

PL ISSN 0137-6586

problemy agrofizyki

POLSKA AKADEMIA NAUK • ZAKŁAD AGROFIZYKI



Ossolineum

zeszyt 31

rok 1980

**PRZEGLĄD METOD
POMIARU WILGOTNOŚCI GLEB
I OCENA ICH PRZYDATNOŚCI
W BADANIACH POLOWYCH**

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

PROBLEMY AGROFIZYKI

31

WROCŁAW · WARSZAWA · KRAKÓW · GDAŃSK
ZAKŁAD NARODOWY IMIENIA OSSOLIŃSKICH
WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

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

MAREK MALICKI

**PRZEGLĄD METOD
POMIARU WILGOTNOŚCI GLEB
I OCENA ICH PRZYDATNOŚCI
W BADANIACH POLOWYCH**

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

1980

Komitet Redakcyjny
prof. dr JAN GLIŃSKI (redaktor naczelny)
prof. dr IGNACY DECHNIK, doc. dr BOGUSŁAW SZOT

Okladkę projektował Zygmunt Ziemka

Redaktor Wydawnictwa Lidia Kwiecień
Redaktor techniczny Bożena Pojasek

Copyright by Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo. Wrocław 1980
Printed in Poland

ISBN 83-04-00544-1
PL ISSN 0137-6586

Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo. Wrocław 1980.
Nakład: 320 egz. Objętość: ark. wyd. 2.70. ark. druk. 3.25. Papier
offset. kl. III. 70 g. 61×86. Oddano do druku 28 XII 1979. Druk
ukończono w lutym 1980. Wrocławska Drukarnia Naukowa.
Zam. 3006/80 – C-33. Cena zł 15. –

SYSTEMATYKA I PRZEGLĄD METOD POMIARU WILGOTNOŚCI GLEB

Przedstawiona niżej systematyka i przegląd dotyczą metod pomiaru wilgotności gleb w polu i w laboratorium, stosowanych w latach 1897-1978.

Poszczególne metody usystematyzowano (ryc. 1) na podstawie właściwości pozwalających połączyć je w grupy wykazujące nadrzędną cechę charakterystyczną. Proponowane nazwy metod pochodzą od sposobu wykonywania pomiarów, zastosowanego przyrządu pomiarowego lub od skorelowanej z wilgotnością właściwości gleby, na której pomiar oparto.

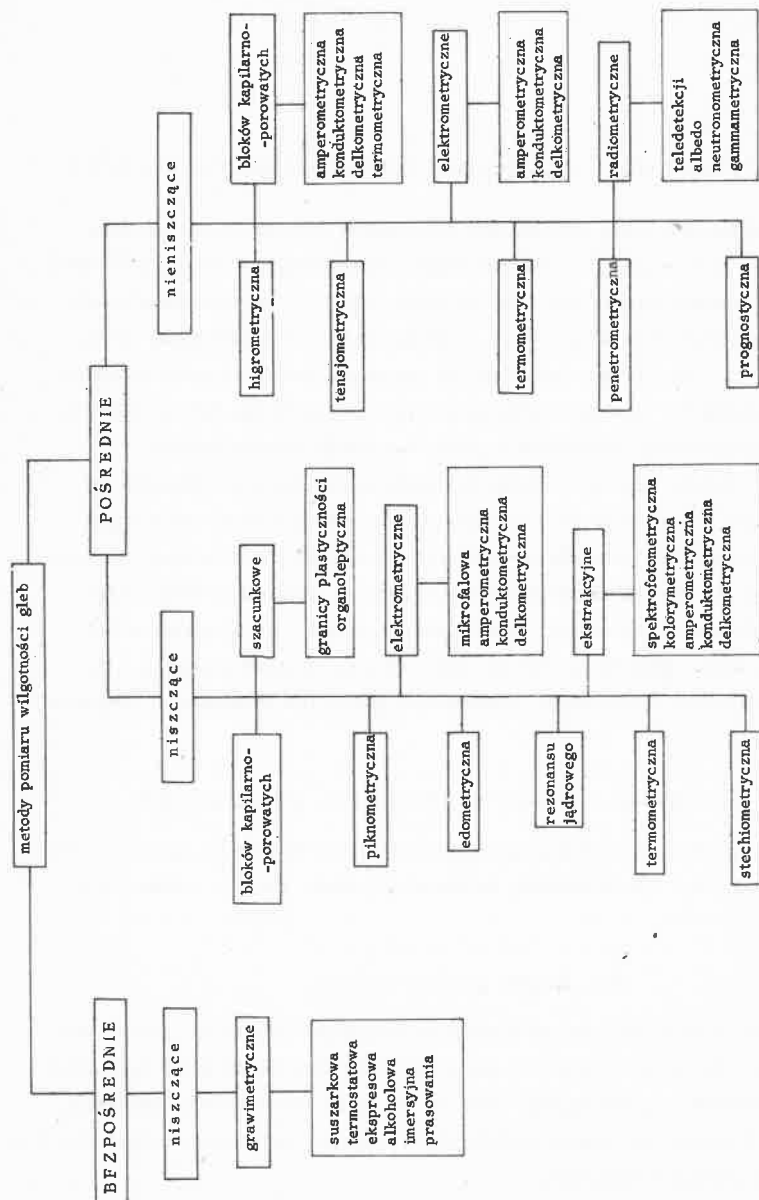
Znane metody pomiaru wilgotności gleb można ogólnie podzielić na bezpośrednie i pośrednie oraz na niszczące i nieniszczące, przy czym metody bezpośrednie zawsze są niszczące, a metody nieniszczące są zawsze pośrednie. Metody bezpośrednie polegają na obliczaniu wilgotności gleby bezpośrednio z różnicy ciężaru próbki przed i po wysuszeniu lub nasyceniu wodą. Metody pośrednie wykorzystują związek pomiędzy wilgotnością a dowolną z fizycznych właściwości gleby lub niewodnego ekstraktu gleby.

1. Bezpośrednie niszczące metody pomiaru wilgotności gleb

Do grupy metod niszczących należą wszystkie te metody, których stosowanie powoduje nieodwracalne zniszczenie układu gleby w punkcie pomiaru.

1.1. Metody grawimetryczne

Metody grawimetryczne są oparte na wagowym oznaczaniu zawartości wody w próbkach, które pobiera się z gleby za pomocą świdra, specjalnej łaski gleboznawczej lub łopaty. Zalicza się je do niszczących, ponieważ powstały w czasie pobierania próbki otwór zakłóca naturalny rozkład izoterm oraz izolinii wilgotności.



Ryc. 1. Systematyka metod pomiaru wilgotności gleb

1.1.1. Metoda suszarkowa

Metoda ta jest, ze względu na swoją dokładność, stosowana powszechnie jako wzorcowa w stosunku do innych metod. Wilgotną próbkę gleby poddaje się suszeniu w czasie nie krótszym niż pięć godzin, w temperaturze 105°C. Wilgotność wylicza się z ubytku masy wody według wzorów:

$$W_{sm} = \frac{a - b}{b - c} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right],$$

$$W = \frac{a - b}{a - c} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right],$$

$$W_v = \frac{a - b}{v} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right],$$

gdzie:

- W_{sm} - wilgotność wagowa obliczana w stosunku do suchej masy,
- W - wilgotność wagowa obliczana w stosunku do masy całkowitej,
- W_v - wilgotność objętościowa obliczana w stosunku do objętości próbki,
- a - masa próbki mokrej,
- b - masa próbki suchej,
- c - tara,
- v - objętość próbki.

Odmiany tej metody: ekspresowa, termostatowa i alkoholowa różnią się między sobą sposobem i czasem suszenia próbki.

1.1.2. Metoda ekspresowa

Umieszczenie próbek gleby pod promiennikami podczerwieni skraca czas suszenia do około 45 minut /101/.

1.1.3. Metoda termostatowa

Próbki gleby zawierające nie więcej niż 10% substancji organicznej można suszyć w termostacie w 150°C /16/, co skraca czas suszenia z pięciu do dwóch godzin.

1.1.4. Metoda alkoholowa

Metoda alkoholowa została zaproponowana przez Bouyoucosa /11/ jako

polowy wariant metody suszarkowej. Zasada metody pozostaje nie zmieniona - różnica polega na sposobie usuwania wody z próbki. Próbkę gleby nasycy się alkoholem i zapala. Wypalanie powtarzane jest kilkakrotnie, aż do ustalenia się masy próbki. Metoda nadaje się do gleb, w których zawartość substancji organicznej nie przekracza 11%. Czas wykonania jednej analizy wynosi 15-30 minut, zależnie od typu gleby i jej wilgotności /60/. Porównanie metody alkoholowej z suszarkową przeprowadzili Kramer i Tayer /58/. Podają oni współczynnik korelacji $r = +0,996$ i równanie regresji:

$$y = 0,95x + 1,1,$$

gdzie:

y - wilgotność gleby oznaczona metodą suszarkową,

x - wilgotność gleby oznaczona metodą alkoholową.

W modyfikacjach metody alkoholowej została uproszczona procedura oznaczania /60, 73, 75/.

1.1.5. Metoda imersyjna

Zasada metody imersyjnej oparta jest na prawie Archimedesesa. Podczas ważenia zanurzonej w wodzie wilgotnej próbki gleby waga nie wykazuje udziału zawartej w niej wody. Inaczej: próbka wilgotnej gleby zawieszona w wodzie waży tyle, ile ważyłaby ta sama próbka w wodzie, ale absolutnie sucha. Ciężar wody w powietrzu jest taki sam jak objętość. Ciężar wilgotnej próbki P można przedstawić jako sumę ciężaru absolutnie suchej gleby x i wody y . Po zanurzeniu gleby w wodzie jej ciężar P_1 wynosi:

$$P_1 = x + y - \left(\frac{x}{d} d_w + y \right) = x \cdot \left(1 - \frac{d_w}{d} \right),$$

gdzie:

d - gęstość stałej fazy gleby (ciężar właściwy rzeczywisty),

d_w - gęstość wody = 1.

