4305	-0,5566		0,2172
		Dojrzałość pełna		
Grana	-0,4532	-0,6645		0,1985
Helenka	-0,3625	-0,6008		0,2028

Przeprowadzone badania polowe wykazały, że odmiana o krótszym źdźbłę (Grana) charakteryzuje się względnie stabilną sprężystością (w określonej fazie rozwoju) bez względu na kąt ugięcia. Z kolei znacznie dłuższe źdźbło odmiany Helenka inaczej reagowało na zginanie, co znalazło swoje odbicie w bardzo dużej zmienności i statystycznie udowodnionych różnicach między małymi i dużymi kątami ugięcia. Należy zatem sądzić, że przy badaniach porównawczych odmian o różnej długości źdźbła najbardziej odpowiednie jest ugięcie w przedziale $40-50^{\circ}$, gdyż nawet przy identycznej sprężystości dwóch odmian mogą występować pewne zakłócenia w mechanice źdźbła wyższego w czasie zginania poniżej kąta 40° i powyżej 50° . Fakt ten ma istotne znaczenie nie tylko przy badaniach porównawczych czy porównawczych, ale przede wszystkim może odegrać rolę przy poszukiwaniach optymalnych parametrów wytrzymałościowych w pracach hodowlanych, zmierzających do uzyskania źdźbła zbóż o najbardziej korzystnych cechach fizycznych. Stąd też przeprowadzenie badań w szerokim zakresie ugięć znacznie poszerza informacje o zachowaniu się źdźbła przy działaniu zróżnicowanych sił. Zagadnienia te - w świetle literatury - nie były dotychczas w ten sposób rozpatrywane.

Stwierdzono także, że sprężystość źdźbła istotnie zmienia się w czasie rozwoju i dojrzewania roślin. Wartości współczynnika sprężystości wzrastają począwszy od kłoszenia poprzez dojrzałość mleczną do woskowej i pełnej. Dlatego też badania porównawcze są ściśle limitowane określoną fazą rozwojową roślin. Istotnym czynnikiem powodującym wyraźne zwiększenie sprężystości źdźbła są nadmierne opady atmosferyczne w czasie wegetacji roślin. W przypadku obydwu badanych odmian wyższe wartości współczynnika sprężystości uzyskano dla odmiany Helenka, a więc bardziej podatnej na wyleganie. Uwzględnianie zatem ściśle określonych faz rozwojowych roślin potwierdza słuszność założeń metodycznych, tym bardziej że oprócz cech genetycznych również ilość opadów atmosferycznych w czasie wegetacji nader wyraźnie zmienia sprężystość źdźbła. Zajmujący się tym zagadnieniem autorzy z zasady pomijali te ważne elementy, ograniczając się jedynie do źdźbła "zielonego", "suchego" czy "wilgotnego" (1-4, 45, 47) lub do stawiania hipotez na podstawie wycinanych badań (15, 25, 28). Należy przypuszczać, że podstawową przyczy-

na hamującą rozszerzenie badań polowych były trudności metodyczne i konieczność przeprowadzenia wielu pomiarów w krótkim okresie.

Badania laboratoryjne potwierdziły wyższą sprężystość źdźbła odmiany Helenka, jak również szerszy przedział zmienności tej cechy w porównaniu z Graną. Udowodniono też wzrost sprężystości wraz z dojrzewaniem roślin. Niemniej ważnym elementem kształtującym cechy wytrzymałościowe całego źdźbła jest rozkład modułu Younga od kłosa do podstawy, a więc na całej długości źdźbła. Zwrócił na to uwagę Neenan [45], który opierając się na rozważaniach teoretycznych i pracach eksperymentalnych wysunął hipotezę zmienności tego parametru na długości źdźbła, sugerując w ślad za tym możliwość przewidywania miejsc wyboczeń źdźbła pod wpływem obciążeń mechanicznych. Uzyskane wyniki znacznie rozszerzają te przypuszczenia. Stwierdzono bowiem, że maksymalne wartości współczynnika sprężystości występują w początkowych odcinkach dokłosa, minimalne natomiast powyżej drugiego węzła, z tym że w miarę dojrzewania roślin minimum przesuwa się bliżej trzeciego węzła. Rozkład tych wartości opisano za pomocą równania paraboli $y = a + bx + cx^2 + \frac{d}{x}$, a więc ujęto w ramy matematyczne. Minimum sprężystości znacznie niżej zlokalizowane jest na źdźbłach odmiany Helenka w porównaniu z Graną. Nasuwa się zatem przypuszczenie, że w miarę wzrostu ciężaru kłosa na źdźbło wyższym, najniższa wartość współczynnika sprężystości jak gdyby przesuwa się ku podstawie źdźbła, gdzie działają największe momenty zginające. Zapewne w tym przypadku ujawnia się również zróżnicowanie w budowie źdźbła obydwu odmian, decydujące o jego konstrukcji, a więc i odporności mechanicznej.