Stąd ciężar suchej gleby wynosi:

$$x = P_1 \cdot \frac{d}{d-1},$$

i ostatecznie wilgotność W równa jest:

$$W = \frac{P - x}{x} = \frac{P}{P_1} \cdot \frac{d-1}{d}.$$

W wyliczeniach wymagana jest znajomość ciężaru właściwego rzeczywiste-
go badanej gleby. Błąd pomiaru w porównaniu z metodą suszarkową
osiąga wartość 30% [64].

1.1.6. Metoda prasowania

Metoda ta różni się od innych odmiennym sposobem usuwania wody
z próbki. Zważoną próbkę wilgotnej gleby poddaje się prasowaniu pod
ciśnieniem $66 \cdot 10^3$ hPa [13]. Woda, która pozostanie w próbce po spras-
owaniu, odpowiada w przybliżeniu maksymalnej wilgotności molekularnej.
Ze względu na to, że ilość pozostałej po sprasowaniu wody zależy od
wyjściowej wilgotności próbki, zaleca się przed przystąpieniem do prasowa-
nia nasycić ją wodą do wilgotności odpowiadającej górnej granicy plas-
tyczności. Czas prasowania wynosi około 10 minut.

2. Pośrednie niszczące metody pomiaru wilgotności gleb

Metody pośrednie uważa się za niszczące wtedy, kiedy pomiar wymaga
pobrania próbki gleby. Wykorzystuje się w nich zależność pewnych fi-
zycznych właściwości gleb lub niewodnych ekstraktów glebowych od ich
wilgotności.

2.1. Metoda piknometryczna

Zasada metody oparta jest na pomiarze zmiany przyrostu objętości
wody w menzurce po wsypaniu do niej naważki wilgotnej gleby P_m .
Przyrost objętości ΔV wynosi:

$$\Delta V = V_w + V_s,$$

gdzie:

V_w - objętość wody,

V_s - objętość suchej gleby.

Z kolei:

$$V_s = \frac{P_s}{d} = \frac{P_m - P_w}{d},$$

gdzie:

P_s - ciężar suchej gleby,

P_w - ciężar wody w glebie,

d - gęstość stałej fazy gleby.

Ponieważ V_w odpowiada liczbowo P_w , można napisać:

$$\Delta V = P_w + \frac{P_m - P_w}{d},$$

stąd:

$$P_w = \frac{d \cdot \Delta V}{d + P_m - 1}.$$

Ponieważ:

$$P_s = P_m - P_w = P_m - \frac{d \cdot \Delta V}{d + P_m - 1} = \frac{P_m (d + P_m - 1) - d \cdot \Delta V}{d + P_m - 1},$$

otrzymujemy:

$$W = \frac{d \cdot \Delta V}{P_m (d + P_m - 1) - d \cdot \Delta V}.$$

Używając określonej objętości wody i przyjmując określoną wielkość d można menzurkę wycechować bezpośrednio w jednostkach wilgotności [19,82]. Dla wielkości d różnych od przyjętej wnosi się poprawki według nomogramu.

2.2. Metody szacunkowe

Metody szacunkowe pozwalają określić wilgotność gleby z określonym przybliżeniem w procentach lub w stopniach nasycenia wodą.

2.2.1. Metoda granicy plastyczności

Do określonej objętości wody tak długo dosypuje się badanej gleby, aż jej wilgotność osiągnie wielkość odpowiadającą granicy płynności, a następnie z uzyskanej masy formuje się kulkę. Im wilgotniejsza gleba, tym więcej trzeba jej dosypać, by otrzymana w wyniku mieszania z wodą masa osiągnęła stan odpowiadający granicy płynności i tym większa będzie ulepiona z niej kulka. Wilgotność wyjściowej próbki gleby odczytuje się z odpowiedniego nomogramu mierząc średnicę uzyskanej kulki. Przy szybkim (parowanie) wykonywaniu oznaczenia można analizę uznać za wystarczająco dokładną, by zaliczyć ją do metod ilościowych.

Według Georgiewa [38] błąd metody w porównaniu z metodą suszarkową nie przekracza 5%. Metoda ta może być stosowana do wszystkich gleb, z wyjątkiem gleb piaszczystych, w zakresie uwilgotnień poniżej granicy płynności.

2.2.2. Metoda organoleptyczna

Oparta jest na obserwacji zachowania się gleby podczas rozcierania jej w palcach [24]. Pozwala ona wyróżnić cztery stopnie uwilgotnienia gleby:

- gleba sucha - kruszy się i rozpyla podczas rozcierania w palcach;
- gleba słabo wilgotna - nie kruszy się, ale i nie rozmazuje podczas rozcierania;
- gleba wilgotna - nie widać wody w glebie, ale przyłożona do niej bibuła szybko nasiąka wodą;
- gleba mokra - woda w glebie daje się zauważyć podczas kopania odkrywki.

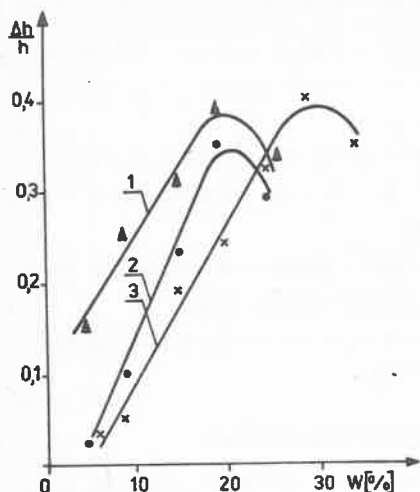
2.3. Metoda bloków kapilarno-porowatych

Zasada metody bloków kapilarno-porowatych jest oparta na założeniu, że wprowadzone do gleby ciało kapilarno-porowate osiąga w stanie równowagi termodynamicznej wilgotność gleby. Mierzac dowolnym sposobem wilgotność tego ciała można uniezależnić metodę od wpływu indywidualnych właściwości gleby.

W badaniach profili glebowych wprowadza się do poszczególnych poziomów genetycznych (prostopadle do ścian odkrywki) bloczki porowato-kapilarne w kształcie otówka, o długości około 11 cm i średnicy około 0,8 cm, wykonane z glinki i z ziemi okrzemkowej [20]. Zaostrzona część bloczka ma powierzchnię styku około 2 cm^2 i długość około 1,5 cm. Bloczek jest na całej swej długości zaopatrzony w podziałkę milimetrową. Nasiąkając wodą zmienia on odcień barwy na ciemniejszy. Długość zciemnionej części bloczka, w stanie równowagi potencjału wody w glebie i w bloczku, jest miarą wilgotności gleby.

2.4. Metoda edometryczna

Zasada metody oparta jest na zależności pomiędzy wielkością liniowego odkształcenia próbki gleby, poddanej określonej niezmiennemu ciśnieniu, a jej wilgotnością [50, 51]. Przykłady takich zależności pokazano na rycinie 2. Według Kołiasiewa [51] glebę wprowadza się do metalowego cylindra cienkimi warstwami, poddając ją zagęszczeniu pod ciśnieniem 100 hPa.



Ryc. 2. Zależność pomiędzy liniowym odkształceniem gleby $\Delta h/h$ a jej wilgotnością (w) według Koliassiewa [51/]

1 - glina średnia węglanowa,
2 - gleba kasztanowa, 3 - czar-
noziem.

Po wypełnieniu cylindra do określonej - zawsze takiej samej - objętości, prasuje się próbkę pod ciśnieniem około 10^3 hPa i po upływie około 40 sekund dokonuje się odczytu zmiany wysokości h próbki. Pozwala to na znalezienie wielkości $\frac{\Delta h}{h}$. Specjalny aparat do edometrycznych pomiarów wilgotności jest zaopatrzony w noniusz, który umożliwia pomiar odkształcenia z dokładnością do 0,1 mm.

2.5. Metoda termometryczna

Metoda termometryczna jest oparta na zależności występującej pomiędzy współczynnikiem przewodności temperaturowej a wilgotnością gleby. Współczynnik przewodności temperaturowej jest miarą prędkości osiągnięcia stanu równowagi termicznej przy gradiencie temperatury równym jednostki i wyraża się w m^2/s . Współczynnik przewodności cieplnej jest miarą szybkości przepływu ciepła i wyraża się w $J/s \cdot m \cdot K$. Między współczynnikiem przewodności temperaturowej k a współczynnikiem przewodności cieplnej λ istnieje związek:

$$k = \frac{\lambda}{c \cdot \rho},$$

gdzie:

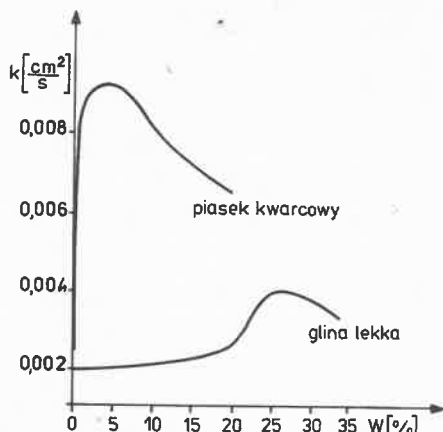
c - ciepło właściwe gleby w J/kg ,

ρ - gęstość gleby w kg/m^3 .

Im większa jest jednostkowa pojemność cieplna $c \cdot \rho$ określonej substancji, tym wolniejszy jest proces jej nagrzewania (lub oziębiania). Współczynnik przewodności cieplnej λ suchej gleby (ok. $0,13 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$ w 293 K), jest około cztery razy mniejszy od współczynnika λ wody ($0,59 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$ w 293 K), zaś jej pojemność cieplna $c \cdot \rho$ jest mniejsza od pojemności wody około 5 razy. Ponieważ przy wzroście wilgotności w zbliżonym stopniu rośnie licznik i mianownik ułamka, trudno przewidzieć, jaki charakter będzie miała zależność współczynnika przewodności temperaturowej gleby od jej wilgotności.

Mechanizm wzrostu pojemności i przewodności cieplnej gleby jest złożony i uwarunkowany formą, w jakiej woda w glebie występuje, zależnością λ od temperatury oraz wielkością współczynnika pęcznienia gleby /21/. Zależność przewodności temperaturowej gleby od jej wilgotności ilustruje rycina 3.