Podobnie jak w badaniach polowych, stwierdzono istotny wpływ ilości opadów atmosferycznych w czasie wegetacji na zmienność właściwości sprężystych źdźbła. Odmiana Grana wykazywała względną stabilność tej cechy na przestrzeni trzech lat, jakkolwiek niedobór opadów powodował poszerzenie przedziału między skrajnymi wartościami. Najmniejsze zaś różnice wystąpiły w sezonie wegetacyjnym o parametrach meteorologicznych zbliżonych do normy. Z kolei odmiana Helenka reagowała bardzo silnie na zróżnicowaną w poszczególnych latach ilość opadów atmosferycznych. Najwyższe wartości współczynnika sprężystości przy bardzo

dużym rozszerzeniu przedziału między skrajnymi wartościami zanotowano w roku o nadmiernej ilości opadów, a więc wówczas, kiedy to rośliny były najbardziej podatne na wyleganie. Stosunkowo najmniejszą zmiennością charakteryzowały się obydwie odmiany w warunkach pogodowych zbliżonych do normy, w pozostałych zaś latach reagowały odmiennie. Opracowane założenia metodyczne umożliwiają zatem rejestrację zmian parametrów fizycznych źdźbła pod wpływem czynników pogodowych i ocenę reakcji na te zmiany porównywanych odmian.

Ścisły związek między wartościami współczynnika sprężystości a cechami geometrycznymi źdźbła znalazł swoje odbicie w ocenie zarówno średnicy zewnętrznej, jak i grubości ścianki. Zmienność tych parametrów na długości źdźbła - opisana wielomianem trzeciego stopnia ($y = a + bx + cx^2 + dx^3$) - wskazuje jednoznacznie na różnice międzyodmianowe oraz istotny wpływ warunków atmosferycznych w czasie wegetacji i faz rozwojowych roślin na kształtowanie się tych ważnych cech z punktu widzenia mechaniki źdźbła. Stwierdzona ujemna korelacja między współczynnikiem sprężystości a parametrami geometrycznymi uwidacznia znacznie większą zależność sprężystości od średnicy zewnętrznej aniżeli od grubości ścianki źdźbła. Wyższe wartości współczynnika korelacji uzyskano przy ocenie odmiany Helenka, a więc bardziej podatnej na wyleganie. Zauważono również, że między fazami rozwojowymi roślin istnieją wyraźne różnice, a najmniejsze wartości współczynnika korelacji dotyczą dojrzałości młecznej, czyli w okresie osłabienia źdźbła i zmiany jego mechaniki na skutek formowania się ziarna, przechodzenia składników pokarmowych do kłosa i wzrostu jego masy. Można by zatem sądzić, że średnica zewnętrzna źdźbła determinuje w poważnym stopniu kształtowanie się jego właściwości sprężystych.

Zmiennością parametrów geometrycznych w powiązaniu ze sprężystością źdźbła w czasie wegetacji roślin nie zajmowano się dotychczas w ujęciu dynamicznym. Stwierdzono jedynie zależności między współczynnikiem sprężystości a średnicą łodygi dla określonej dojrzałości materiału [12, 28, 43, 50/], co w konfrontacji z przytoczonymi wynikami wydaje się nie w pełni wystarczające zarówno z poznawczego, jak i praktycznego punktu widzenia. Uchwyczone zależności w pełnej skali występowania mogą bowiem

posłużyć jako punkt wyjścia do oceny nowych rodów i odmian pod kątem stabilności cech wytrzymałościowych i określania momentów krytycznych w poszczególnych fazach rozwojowych roślin.

Dokonana analiza wyników uzyskanych na podstawie opracowanej metody upoważnia do stwierdzenia, że przyjęty zakres badań umożliwił kompleksową charakterystykę jednego z podstawowych elementów mechaniki źdźbła, jakim jest współczynnik sprężystości. Ocena zmienności tego parametru w czasie vegetacji roślin daje możliwość określania istotnych różnic między odmianami, uwiadamia wpływ czynników atmosferycznych i uściśla zależność między sprężystością a cechami geometrycznymi źdźbła. Należy przypuszczać, że takie składowe z uwzględnieniem dynamiki zmian pozostałych właściwości mechanicznych i w ścisłym powiązaniu z momentami krytycznymi mogą służyć - oprócz walorów poznawczych - rozwinięciu badań nad modelem fizycznym źdźbła niewylegającego, możliwego do uzyskania w pracach hodowlanych.

6. WNIOSKI

1. Sprężystość źdźbła pszenicy ozimej wykazuje bardzo dużą zmienność, determinowaną cechami odmianowymi, fazami rozwojowymi roślin, ilością opadów atmosferycznych w czasie vegetacji wiosenno-letniej oraz parametrami geometrycznymi źdźbła.

2. Odmiana Helenka charakteryzuje się znacznie większą zmiennością i wyższymi wartościami współczynnika sprężystości aniżeli Grana.

3. W czasie rozwoju i dojrzewania roślin sprężystość źdźbła obydwu odmian systematycznie wzrasta. Najniższe jej wartości występują w okresie kłoszenia, najwyższe zaś w czasie dojrzałości woskowej i pełnej.

4. Nadmierne opady atmosferyczne w czasie vegetacji wiosenno-letniej powodowały zdecydowane zwiększenie sprężystości źdźbła odmiany Helenka - bardziej podatnej na wyleganie. Odmiana Grana wykazała znacznie większą stabilność pod tym względem.

5. Sprężystość oraz parametry geometryczne zmieniają się na długości źdźbła w zależności od cech odmianowych i faz rozwojowych roślin.

6. Między współczynnikiem sprężystości a parametrami geometrycznymi

żdźbła występuje istotna ujemna korelacja, przy czym średnica zewnętrzna bardziej wpływała na sprężystość niż grubość ścianki. Wyższe współczynniki korelacji charakteryzowały odmianę Helenka.

7. Opracowana metoda badań współczynnika sprężystości żdźbła pozwala na poznanie nowych elementów charakteryzujących właściwości wytrzymałościowe żdźbła i daje podstawę do oceny i porównywania poszczególnych odmian w aspekcie ich podatności na działanie sił zewnętrznych.

8. Zastosowana aparatura umożliwia wykonanie niezbędnych pomiarów polowych i laboratoryjnych do wyznaczania współczynnika sprężystości żdźbła w pełnym zakresie występującej zmienności.

7. PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań wskazują, że zmienność cech fizycznych żdźbła kształtuje wiele różnorodnych czynników skorelowanych ze sobą w różnym stopniu. Podstawowe trudności metodyczne związane są przede wszystkim z niejednorodnością materiału i ciągłymi jego zmianami podczas wegetacji. Niemalą rolę odgrywają również czynniki zewnętrzne, rozszerzające lub też zawężające zakres zmienności. Stąd też stosowane dotychczas metody i sposoby oceny właściwości mechanicznych żdźbła, a także wylegania zbóż, są w wielu przypadkach nieporównywalne, a więc nie mogą prowadzić do uogólnienia wniosków. Charakteryzują one stan aktualny roślin lub też dotyczą zmienności konkretnego materiału pochodzącego ze ściśle określonych warunków. Wydaje się zatem, że jedynie kompleksowe ujęcie zagadnienia może doprowadzić do oczekiwanych rezultatów. Dalszy rozwój badań tego typu umożliwi zapewne poznanie wszystkich elementów mechaniki żdźbła, niezbędnych do opracowania fizycznych modeli, które nie tylko powinny zawierać najistotniejsze parametry z agrofizycznego punktu widzenia, ale przede wszystkim powinny być użyteczne w hodowli zbóż.

8. PIŚMIENNICTWO

1. Ahlgrimm H.J., Der Einfluss der Feuchte auf das Biegeverhalten von Halmgut bei Zug-, Scher- und Biegebeanspruchung, Landbauforschung Volkenrode, 1970, Sonderheft 8, 8-31.