Przykładem wykorzystania związku pomiędzy wielkością współczynnika przewodności temperaturowej gleby a jej wilgotnością może być metoda pomiaru wilgotności gleb Shawa i Bavera /86/. Wykorzystali oni zależność oporności elektrycznej metalowego przewodu od jego temperatury jako czynnik przetwarzający uzależnione od wilgotności gleby zmiany temperatury czujnika na sygnał elektryczny. Czujnik był wykonany w postaci usztywnionego izolacyjnym korpusem uzwojenia z miedzianego drutu. Dwa takie czujniki, włączone w dwie równoległe gałęzie mostka Wheatstone'a, były osadzone w dwóch komorach pomiarowych. Komory zostały wywiercone w mosiężnym prostopadłościannie, dzięki czemu ich temperatura mogła się szybko wyrównać. Po włączeniu do obwodu prądu elektrycznego następowało samopodgrzewanie uzwojeń czujników, a więc i zmiana ich oporności elektrycznej wg formuły:



Ryc. 3. Zależność współczynnika temperaturowej przewodności gleb (k) od ich uwilgotnienia (w) według Dima /21/

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)],$$

gdzie:

- R_t - oporność elektryczna przewodu w temperaturze t ,
- R_{20} - oporność elektryczna przewodu w temperaturze 20°C ,
- α - współczynnik zależny od rodzaju materiału.

Jeśli obydwa czujniki są wykonane identycznie, to mostek pozostaje w równowadze niezależnie od natężenia płynącego przez czujniki prądu. Mostek można zrównoważyć wypełniając obie komory pomiarowe suchą glebą. W celu wykonania pomiaru wilgotności jedną z komór wypełnia się badaną glebą. Ponieważ pojemność cieplna gleby wilgotnej jest większa niż suchej, otoczony nią czujnik ogrzewa się wolniej niż czujnik w glebie suchej. Wynikająca stąd różnica oporności elektrycznych powoduje utratę równowagi mostka i włączony w przekątną mostka galwanometr wskazuje wielkość odpowiednio proporcjonalną do wilgotności gleby. Metoda ta jest szybka, ale wymaga dokładnego standaryzowania gęstości próbek wprowadzonych do obydwu komór pomiarowych. Gleba w obydwu komorach musi być ta sama.

2.6. Metody elektrometryczne

Istotą metod elektrometrycznych jest wykorzystywanie zależności elektrofizycznych właściwości gleby od jej wilgotności /66, 67/. Mówiąc ściślej, z wilgotnością gleby skorelowane są nie tyle elektrofizyczne właściwości samej gleby, co wypełnionego nią naczynia pomiarowego. Wiąże się to ze zjawiskami polaryzacji elektrycznej, których jakość i intensywność zależy w równej mierze od chemizmu elektrolitu glebowego, jak i od rodzaju materiału, z którego sporządzono elektrody.

Elektrofizyczne właściwości gleb wykorzystywane w zmiennoprądowych pomiarach wilgotności to: absorpcja energii fal elektromagnetycznych oraz konduktancja, susceptancja i admitancja wypełnionego próbką badanej gleby naczynia pomiarowego. Z właściwościami tymi wiążą się odpowiednio metody: mikrofalowa, konduktometryczna, delkometryczna i amperometryczna.

2.6.1. Metoda konduktometryczna

Metoda konduktometryczna pomiaru wilgotności gleb polega na wyzna-

czeniu skorelowanej z wilgotnością konduktancji (składowej rzeczywistej zespolonej przewodności elektrycznej) naczynia pomiarowego, a części jej odwrotności - rezystancji.

W opisie metody będzie - dla uproszczenia terminologii - używane pojęcie "oporność gleby", przy czym należy pamiętać, że chodzi tu o odwrotność składowej rzeczywistej przewodności naczynia konduktometrycznego. Metoda nosi również nazwę elektrooporowej.

Buschmann /15/ i Dobrzański /22/ wykazali, że pomiędzy wilgotnością W gleby a jej elektryczną opornością R występuje zależność:

$$\lg W = \frac{b - \lg R}{a},$$

gdzie:

a i b - współczynniki zależne od właściwości gleby i geometrii naczynia pomiarowego.

Przykładem wykorzystania metody konduktometrycznej do badania dynamiki wilgotności gleb mogą być prace Dobrzańskiego i współaut. /22, 23/. Stosowali oni płaskie elektrody o ustalonym dystansie, dociskane ze stałą siłą do próbki gleby, którą umieszczali w naczyniu pomiarowym, niszcząc uprzednio jej strukturę. Oporność elektryczną mierzyli mostkiem Kohlrauscha umożliwiającym kompensowanie wpływu susceptancji na wynik pomiaru.

2.6.2. Metoda amperometryczna

Istota metody polega na pomiarze zespolonej wartości natężenia elektrycznego prądu zmiennego płynącego w obwodzie zawierającym naczynie pomiarowe wypełnione glebą. W praktyce stosuje się amperomierz prądu zmiennego, do którego dołączone jest naczynie pomiarowe /105/. Gęstość próbki w naczyniu pomiarowym należy standaryzować.

2.6.3. Metoda delkometryczna

Metoda delkometryczna (dielectric constant), to grupa rozwiązań opartych na pomiarze skorelowanej z wilgotnością gleby składowej pojemnościowej naczynia pomiarowego (susceptancji). Wielkość ta będzie, dla uproszczenia terminologii, nazywana "pojemnością kondensatora glebowego".

Nazwa metody nie jest ścisła, ponieważ większość autorów podaje wy-

niki wprost w jednostkach pojemności elektrycznej, bez przeliczania ich na stałą dielektryczną gleby. Metoda ta nazywana jest również elektropojemnościową. Zaletą metody delkometrycznej jest liniowość zależności przyrostu pojemności kondensatora glebowego od przyrostu wilgotności umieszczonej w nim gleby i niewielki wpływ temperatury na wynik pomiaru /102/. Stała dielektryczna wilgotnej gleby wykazuje w zakresie niskich częstości silną dyspersję, tzn. zależność od częstości zmian napięcia przyłożonego do kondensatora glebowego /100/. Jest to związane z elektryczną polaryzacją układu, prowadzącą do powstawania na granicy elektrod z glebą podwójnej warstwy ładunku. Efekt ten maleje wraz ze wzrostem częstości prądu i zanika przy częstościach większych od 2 MHz, kiedy to wspomniana warstwa nie nadąża się już uformować. Efektu polaryzacji unika się stosując w pomiarach delkometrycznych prąd wysokiej częstości (najczęściej od 4 do 30 MHz). Podstawowym elementem układów pomiarowych bywa w tym wypadku obwód rezonansowy zasilany prądem zmiennym wysokiej częstości, którego składowym elementem jest kondensator glebowy /41,59/. Rozstrojenie obwodu lub kompensująca je pojemność są miarą wilgotności.

2.6.4. Metoda mikrofalowa

Stratność dielektryczna wody osiąga dużą wartość przy częstości pola elektrycznego zbliżonej do 10^{10} Hz. Przy tej częstości woda absorbuje energię fal elektromagnetycznych kilka tysięcy razy silniej niż sucha gleba o tej samej objętości. Nazwa metody związana jest z odpowiadającą takiej częstości długością fali (około 3,5 cm) zaliczaną do zakresu mikrofalowego.

W metodach mikrofalowych wykorzystuje się zależność pomiędzy wilgotnością gleby a wielkością współczynnika tłumienia energii wiązki mikrofal, w którą wprowadza się próbkę badanej gleby /47/. Typowa aparatura składa się z generatora prądu wysokiej częstości i z pary anten tubowych (nadawczej i odbiorczej) ustawionych naprzeciw siebie. Płaska fala elektromagnetyczna, emitowana przez antenę nadawczą, trafia bezpośrednio do anteny odbiorczej. Umieszczona pomiędzy antenami próbka gleby pochłania część energii wiązki mikrofal, zaś część odbija. Wilgotność próbki można określić drogą pomiaru zarówno współczynnika tłumienia, jak i współczynnika odbicia wiązki. Gęstość próbki musi być standaryzowana.

2.7. Metoda magnetycznego rezonansu jądrowego (MRJ)

Metoda MRJ jest oparta na pomiarze pochłaniania energii pola magnetycznego wysokiej częstotliwości przez jądra atomowe. Jądro atomu ma określony moment magnetyczny i zachowuje się w obcym polu magnetycznym jak elementarny magnes. Jeśli umieścić atom w stałym polu magnetycznym, to wektor momentu magnetycznego jego jądra doznaje precesji wokół linii sił tego pola. Wielkość kąta stożka precesji jest skwantowana i zależy od energii pola magnetycznego. Kwantową zmianę kąta precesji można wywołać nakładając na silne stałe pole magnetyczne słabsze pole szybkoszmiennie. Prawdopodobieństwo zmiany tego kąta (tzn. orientacji magnetycznego momentu jądra) osiąga największą wartość przy określonej częstotliwości magnetycznego pola zmiennego, zwanej częstotliwością magnetycznego rezonansu jądrowego. Zjawisku MRJ towarzyszy pochłanianie energii zmiennego pola magnetycznego, proporcjonalne do stężenia rezonujących jąder. Jądro każdego z pierwiastków wykazuje charakterystyczną częstotliwość MRJ. Dla protonu, którego moment magnetyczny wynosi $+2,79$ magnetonów jądrowych, częstotliwość MRJ wynosi w polu o natężeniu 10^4 gaussów $42,57$ MHz.

Typowy spektrometr jądrowy składa się z silnego elektromagnesu o regulowanym natężeniu pola oraz z celi pomiarowej. Cella pomiarowa jest to szklane cylindryczne naczynie, do którego wprowadza się próbkę. Na zewnętrznej ścianie naczynia nawinięta jest zwojnica dołączona do źródła prądu zmiennego o regulowanej częstotliwości. Wypełnioną próbką badanej gleby celę pomiarową umieszcza się w szczelinie elektromagnesu i, regulując natężenie pola lub częstotliwość prądu zmiennego płynącego przez zwojnicę, doprowadza do zjawiska MRJ protonu. Związane z MRJ pochłanianie energii pola magnetycznego przejawia się spadkiem napięcia w.c.z. występującym na zwojnicy. Wielkość tego spadku jest miarą wilgotności gleby. Spektrometry MRJ, specjalnie przystosowane do pomiaru wilgotności gleb, są budowane w laboratoriach [3/], jak również w krótkich seriach przez zakłady przemysłowe. Zakres pracy tych spektrometrów mieści się w granicach 5-100% nasycenia wodą, a błąd nie przekracza 0,5% [91/]. Czas potrzebny na wykonanie pomiaru wynosi kilka minut.