2. Ahlgrimm H.J., Messmethoden zur Ermittlung des Bruch - und Knickverhaltens von pflanzlichem Halmgut bei Zug - Schwer - und Biegebeanspruchung, Landbauforschung Völknerode, 1970, Sonderheft 8, 32-52.
3. Ahlgrimm H.J., Kraft-Dehnungsverhalten von Einzelgrashalmen, Landbauforschung Völknerode, 1974, Bd. 24, H. 2. 105-110.
4. Ahlgrimm H.J., The strength properties of grass stalks subjected to tensile-, shear - and bending forces, Zeszyty Problemowe PNR, 1978, z. 203, 123-144.
5. Ahlgrimm H.J., Krehbiel-Gräther K., Untersuchungen zur Deutung des Biegaverhaltens von pflanzlichem Halmgut, Landbauforschung Völknerode, 1972, Bd. 22, H. 2. 117-122.
6. American Society of Testing Materials, ASTM Standards, part 10, 1916, Race Street Philadelphia, Pa., 1958.
7. Baier A., Investigations into lodging resistance of cereal crops and methods for its estimation. Bayer, Landw. Ib. 1965, 42, 643-666.
8. Burmistrowa M.F. i in., Fiziko - mechanicheskie svoystwa sel'skochozajstwiennych restenij, GJSL, Moskwa 1956.
9. Burmistrowa M.F. i in., Physicochemical Properties of Agricultural Crops, Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1963.
10. Caffrey M., Carroll P.T., Lodging in Cereals, Journal of Department of Agriculture, 1938, Dublin vol. 35, 1, 25.
11. Casada J.H., Walker J.N., Smith E.M., A Method of Predicting Flexural Behavior of Intact Tobacco Stalks, Transactions of the ASAE, 1969, vol. 12, 292-294.
12. Curtis L.M., Hendrick J.G., A Study of Bending-Strength Properties of Cotton Stalks, Transactions of the ASAE, 1969, vol. 12, 39-45.
13. Duncan J., Duris M., Volek V., Vyskum trenia, chybu a rezu stebiel ozimnej pšenice odrod Diana I a Košutska, Acta Operativo-Oeconomica Universitatis Agriculturae, Nitra, 1966, XII, 127-139.
14. Duncan J., Hložak., Príspevok k fyzikálno-mechanickým vlastnostiam stebela ozimnej pšenice odrod Diana a Košutska, Acta Operativo-Oeconomica Universitatis Agriculturae, Nitra, 1966, XIII, 103-106.

15. Duncan J., Supuka J., Prispevok k studiu modulov pružnosti v smyku G internodii stiebiel jačmena odrod Dvořan a Sladar. Sladar. Acta technol. Agric. Sb. vys. Sk. pol.-hosp. Nitre Prevadz-ekon. Fakul. 1973, t. 11, 115-121.
16. Evans P.S., A study of leaf strength in four ryegrass varieties. New Zeland Journ. of Agricultural Res. 7, 1974, 508-513.
17. Evans P.S., Leaf strength studies of pasture grasses II: Strength, cellulose content and sclerenchyma tissue proportions of eight grasses grown as single plants. Journal of Agricultural Science, 1967, vol. 69, 175-181.
18. Gajnanow H.S., Opriedielenije uprugich svojstw sielskochozjajstvien-nych restenij, Miechanizacija i Elektrifikacija Socjaliczieskowo Siels-kowo Chozjajstwa, 1971, nr 1, 44-45.
19. Gawda H., Attempt at applying the ultrasonic method for determining the Young modulus of cereal stalk, Zeszyty Problemowe PNR, 1978, z. 203, 145-152.
20. Gowin J., Determination of wheat stalk modulus of elasticity by means of holographic interferometry, Proceedings of the II International Conference on Physical Properties of Agricultural Materials, Gdansk, 1980, t.4/1, 106.
21. Grafius J.E., Brown H.M., Lodging resistance in oats, Agr. J., 1954, 46, 414-418.
22. Halyk R.M., Hurlbut L.W., Tensile and Shear Strength Characteristics of Alfalfa Stems, Transactions of the ASAE, 1968, vol. 11, Nr 2, 256-257.
23. Hamilton D.G., Certain oat culm characteres and their relationship to lodging, Sci. Agr., 1941, vol. 21, 646-676.
24. Hashimoto T., Studies on Young's modulus of crop plants, Bulletin Hiroshima Agricultural College, 1963, vol. 2, 146.
25. Hess D.C., Shands H.L., Lodging response of certain selections of oats (*Avena sativa* L.) and their hybrid progenies, Crop Sci. 1966, 6, 574-577.
26. Huisman W., Moisture content, coefficient of friction and modulus of elasticity of straw in relation to walker losses in a combine

- harvester, maszynopis pracy Agricultural University Wageningen, 1977, 1-12.
27. Jakubowicz A., Orłóś Z., Wytrzymałość materiałów WNT, 1972.
 28. Jeżowski S., Zmienność, współzależność i odziedziczalność cech determinujących wylęganie jęczmienia jarego (*Hordeum Vulgare* L.), praca doktorska wykonana w Instytucie Genetyki Roślin PAN w Poznaniu, 1979.
 29. Kaczorowski T., Zjawisko wylęgania zbóż z punktu widzenia mechaniki żdźbła, IUNG, Puławy 1970.
 30. Kalman L. i in., Morfological es statikal parameterek szerepe a kukurica szarerossegeben, *Novenytermeles*, 1974, vol. 23, nr 4, 313-319.
 31. Kirillov J.J., Metody ocienki ustojczivosti sortow owsa protiv poleganiya, Sieliekcya i Siemienowodstwo, 1959, z. 4, 44-50.
 32. Koper R., Gowin J., Wykorzystanie elastooptycznej metody modelowej do badań właściwości mechanicznych żdźbła pszenicy, PNR, 1978, t. 73-C-2.
 33. Koper R., Gowin J., Photoelastic investigation of the state of stress in the cross-section of the straw stalk, *Zeszyty Problemowe PNR*, 1978, z. 203, 201-206.
 34. Lehmann S., Messwertgeber zur Bestimmung der Schneiderbeit bei freiem Schnitt, *Deutsche Agrartechnik*, 1970, nr. 10, 455.
 35. Liljedahl J.B., Jackson G.L., Degraff R.P., Schraeder M.E., Measurement of Shearing Energy, *Agricultural Engineering*, 1961, vol. 42, nr 6, 298-301.
 36. McClelland J.H., Spielrein R.E., A study of some design factors affecting the performance of mower knives, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1958, vol. 3, nr 2, 137-146.
 37. Miczyński J., Strength computation of statical corn stalk loading, *Zeszyty Problemowe PNR*, 1978, z. 203, 207-214.
 38. Mohsenin N.N., Physical properties of plant and animal materials, Gordon and Breach Science Publishers, New York 1970, vol. 1.
 39. Morita, Noboru and Taya, Nobuhisa. Studies in ricestraw dynamics with reference to lodging. Part II (in Japanese), Laboratory of Agricultural Engineering, Hirosaki U., Hirosaki, Japan, 1957.

40. Morrison F.B., Feeds and Feeding p. 1018, Clinton, Iowa Morrison Publishing Co., 1959.
41. Moustafa S.M.A., Stout B.A., Bradley W.A., Elastic and inelastic Stability of a Biological Structure, J. Agric. Engng. Res. 1968, vol. 13, nr 1, 64-82.
42. Müller Z., Measuring methods for investigation of mechanical properties of the reed, Proceedings of the II International Conference on Physical Properties of Agricultural Materials, Gd8118, 1980, t. 4/1, 114.
43. Müller Z., Testing of mechanical properties in fibrous products, Zeszyty Problemowe PNR, 1978, z. 203, 339-348.
44. Müllimäki K., On the factors affecting resistance to lodging in some varieties of spring cereals, Valt. Maatalouskoet. Julk. Publ. 195, 19 p., 1962.
45. Neenan M., Spencer-Smith J.L., An analysis of the problem of lodging with particular reference to wheat and barley, J. Agric. Sci. Camb., 1975, vol. 85, 495-507.
46. Neenan M., What causes lodging in cereals, Fm Food Res, 1975, vol. 6, No 2, 31-32.
47. Oda K., Suzuki M., Udagawa T., Varietal Analysis of Physical Characters in Wheat and Barley Plants Relating to Lodging and Lodging Index, Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences, Tokyo, 1966, seria D, Nr 15, 55-91.
48. Pickett L.K., Liljedahl J.B., Haugh C.G., Ullstrup A.J., Rheological Properties of Cornstalks Subjected to Transverse Loading, Transactions of the ASAE, 1969, vol. 12, 392-396.
49. Pinthus M.J., Lodging in wheat, barley and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measures. Advances in Agronomy, 1973, vol. 25. 209-263.
50. Prince P.R., Measurement of Ultimate Strength of Forage Stalks, Transaction of the ASAE, 1961, vol. 4, nr 2, 208-209.
51. Prince R.P., Wolf D.B., Bartok J.W., The Physical Property Measurement of Forage Stalks, Bulletin 388, Agricultural Experimentation Station, University of Connecticut. Storre, 1965.