2.8. Metody ekstrakcyjne

Jest to grupa metod, w których wykorzystuje się zależność fizycznych właściwości ekstraktora od stopnia jego uwodnienia lub nawilgocenia. Taki sposób postępowania jest podyktowany dążnością do uwolnienia się od wpływu indywidualnych cech gleby na wyniki pomiaru.

2.8.1. Metoda elektrometryczna

Zasady, na których opiera się metoda elektrometryczna, zostały opisane w rozdziale 2.6. W metodzie tej ekstraktorem jest zazwyczaj mieszanina silnie higroskopijnego związku chemicznego z solą jedno- lub dwuwartościowego metalu. Występujące w nadmiarze w ekstrakcie glebowym kationy niwelują wpływ chemizmu gleby. Przykładem może tu być ekstraktor stosowany przez Hancocka i Burdicka /43/, w którego skład wchodziło: 70% alkoholu etylowego absolutnego, 30% acetonu i sól kuchenna w ilości około 0,44 g/l. Pomiary wykonywano prądem zmiennym o częstotliwości 5 kHz metodą konduktometryczną. Uzyskano prostopadłą zależność konduktancji ekstraktu od jego wilgotności. Temperaturowy współczynnik przewodności wahał się w granicach 0,6-0,9% zmierzonej konduktywności na 1 K.

Burton /14/ używał metody delkometrycznej stosując jako ekstraktor mieszaninę metanolu z solą kuchenną i azotanem amonu. Wiele przykładów zastosowań ekstrakcyjno-elektrometrycznych metod pomiaru wilgotności gleb można znaleźć w tematycznym zestawieniu Arble'a i Shawa /4/.

2.8.2. Metoda spektrofotometryczna

Metoda oparta jest na pomiarze ekstynkcji (wygaszania) promieniowania ultrafioletowego przechodzącego przez wyciąg glebowy. Przykładem może być tu praca Bowersa i innych /9/, którzy określali wilgotność gleby poprzez pomiar ekstynkcji alkoholowego ekstraktu gleby w świetle o długości fali 1,94 μm .

2.8.3. Metoda kolorymetryczna

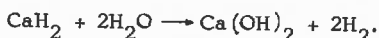
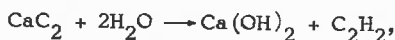
Metoda ta polega na pomiarze zmian zabarwienia ekstraktu glebowego skorelowanych ze stopniem uwodnienia ekstraktora.

Ekstrakcyjno-kolorymetryczna metoda oznaczania wilgotności gleb zos-

tała opracowana i udoskonalona przez Prusinkiewicza [83/ i Pokojską [80/]. Ekstraktorem jest tu mieszanina bezwodnego chlorku kobaltowego z acetonem (60 g CoCl_2 na 1000 ml acetonu na 5 gramów gleby). Roztwór kompleksowego związku chemicznego acetonu z chlorkiem kobaltowym ma barwę niebieską. Woda wypiera z kompleksu aceton, tworząc kolejno: mono-, dwu-, trój-, cztero-, pięcio-, i sześciohydraty, skutkiem czego zabarwienie ekstraktu zmienia się w kierunku czerwieni. Posługując się zestawem barwnych wzorców lub fotokolorymetrem można łatwo określić wilgotność ekstraktu, a tym samym badanej gleby.

2.9. Metoda stechiometryczna

Metoda stechiometryczna jest oparta na pomiarze ilości gazu wydzielonego w reakcji określonego związku chemicznego z zawartą w glebie wodą. Wykorzystuje się w niej reakcję wody glebowej z karbidem lub wodorkiem wapnia. [6,31,35,37,69,74/]. Reakcje te mają następujący przebieg:



Ilość wydzielonego acetyleny lub wodoru ściśle określa ilość wody, która wzięła udział w reakcji.

3. Pośrednie nieniszczące metody pomiaru wilgotności gleb

Nieniszczące pośrednie metody pomiaru wilgotności gleb charakteryzują się odrębnym sposobem wykonywania pomiaru. O ile w pośrednich metodach niszczących wydobytą na zewnątrz próbkę gleby należało umieścić w polu pomiarowym czujnika, tutaj czujnik wraz z wytworzonym przezeń polem wprowadza się do gleby.

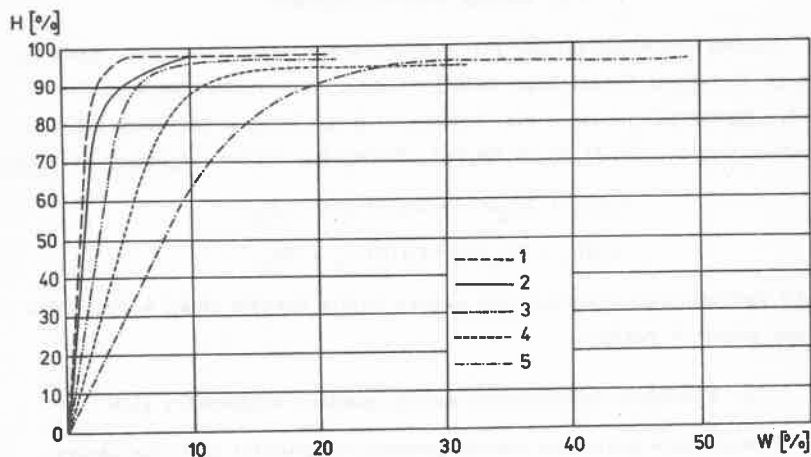
Czujniki stosowane w nieniszczących metodach pomiaru wilgotności gleb można podzielić na: stacjonarne, tzn. takie, które osadza się w profilu glebowym na stałe, i niestacjonarne, które wprowadza się do gleby wtedy, kiedy należy wykonać pomiar. Czujniki niestacjonarne są osadzane na zakończeniach wbijanych do gleby zaokrąglonych prętów lub są wprowadzane do osadzonych w glebie na stałe studzienek pomiarowych.

Wśród czujników stosowanych w metodach nieniszczących można jeszcze wydzielić klasę "czujników" bezkontaktowych. Należą do nich: aparat

fotograficzny, stosowany w metodzie teledetekcji, i układ do pomiaru albedo promieniowania podczerwonego. Te dwie metody dotyczą pomiaru wilgotności powierzchni gleby.

3.1. Metoda higrometryczna

Metoda higrometryczna oparta jest na zależności występującej pomiędzy wilgotnością powietrza glebowego a wilgotnością gleby. Pomiar wykonuje się za pomocą różnego typu higrometrów umieszczonych w glebie i stąd pochodzi nazwa metody. Typową zależność między wilgotnością powietrza glebowego H a wilgotnością gleby W ilustruje rycina 4 (wg de Castro /17/).



Ryc. 4. Zależność względnej wilgotności powietrza glebowego H od wilgotności gleby W dla różnych gleb według de Castro /17/.

1 - pył, 2 - piasek słabogliniasty, 3 - ił mioceniński, 4 - ił aluwialny, 5 - ił oligoceniński

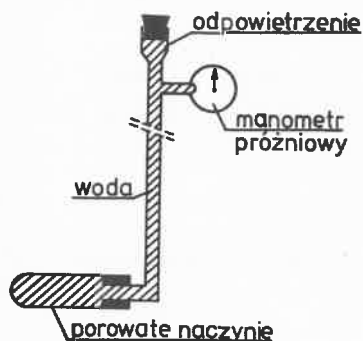
Higrometry stosowane w pomiarach wilgotności gleby mogą być czujnikami niestacjonarnymi /99/ lub stacjonarnymi. Rozwiązania konstrukcyjne higrometrów stacjonarnych zapewniają możliwość łatwego przetwarzania zmian ich właściwości, wywoływanych wahaniami wilgotności powietrza glebowego, na sygnał elektryczny. Opisy higrometrów, różniących się między sobą rozwiązaniem sposobu przetwarzania sygnału, można znaleźć w pracach 1, 10, 30, 39, 92, 103. Jak widać na rycinie 4, wilgotność powietrza glebowego w niewielkim stopniu zależy od wilgotności gleby w prawie całym przedziale uwilgotnień odpowiadającym wodzie łatwo dostępnej. Fakt

ten czyni higrometryczne metody pomiaru wilgotności gleb niezwykle trudnymi i mało przydatnymi, mimo niewątpliwej zalety, jaką jest operowanie czujnikiem pomiarowym w ściśle określonym, zawsze takim samym dla wszystkich gleb, środowisku. Najlepsze wyniki uzyskuje się, stosując do pomiaru odmianę higrometru - psychrometr /86, 94/.

3.2. Metoda tensjometryczna

Metoda ta wykorzystuje związek pomiędzy wilgotnością gleby a jej siłą ssącą, związaną z potencjałem wody glebowej /55, 56, 95/. Gleba wykazuje zdolność do absorpcji wody. Zdolność ta - zwana ssaniem lub siłą ssącą - jest zależna od wilgotności gleby. Dla gleby suchej ssanie wynosi około 10^7 hPa i maleje ze wzrostem jej wilgotności do zera. Jednostką siły ssącej jest 1 pF; pF = logarytm P, gdzie P - ciśnienie wyrażone w cm H_2O . Do pomiaru siły ssącej gleb służy tensjometr i stąd nazwa metody.

Zasadę działania tensjometrów można wyjaśnić na podstawie ryciny 5.



Ryc. 5. Zasada konstrukcji tensjometru według Kowalika /56/

Woda zawarta w porowatym naczyniu tensjometru ma kontakt z wodą glebową poprzez kapilary jego ścianek. Im bardziej sucha gleba, tym silniej wysysa ona wodę z naczynia, zaś tworzące się w nim podciśnienie jest wskazywane przez manometr.

Tensjometry znalazły szerokie zastosowanie w badaniach wilgotności gleb /4, 78, 108/.

3.3. Metoda termometryczna

Zasada metody została opisana w rozdziale 2.5. Czujniki ciepłotermometryczne dowolnego typu umieszcza się bezpośrednio w glebie. Przykłady rozwiązań można znaleźć w następujących pozycjach literatury: 18, 34, 63, 70, 89.

3.4. Metoda bloków kapilarno-porowatych

Zasada metody została opisana w rozdziale 2.3, a metody termometryczna i elektrometryczna w rozdziałach 2.5. i 2.6. Stacjonarne czujniki pomiarowe otoczone są przez kapilarno-porowatą substancję, którą zazwyczaj bywa gips, tkanina nylonowa, włókno szklane lub mieszanina różnych materiałów ziarnistych z gipsem. Ten sposób postępowania ma na celu uniezależnienie cechowania aparatury od zmienności tych cech gleby, które, poza temperaturą, w równym z wilgotnością stopniu wpływają na wyniki wskazań. Przykłady rozwiązań technicznych i procedur można znaleźć w następujących pozycjach literatury: 2, 8, 12, 42, 45, 46, 72.

3.5. Metody elektrometryczne

Zasada, na której oparte są metody elektrometryczne, została opisana wcześniej (rozdział 2.6). Spotkane rozwiązania dotyczą głównie metody konduktometrycznej i delkometrycznej.

3.5.1. Metoda konduktometryczna

Metoda polega na pomiarze konduktancji (lub oporności elektrycznej) gleby otaczającej czujnik. Przykładem może być metoda proponowana przez Dobrzańskiego i współaut. [25, 26], w której zaostrożony cylindryczny czujnik o wymiarach 4 x 1,5 cm zawierający dwie elektrody osadzone na wspólnym korpusie albo dwie niezależne elektrody o takich samych wymiarach [27] umieszcza się na żądanej głębokości profilu za pomocą stalowej rury, która w ruchu powrotnym wyprowadza na powierzchnię gleby przewody elektryczne. Pomiaru oporności elektrycznej dokonuje się mostkiem zmienoprądowym o częstotliwości prądu 1000 Hz.

Interesujące metodycznie rozwiązanie zaproponowali Edlefsen i Anderson [29] oraz Kirkham i Taylor [48]. Stosowali oni czujnik cztero-elek-

trodowy, w którym dwie skrajne elektrody doprowadzały prąd, zaś dwie wewnętrzne służyły do bezprądowego pomiaru spadku potencjału wzdłuż drogi prądu w glebie. Wielkość tego spadku oraz natężenie płynącego prądu pozwalały wyliczyć elektryczną oporność gleby. Taki sposób postępowania eliminował błąd wywołowany zjawiskami polaryzacji elektrolitycznej i niestabilnością kontaktu elektrod z glebą. Proponowany przez nich niestacjonarny czujnik umożliwia pomiar w warstwie 0-20 cm.

Opis konduktometrycznych metod pomiaru wilgotności gleb, w których stosuje się niestacjonarne czujniki wykonane w postaci cienkich igieł sięgających na znaczną głębokość profilu, można znaleźć w pozycjach: 36, 97, 104, 109.

3.5.2. Metoda amperometryczna

Metoda polega na pomiarze zespolonego natężenia prądu za pomocą czujników opisanych powyżej. Przykładem rozwiązania może być praca Gruszki /41/, który posługiwał się w pomiarach igłowym czujnikiem i amperomierzem prądu zmiennego.

3.5.3. Metoda delkometryczna

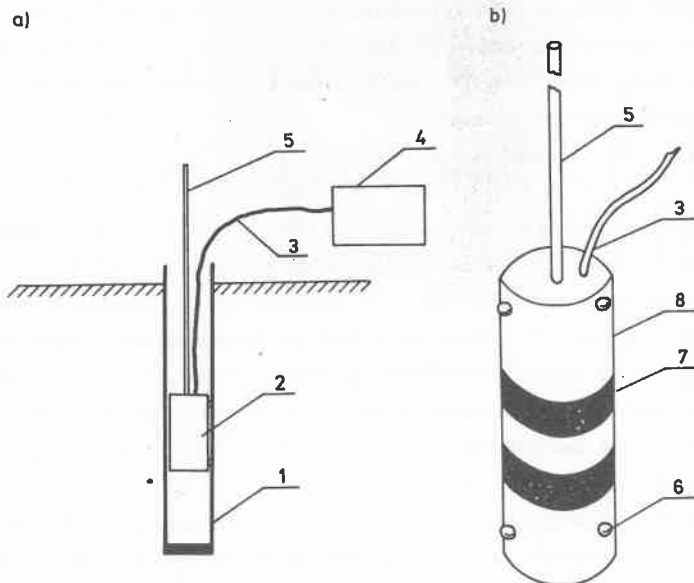
Większość znanych rozwiązań metody delkometrycznej dotyczy aparatury umożliwiającej pomiar do głębokości nie przekraczającej 30 cm.

Przykładem metody stosowanej do pomiarów powierzchniowych może być praca Platara /79/, który posługiwał się kondensatorem pomiarowym w postaci dwóch równoległych płytek stalowych wbijanych w glebę prostopadłe do powierzchni. Wymiary płytek 2,5 x 3,8 cm; odstęp 2,5 cm. Pojemność mierzył zmodyfikowanym przez siebie mostkiem Wagnera zasilanym napięciem o częstotliwości 1000 Hz.

Jednym z niewielu zastosowań metody delkometrycznej do pomiarów w głębszych warstwach profilu gleby jest aparatura skonstruowana przez Ballę /5/. Jest to kondensator pomiarowy z elektrodami usytuowanymi na poboczniczy stożka, będącego zakończeniem wbijanej do gleby na żadaną głębokość stalowej rury. Częstotliwość prądu zasilającego układ pomiarowy wynosiła 1000 Hz.

Najnowszym rozwiązaniem metody jest aparatura skonstruowana przez Malickiego /68/. Aparat składa się z sondy połączonej przewodem elek-

trycznym z odczytnikiem (ryc. 6a). Sonda składa się z dwóch części: stacjonarnej, wykonanej w postaci rury z materiału izolacyjnego, osadzonej w badanym materiale na stałe, zamkniętej z jednego końca, oraz z ruchomego kondensatora pomiarowego, którego konstrukcję wyjaśnia rycina 6b. Kondensator jest zbudowany z walcowego, wykonanego z materiału izolacyjnego, korpusu, na którego powierzchni znajdują się okładki kondensatora w formie dwóch metalowych pasków ułożonych płasko obok siebie na powierzchni bocznej walca w taki sposób, że tworzą dwa pierścienie, których geometryczne środki leżą w osi walca. Na krańcach tego walcowego korpusu znajdują się po dwa sprężyste elementy (stabilizatory położenia), uginające się prostopadle do pobocznic, co zapewnia powtarzalność geometrii układu kondensator-rura podczas wielokrotnego opuszczania kondensatora na żadaną głębokość.



Ryc. 6. Wilgotnościomierz delkometryczny według autora /68/; a) zasada pomiaru, b) konstrukcja kondensatora pomiarowego

1 - plastikowa rura osadzona w glebie na stałe, 2 - kondensator pomiarowy, 3 - przewód elektryczny, 4 - odczytnik, 5 - uchwyt, 6 - stabilizatory położenia, 7 - okładki kondensatora, 8 - korpus kondensatora

Elementy te są wykonane w postaci osadzonych w specjalnych gniazdach (niewidocznych na rysunku) kulek, wyciskanych sprężynami w kierunku

bocznej powierzchni walca. Manipulowanie kondensatorem pomiarowym wewnątrz rury umożliwia uchwyt wykonany z metalowego pręta, połączonego z korpusem kondensatora specjalnym zaczepem.

W celu dokonania pomiaru kondensator opuszcza się do rury na żadaną głębokość. Do okładek kondensatora jest doprowadzone zmienne napięcie elektryczne o częstotliwości 30 MHz. Elektryczne pole, wytworzone na zewnątrz kondensatora pomiarowego, przenika do gleby poprzez ściankę rury. Im wilgotniejsza jest gleba, tym większa jest jej przenikalność dielektryczna (stała dielektryczna) i tym większy jest przyrost elektrycznej pojemności tego kondensatora.

Elektryczny układ pomiarowy jest umieszczony w korpusie kondensatora, zaś w odczytniku znajduje się baterijny zasilacz oraz miernik wychyłowy. W ściance korpusu kondensatora znajduje się (niewidoczne na rysunku) przyłącze umożliwiające dołączenie do układu pomiarowego specjalnej minisondy o analogicznej konstrukcji, służącej do cechowania aparatury w laboratorium na próbkach z nienaruszoną strukturą, pobranych do standardowych metalowych pierścieni. Aparaturę można wycechować również w warunkach polowych, jeśli wahania wilgotności występujące w objętym obserwacją okresie osiągają około $2/3$ pojemności wodnej.

Podobne rozwiązanie metody delkometrycznej proponują Kuraż i Matousek [61/.

3.6. Metoda penetrometryczna

W metodzie penetrometrycznej wykorzystuje się zależność występującą pomiędzy wilgotnością gleby a jej zwięzłością. Pomiar polega na określeniu oporu, jaki stawia gleba zagłębianemu w nią metalowemu prętowi. Przykładem, ilustrującym metodę, może być przyrząd opisany przez Kolasiewa i Kozłowa [52/.

Autorzy stosują stalowy pręt, który wciskany jest zawsze na tą samą głębokość, a niezbędna do wciśnięcia siła jest miarą zwięzłości gleby, a zatem i jej uwilgotnienia.

3.7. Metody radiometryczne

Jest to grupa metod, których zasada oparta jest na oddziaływaniu energii promieniowania fal elektromagnetycznych oraz energii promieniowania korpuskularnego i wilgotnej gleby.