52. Ragasits I., *Modszer a növények megdőlésének meresere* Noveny-termeles, 1971, t. 20, nr 2, 129-139.
53. Ruebenbauer T., Riegerowa H., *Próba określenia sztywności słomy pszenic ozimych na podstawie pomiarów nielicznych roślin*, Acta Agrobotanica, 1955, vol. 3, 45-73.
54. Schluzke D., Heyter F., Seidler K.H., *Eine Methode zur Messung der Halmstabilität*, Saat. u. Pfl. Gut., 1974, Jg. 15, H. 5, 76-78.
55. Siemienow W.F., *Uprugost stieblej sielskochozajstwiennych kultur, Miechanizacja i Eliektrifikacja Socjalistyczieskowo Sielskowo Chozajstwa*, 1971, nr 1, 44-45.
56. Skubisz G., *The determination of the Young's modulus of a stalk of winter wheat on the basis of field and laboratory measurements*, Zeszyty Problemowe PNR, 1978, z. 203, 215-224.
57. Skubisz G., *The dependence of the Young's modulus of winter wheat stalk in various phenological phases*, Proceedings of the II International Conference on Physical Properties of Agricultural Materials, C8d8118, 1980, t. 2, 37.
58. Suggs C.W., Splinter W.E., *Mechanical Properties of Tobacco Stalks*, Transactions of the ASAE, 1965, vol. 8. nr 3, 361-364.
59. Szot B., Kolemba G., *Metody oceny wylegania zbóż*, Problemy Agrofizyki, 1978, z. 8.
60. Szot B., Skubisz G., *Zastosowanie zestawu pomiarowego do określania parametrów mechanicznych źdźbła pszenicy ozimej*, Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, 1979, Nr 135, 85-98.
61. Szot B., Skubisz G., *Characterization of winter wheat stalk elasticity on the basis of measurements in field conditions*, Zeszyty Problemowe PNR z. 245 (w druku).
62. Spiewok D., *Über die Biegesteifigkeit von Futterhalmen*, Deutsche Agrartechnik, 1970, Ed. 20, H. 10, 457-459.
63. Timoszenko S.P., *Tieoria koliebania w inżiniernom gielie*, Gostie-orizdatat, 1944.
64. Timoszenko S.P., *Ustoicziwost uprugich sistem* G.I.T.T.L., Moskwa 1955, (tłum. z ang.).

65. Timoszenko S.P., Gere J.B., Teoria stateczności sprężystej, Arkady, Warszawa, 1963.
66. Uctum S., Hungerbuhler K., Statische Berechnung der Standfestigkeit von Getreide unter Berücksichtigung der Wirkung von CCC, Zeitschrift für Acker-und Pflanzenbau, 1968, Bd. 128, H. 1, 1-16.
67. Wieneke F., Wickel - und Reibungsuntersuchungen an Wellen und umlaufenden Maschinenteilen VDI-Forschungsheft 463, Beilage zur "Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens", Ausgabe B, 1957, Bd. 23.
68. Zuber M.S., Grogan G.O., A new technique for measuring stalks strength in corn. Crop Sci., 1961, vol 1, 378-380.
69. Zuber M.S., Kang M.S., Corn Lodging slowed by sturdier stalks, Crops and Soils Magazine, February 1978, 13-15.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	3
2. Dotychczas stosowane metody	4
3. Zastosowana metodyka badań	12
3.1. Materiał i warunki badań	12
3.1.1. Materiał badawczy	12
3.1.2. Czynniki agrotechniczne	12
3.1.3. Podstawowe dane meteorologiczne	13
3.2. Opis aparatury i sposób przeprowadzania pomiarów	15
3.3. Zastosowanie rozważania teoretycznego do wyznaczania współczynnika sprężystości	18
3.4. Zakres badań	22
4. Wyniki badań	24
4.1. Charakterystyka współczynnika sprężystości żdźbła na pod- stawie badań polowych	24
4.2. Charakterystyka współczynnika sprężystości żdźbła na pod- stawie badań laboratoryjnych	30
5. Dyskusja wyników	43
6. Wnioski	48
7. Podsumowanie	48
8. Piśmiennictwo	48