3.7.1. Metoda gammametryczna

Metoda ta wykorzystuje osłabienie natężenia wiązki promieni gamma przechodzącej przez ośrodek materialny. Natężenie I wiązki osłabionej w stosunku do pierwotnego natężenia I_0 wynosi zgodnie z prawem Beera-Lamberta:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu \rho l},$$

gdzie:

μ - masowy współczynnik pochłaniania zależny od charakteru ośrodka,

ρ - ilość atomów ośrodka w jednostce objętości,

l - grubość warstwy prześwietlanego ośrodka.

Dla gleby powyższa formuła ma postać:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\mu_p \rho_p + \mu_g \rho_g + \mu_w \rho_w) l},$$

gdzie indeksy p , g i w oznaczają odpowiednio: powietrze, stałą fazę gleby i wodę. Dla gleb niepęczniejących można przyjąć, że iloczyn $\mu_g \rho_g$ pozostaje stały, a więc: $e^{-\mu_g \rho_g l} = A$. Ponieważ: $e^{-\mu_p \rho_p l} \approx 1$, można napisać:

$$I = I_0 A e^{-\mu_w \rho_w l}.$$

ρ_w jest tutaj wilgotnością objętościową gleby, zaś $\mu_w l$ ma wartość stałą, więc:

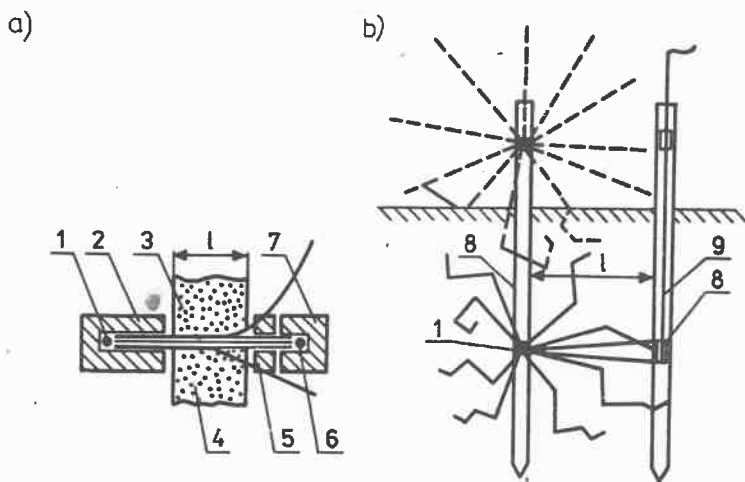
$$I = I_0 A B e^{-\rho_w} = C e^{-\rho_w}.$$

Widać, że natężenie I osłabionej wiązki promieniowania gamma zależy tylko od wilgotności gleby. W rzeczywistości gleby zmieniają nieco w czasie swoją gęstość i zależność $I = f(W)$ jest bardziej złożona. Ponieważ wielkość masowego współczynnika pochłaniania μ zależy od energii fotonów gamma, to stosując do prześwietlania gleby dwa źródła o różnych energiach E' i E'' uzyskuje się układ dwóch równań z dwiema niewiadomymi:

$$\left. \begin{aligned} I' &= I'_0 e^{-(\mu'_g \rho_g + \mu'_w \rho_w) l} \\ I'' &= I''_0 e^{-(\mu''_g \rho_g + \mu''_w \rho_w) l} \end{aligned} \right\},$$

skąd można wyliczyć zarówno wartość wilgotności ρ_w , jak też gęstość szkieletu ρ_g . Symbole μ' i μ'' oznaczają tu odpowiednio współczynniki

pochłaniania dla energii E' i E'' . Sposób wykonywania pomiarów według Emelianowa [32] wyjaśnia rycina 7.



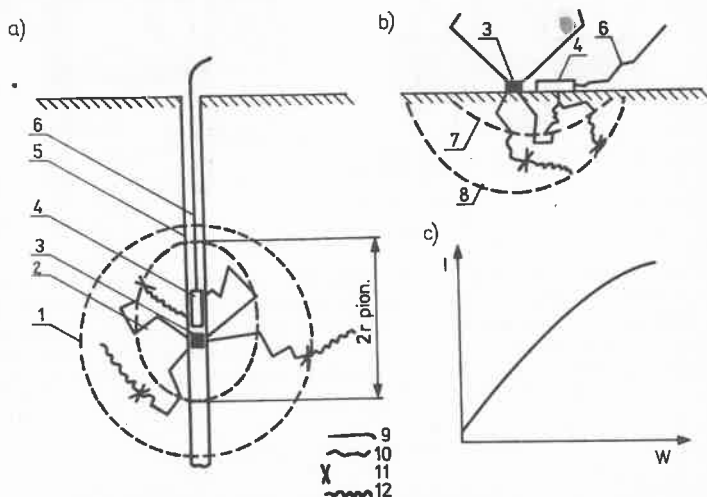
Ryc. 7. Gammametryczny pomiar wilgotności gleby skolimowaną wiązką a) i rozproszoną wiązką b) promieni gamma według Emelianowa [32]
 1 - źródło, 2 - kolimator, 3 - wiązka promieni gamma, 4 - warstwa gleby, 5 - diafragma, 6 - detektor, 7 - ekran ołowiany, 8 - rura metalowa osadzona w glebie na stałe, 9 - przewód elektryczny łączący sondę z licznikiem.

3.7.2. Metoda neutronometryczna

Szybkie neutrony przechodzące przez materię ulegają rozproszeniu, tzn. zderzają się z jądrami atomów, wskutek czego tracą energię i zmieniają kierunek. Najwięcej energii tracą neutrony w zderzeniach z jądrami atomów wodoru. Tak zwany przekrój czynny jądra wodoru na rozproszenie będący miarą prawdopodobieństwa zaistnienia zjawiska, jest w porównaniu z przekrojami innych składników gleby około 10 razy większy.

Jeśli w określonym punkcie profilu glebowego umieści się źródło szybkich neutronów, to wrócić mogą do tego punktu tylko neutrony rozproszone, silnie spowolnione (termiczne). Jeśli w tym samym co źródło punkcie profilu znajduje się detektor wrażliwy tylko na neutrony termiczne, to ilość zliczeń dołączonego doń przelicznika będzie proporcjonalna

do natężenia wiązki neutronów rozproszonych. Ponieważ natężenie promieniowania powracających do źródła spowolnionych (rozproszonych) neutronów jest proporcjonalne do ilości zderzeń z atomami wodoru (występującego w glebie głównie w wodzie), to ilość zliczeń przelicznika jest zarazem proporcjonalna do gęstości wodoru w glebie i jest miarą jej wilgotności. Sposób wykonywania pomiaru według Emelianowa /32/ ilustruje rycina 8. Metody gammametryczna i neutrometryczna są opisywane w wielu pozycjach literatury /7, 98/. Waloryzację tych metod przeprowadził Groenewelt /40/. Nowsze rozwiązania można znaleźć w pracach: 32, 33, 40, 62, 65, 71, 87.



Ryc. 8. Neutrometryczny pomiar wilgotności gleby według Emelianowa /32/; a) pomiar głębinowy, b) pomiar powierzchniowy, c) zależność natężenia zliczeń I od wilgotności gleby W ,

1 - przestrzeń sferyczna powolnych neutronów, 2 - strefa wrażliwości sondy, 3 - źródło szybkich neutronów, 4 - detektor powolnych neutronów, 5 - odwiert, 6 - przewód elektryczny, 7 - strefa wrażliwości sondy powierzchniowej, 8 - półsfera powolnych neutronów, 9 - neutrony szybkie, 10 - neutrony powolne, 11 - akty absorpcji neutronów przez jądra, 12 - promieniowanie gamma powstające w wyniku absorpcji neutronów, $2r_{\text{pion.}}$ - zdolność rozdzielcza metody.

3.7.3. Metoda albedo

Stosowana jest do pomiaru wilgotności powierzchni gleb. Metoda ta wykorzystuje zależność między natężeniem odbitej wiązki promieniowania

Tabela 1. Podstawowe номinatory stosowane w fizyce gleb według Kowalika [56/]

Pojęcie ogólne	Ciepło	Tlen	Woda
Przepływ	$f_w = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$ prawo Fouriera (1822)	$f_g = -Dg \frac{\partial \chi}{\partial x}$ prawo Ficka (1855)	$v = -K_h \frac{\partial P^*}{\partial x}$ prawo Darcy (1856)
Zasada zachowania masy i energii	$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{\partial f_w}{\partial x} + q_c$	$\frac{\partial G}{\partial t} = -\frac{\partial f_g}{\partial x} + q_r$	$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial x} - q_w$
Równanie ruchu dla profilu glebowego	$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_c$	$\frac{\partial (cg \cdot \chi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Dg \frac{\partial \chi}{\partial x} \right) - g_r$	$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_h \frac{\partial P}{\partial x} \right) - q_w$
Niektóre warunki graniczne	dla $x = 0$, $T = T_i$ dla $x = H$, $\partial T / \partial x = 0$	dla $x = 0$, $\chi = \chi_0$ dla $x = L$, $d\chi/dx=0$ dla $x > L$, $q_r = 0$	dla $x = 0$, $\theta = \theta_g$ dla $x = H$, $\theta = \theta_d$ q_w jest funkcją θ, T, χ

Tabela 2. Matematyczne modele stosowane do opisu transportu ciepła i masy w glebie według Kowalika /56/

Zapis ogólny		Ciepło	Tlen	Woda
Przepływ f	f_c	Przepływ f_c [cal cm ⁻² sek ⁻¹]	Przepływ f_g [mg cm ⁻² sek ⁻¹]	Przepływ v [cm ³ cm ⁻² sek ⁻¹] = [cm sek ⁻¹]
Potencjał ψ		Temperaturowy równoważnik potencjału czyli temperatura T [stop]	Stężeniowy równoważnik potencjału czyli koncentracja wagowa χ [mg cm ⁻³]	Cięśniowy równoważnik potencjału wody glebowej P^* [dyn cm ⁻²] = [10 ⁻³ m bar]
Współczynnik przepływu B		Współczynnik przewodności cieplnej gleby λ [cal cm sek ⁻¹ stop ⁻¹]	Współczynnik dyfuzji tlenu w glebie D_g [cm ² sek ⁻¹]	Przewodność hydrauliczna K_h [g ⁻¹ cm ³ sek]
Ilość A		Ilość ciepła w glebie W [cal cm ⁻³]	Ilość tlenu w glebie G [mg cm ⁻³]	Uwilgotnienie gleby θ [cm ³ cm ⁻³]
Pojemność C		Pojemność cieplna gleby C_w [cal cm ⁻³ stop ⁻¹]	Pojemność powietrzna czyli porowatość gazowa gleby ε_g [cm ³ cm ⁻³]	Pojemność wodna gleby C_h [dn ⁻¹ cm ²]
Dyfuzyjność B/C		Dyfuzyjność cieplna gleby $D_c = \lambda / C_w$ [cm ² sek ⁻¹]	Dyfuzyjność tlenu w glebie $D = D_g / \varepsilon_g$ [cm ² sek ⁻¹]	Dyfuzyjność wody w glebie $D = K_h / C_h$ [cm ² sek ⁻¹]
Aktywność q		Generacja ciepła w glebie $+q_c$ [cal cm ⁻³ sek ⁻¹]	Respiracja tlenu w glebie $-q_r$ [mg cm ⁻³ sek ⁻¹]	Wydatek poboru wody w glebie przez korzenie $-q_w$ [cm ³ cm ⁻³ sek ⁻¹] = [sek ⁻¹]

podczerwonego a wilgotnością gleby. Albedo, czyli stosunek natężenia I wiązki odbitej do natężenia wiązki padającej I_0 , zmienia się w granicach $0 < \frac{I}{I_0} < 1$, przy czym 0 odpowiada glebie nasyczonej a 1 suchej. Zależność albedo od wilgotności, przy długości fali $1,95 \mu\text{m}$, jest logarytmiczna [90/.

3.7.4. Metoda teledetekcji

Metoda ta nie różni się w swojej istocie od metody albedo. Stosowana jest do oceny wilgotności powierzchniowej dużych obszarów. Technika pomiarowa opiera się na wykonywaniu tzw. wielospektralnych fotografii satelitarnych i lotniczych przez odpowiednie zestawy filtrów optycznych obejmujących swym zakresem strefę promieniowania podczerwonego [106/.

3.8. Metoda prognostyczna

Metoda prognostyczna polega na przewidywaniu wilgotności gleby na podstawie danych klimatycznych. Wyliczenia przeprowadza się metodami numerycznymi wychodząc z podstawowych modeli matematycznych opisujących ruch ciepła, gazu i wody w glebie oraz w roślinach. Stosowane w tej metodzie podstawowe nominatory i modele matematyczne według Bolta w modyfikacji Kowalika [56/ są zawarte w tabelach 1 i 2.

Rozwój metody datuje się od momentu rozpowszechnienia numerycznych metod obliczeniowych wykorzystujących technikę komputerową. Przykłady matematycznego prognozowania wilgotności gleby można znaleźć w pracach Kowalika [56, 57/, Zaradnego i Kowalika [110/, Parlange'a [76/, Knighta i Philipa [49/.

KRYTERIA DOBORU I ANALIZA PRZYDATNOŚCI METOD POMIARU WILGOTNOŚCI GLEB DO KONTROLI JEJ DYNAMIKI

Poniżej przedstawiono ocenę przydatności opisanych metod do kontroli dynamiki wilgotności gleb. Ocenę przeprowadzono w aspekcie potrzeb doświadczalnictwa, wychodząc z założenia, że zakres wymagań stawianych w tej dziedzinie zawiera w sobie kryteria użyteczności metod do celów kontroli i sterowania ruchem wody w glebie.

Obserwacja dynamiki wilgotności gleb jest zazwyczaj elementem kompleksu badań służących określonemu celowi. Kryteria, którym powinna odpowiadać zastosowana metoda i aparatura, zależą od specyfiki prowadzonych badań. Najmniejsze wymagania stawia się metodom stosowanym w badaniach zmian uwilgotnienia powierzchni gleb na dużych obszarach, średnie - w badaniach dynamiki wilgotności związanych z doświadczeniami uprawowo-nawozowymi, a największe - w terenowych badaniach podstawowych, prowadzonych w celu wyznaczenia wartości wodnych parametrów gleby.

Można zaproponować następujące kryteria doboru metod:

1. Kryterium selektywności - jest ono spełnione wtedy, kiedy wynik pomiaru zależy wyłącznie od wilgotności gleby. Kryterium to najlepiej spełniają metody bezpośrednie - grawimetryczne. Uważa, się, że wynik pomiaru dokonanego dowolną z tych metod zależy tylko od wilgotności gleby, zaś pozostałe właściwości gleby, jak: gęstość, temperatura, skład mechaniczny itp, nie mają na pomiar żadnego wpływu.

2. Kryterium destruktywności - związane ze stopniem zniszczenia, jakiemu ulega naturalny układ gleby, i stopniem zaburzenia toku zachodzących w glebie procesów w trakcie dokonywania pomiaru. W świetle tego kryterium najniżej należy ocenić metody bezpośrednie, najwyżej zaś - pośrednie nieniszczące, operujące czujnikami nie wywołującymi lokalnych zagęszczeń gleby w miejscu ich osadzenia i zakłóceń w rozkładzie pola temperatury.

3. Kryterium dokładności. Metoda odpowiada mu wtedy, kiedy stosowanie jej nie powoduje przekroczenia granicy błędu określonej dla danego doświadczenia.

4. Kryterium ciągłości - jest spełnione przez te metody, których procedura umożliwia prowadzenie pomiarów zawsze w tym samym punkcie profilu gleby w sposób nieprzerwany.

5. Kryterium bezwładności - określa je czas reakcji stosowanej w metodzie aparatury na gwałtowną zmianę uwilgotnienia oraz czas potrzebny do wykonania pomiaru.

6. Kryterium rozdzielczości - jest spełnione, jeśli metoda pozwala mierzyć rozkład wilgoci w profilu glebowym w warstwach o ściśle określonej miąższości, (lecz nie przekraczającej 5 cm) do głębokości nie mniejszej niż 150 cm.

7. Kryterium postaci sygnału - którego spełnienie uwarunkowane jest stopniem trudności przetwarzania informacji na sygnał elektryczny, najbardziej odpowiedni do dalszej obróbki i magazynowania danych.

8. Kryterium BHP - jest spełnione, jeśli stosowanie metody nie grozi ujemnymi następstwami z punktu widzenia bezpieczeństwa i higieny pracy oraz ochrony środowiska.

W doborze metody dynamiki wilgotności gleb bierze się zazwyczaj pod uwagę również jej pracochłonność i koszt aparatury [77]. Te cechy metod - jako drugorzędne - nie zostały powyżej uwzględnione.

Waga poszczególnych kryteriów nie jest określona. W pomiarach dynamiki wilgotności dotyczących wielu punktów terenu najważniejsze jest kryterium bezwładności, a najmniej ważne kryterium dokładności, zaś przy wyznaczaniu wartości wodnych parametrów profilu gleby "in situ" pierwszorzędą rolę grają kryteria: selektywności, dokładności, destruktywności i rozdzielczości, a nieistotne jest kryterium postaci sygnału i BHP. Jeżeli rozpatrujemy kryteria doboru metod z punktu widzenia organizatora prowadzonych na szeroką skalę pomiarów dynamiki wilgotności gleb, niezwykle istotne staje się kryterium BHP, które z kolei nie jest ważne w badaniach podstawowych, prowadzonych siłą rzeczy przez personel o wysokich kwalifikacjach.

W większości zastosowań metod pomiaru wilgotności gleb w badaniach dynamiki "in situ" najważniejsze są kryteria: selektywności, destruktywności, ciągłości, rozdzielczości i dokładności, przy czym ostatnie z nich jest najmniej rygorystyczne. Powyższe stwierdzenie dotyczące kryterium dokładności wynika z faktu, że gleby wykazują dość znaczny naturalny rozrzut właściwości w obszarach, które pod względem morfologii profilu uważa się za jednorodne [85, 93, 96]. Ponieważ potencjał wody glebowej zawsze dąży do wyrównania się w całej objętości gleby, to jakiegokolwiek lokalne niejednorodności poziomu genetycznego powodują powstawanie fluktuacji w jego uwilgotnieniu, które mogą sięgać 40% odchylenia od wartości średniej [96].

Przystępując do oceny opisanych wcześniej metod pod kątem ich przydatności do pomiaru dynamiki wilgotności gleb w świetle zaproponowanych kryteriów, należy wyeliminować z rozważań metody: higrometryczną,

tensjometryczną, bloków kapilarno-porowatych, termometryczną i edometryczną, jako oparte na błędnych założeniach. Wilgotność powietrza glebowego, wilgotność ciała kapilarno-porowatego i podciśnienie wskazywane przez tensjometr są wielkościami zależnymi od potencjału wody glebowej, a nie od wilgotności gleby. Wzajemna zależność potencjału wody glebowej i wilgotności gleby nie jest jednoznacznie określona. Wykazuje ona histerezę, której przebieg zależy od "historii" uwilgośnienia /44,54, 81, 111/. Teoretyczny dowód błędności metody bloków kapilarno-porowatych przeprowadził Przestalski /84/.

Metody termometryczna i edometryczna są merytorycznie błędne ze względu na niemonotoniczność związku między właściwościami gleby, na których są one oparte, i uwilgotnieniem gleby. Aby można było określonej zmiennej zależnej Y przypisać jedną i tylko jedną wielkość zmiennej niezależnej X , wzajemny związek funkcyjny tych wielkości musi być ściśle monotoniczny. Znaczy to, że zależność danej właściwości od uwilgotnienia musi być w całym przedziale zmian tylko rosnąca albo tylko malejąca.

Dyskusyjna wydaje się również merytoryczna poprawność tych metod, w których operuje się igłowymi lub prętowymi czujnikami osadzonymi w glebie drogą penetracji. W niektórych metodach elektrometrycznych /25, 28/ i w metodzie penetrometrycznej przyjęto, że wciśnięty w glebę czujnik nie ma destrukcyjnego wpływu na właściwości gleby. Taki punkt widzenia nie jest słuszny, gdyż gleba wokół czujnika ulega zagęszczeniu /71/. Ponieważ pole pomiarowe czujnika ogranicza się praktycznie do najbliższej mu przestrzeni, której wymiary są porównywalne z wymiarami obszaru gleby o zmienionej gęstości, pomiar wilgotności gleby jest sfałszowany.

Odrębny problem stanowi zagadnienie poprawności stosowania w pomiarach dynamiki wilgotności gleb metod z grupy niszczących. Metody z tej grupy najlepiej spełniają kryteria: selektywności, dokładności, rozdzielczości i BHP, jednakże nie odpowiadają pozostałym kryteriom, w tym kryterium ciągłości. Niespełnianie kryterium ciągłości przez stosowaną metodę niszczącą zmusza do takiego mnożenia ilości punktów pomiarowych, by każdy następny znalazł się poza zasięgiem zaburzeń wprowadzanych przez

naruszony układ gleby poprzednich. Inaczej mówiąc, pomiary należy wykonywać według kwadratowej siatki geometrycznej o boku, którego długość można szacować na nie mniej niż około 0,5 m - przy stosowaniu świdra lub łaski gleboznawczej - i nie mniej niż około 2 m przy odkrywkach na szerokość łopaty. Biorąc pod uwagę, że zaburzenia procesów glebowych odbijają się nie tylko na pomiary wilgotności, lecz także na wynikach zamierzonego doświadczenia, stajemy przed alternatywą: ograniczenia częstości pomiarów lub takiego zwiększenia powierzchni poletka by wystarczyła na pełny czas trwania eksperymentu. Zmniejszenie częstości pomiarów poniżej pewnego minimum podważa celowość ich prowadzenia, zaś rozszerzenie powierzchni doświadczenia powyżej pewnej granicy jest (pominąwszy względy ekonomiczne) praktycznie nierealne, ponieważ poletko powinno być pod każdym względem jednorodne.

Tak więc stosowanie niszczących metod kontroli dynamiki wilgotności gleby zmusza do kompromisu między zamierzoną powierzchnią poletka, a częstością prowadzonych na nim pomiarów wilgotności. Jeśli uwzględnić, że zaburzenia w naturalnym układzie gleby wywoływane pobieraniem z niej próbek są nieodwracalne w okresie kilku lat, widać, że raz wykorzystany teren ma w każdym następnym cyklu doświadczalnym odrębną i niestabilną charakterystykę.

Przytoczone niedogodności stosowania w pomiarze dynamiki wilgotności gleb metod niszczących skłaniają do pominięcia ich w dalszych rozważaniach.

Selekcjonując metody pomiaru wilgotności gleb w świetle powyższych uwag i podanych kryteriów, należy pozostawić do rozpatrzenia metody pośrednie nieniszczące: prognostyczną, konduktometryczną, delkometryczną oraz gammametryczną z zastosowaniem wiązki skolimowanej i dwóch, różniących się energią promieniowania, źródeł.

Założenia, na których opiera się metoda prognostyczna, pozwalają ocenić ją jako idealną, ponieważ spełnia ona w całości wszystkie kryteria. Mimo atrakcyjności metody stosowanie jej do przewidywania dynamiki wilgotności gleb nie jest aktualnie możliwe z uwagi na to, że modele matematyczne, opisujące przebieg procesów transportu w glebie w oparciu o charakterystykę jej właściwości i dane klimatyczne,

są jeszcze niedostatecznie precyzyjne. Rozpowszechnienia metody prognostycznej w praktyce rolniczej można oczekiwać w przyszłości, kiedy - poza rozwiązaniem spornych jeszcze kwestii poprawności modelowania matematycznego - powszechnym narzędziem stanie się, niezbędna przy jej stosowaniu, komputerowa technika przetwarzania danych.

Metoda konduktometryczna [27] jest kontrowersyjna, ponieważ stosowanie jej wymaga częstego cechowania in situ na podstawie grawimetrycznych pomiarów wilgotności próbek gleby pobieranych w pobliżu miejsca zamocowania elektrod. Jest więc ona w gruncie rzeczy uzupełnieniem metody grawimetrycznej, obniżającym stopień jej destruktywności.

Wstępna ocena metody delkometrycznej [68] oparta na eksperymencie polowym [53] jest pozytywna, jednakże procedura cechowania aparatury w laboratorium nie została jeszcze ostatecznie dopracowana, zaś możliwość wycechowania aparatury in situ jest uzależniona od amplitudy wilgotności, co może ograniczać zastosowanie metody jedynie do pomiarów w górnych partiach profilu.

Metodę gammametryczną z zastosowaniem dwóch źródeł i wiązki skolimowanej można uznać za bliską doskonałości, ponieważ spełnia ona w dużym stopniu pięć podstawowych w większości zastosowań, kryteriów: selektywności, destruktywności, ciągłości, rozdzielczości i dokładności. O wysokiej ocenie metody decyduje tu przede wszystkim spełnienie kryterium selektywności, którego - poza nią - nie spełnia żadna z instrumentalnych metod pośrednich nieniszczących. Niedogodnością metody w niektórych szczególnych zastosowaniach, związanych z badaniami podstawowymi, jest jej bezwładność. Jeden pomiar trwa - w zależności od standardu rozwiązania technicznego i aktywności stosowanych źródeł - od kilkunastu do kilku minut. Dyskusyjny może również wydawać się stopień spełniania kryterium destruktywności, ponieważ konieczność instalowania w glebie na stałe dwóch rur w niewielkiej od siebie odległości (ok. 70 cm) prowadzi do zniekształcenia pola temperaturowego gleby, a w następstwie - izolacji jej uwilgotnienia w prześwietlanym obszarze [107]. Metoda gammametryczna jest dostatecznie dopracowana pod względem merytorycznym i konstrukcyjnym, by można ją było z powodzeniem stosować do kontroli dynamiki wilgotności w większości doświadczeń z glebą, jednakże

zagrożenie, jakie stwarza posługiwanie się materiałem promieniotwórczym, wymagania BHP, a co za tym idzie konieczność posiadania wysokich kwalifikacji i specjalnych uprawnień przez posługujący się nią personel, oraz wysoki koszt i kłopotliwa obsługa aparatury nie kwalifikują jej do szerokiego rozpowszechnienia.

ZAKOŃCZENIE

Podsumowując należy stwierdzić, że nie dysponujemy dziś żadną metodą pomiaru zawartości wody w glebie, która by jednocześnie była przydatna do kontroli dynamiki wilgotności i nadawała się do rozpowszechniania. Ten stan rzeczy uzasadnia celowość podjęcia poszukiwań nowych rozwiązań spełniających powyższe warunki.

PIŚMIENNICTWO

1. Agrofizyčeskije pribory i awtomaticzeskije ustrojstwa, Sbornik Trudow WASCHNIE, 1968, 16.
2. Anders S.: Zur Bodenfeuchtenmessung mit der Gipsblockmethode, Arch. Acker - u. Pflanzenbau u. Bodenkunden, 1971, t. 15, nr 11, 963-969.
3. Andriejew S.W., Martens B.K.: Opriedielenije wlaźnosti poczw mietodom jadriennogo magnitnogo riezonansa, Poczw., 1960, nr 10, 112-115.
4. Arble W.C., Shaw M.D.: Bibliography on Methods for Determining Soil Moisture, Eng. Res. Bull. B-78, Coll. of Eng. End. Arch., University Park, Penn. 1959.
5. Balla A.: Rapid Determination of Soil Moisture on the Spot without Sampling, Agrartudomány, 1951, 3, 430-435.
6. Berg L.G., Sitnikov N.W.: Skorostnoje opriedielenije wlaźnosti poczw gidridnym mietodom, Poczw., 1958, 5, 78-80.
7. Bibliography of Soil Science Fertilizers and General Agronomy. Commonwealth BUR of Soils Harpendet. England 1956-1959.
8. Bloodworth H.E., Page J.B.: Use of Thermistors for the Measurement

- of Soil Moisture and Temperature, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1957, vol. 21, nr 1, 11-15.
9. Bowers S.A., Smith S.J., Fisher H.D., Miller G.E.: Soil Water Measurement with an Inexpensive Spectrophotometer, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1975, 39, 3, 391-393.
 10. Bouyoucos G.J., Cook R.L.: Measuring the Relative Humidity of Soils at Different Moisture Contents by the Gray Hydrocal Hygrometer, Soil Sci., 1967, t. 104, nr 4, 297-306.
 11. Bouyoucos G.J.: The Rapid Method of Determining of Soil Moisture by Alcohol, J. Am. Soc. Agron., 1927, t. 19, 496.
 12. Bouyoucos G.J.: New Electrical Soil-Moisture Measuring Unit, Soil Sci., 1972, t. 114, nr 6, 493.
 13. Breszkowskij P.M.: Uskorieńnoje opriedielenije właźnosti poczwij mietodom pressa, Poczw., 1957, nr 8, 79-85.
 14. Burton jr. M.B.: Determination of Moisture in Soils Using High Frequency Methods. Master's thesis A and M. College of Texas, 1955.
 15. Buschmann H.: Die Bestimmung der Bodenfeuchte mit einer V2A-Stahl-Plexiglasselectrode, Z. Pflanzenernähr. ..Dung. Bodenkunde, 1956, t. 72.
 16. Canarache A., Dakkesian S., Matoc E.: Contributii la metoda rapida de determinare a umiditatii solului prin uscare i etuva la 150°C, Probleme de Pedologie, 1958, 75-82.
 17. Castro de E.: Hydrometric Method of Measuring Moisture Contents in Porous materials, Humidity and Moisture, 1965, t. 4, 7-12.
 18. Cornish P.M., Laryea K.B., Bridge B.J.: Aamondestructive Method of Following Moisture Content and Temperature Changes in Soils Using Thermistors, Soil Sci., 1973, t. 115, nr 4, 309-314.
 19. Czuprin I.A.: Nowyj objemnyj mietod opriedielenija właźnosti poczwij, Gidrotechnika i Melioracja, 1955, nr 10, 16-19.
 20. Dimpleby G.W.: A Simple Method for the Comparative Estimation of Soil Water, Plant and Soil, 1954, t.5, nr 2, 143-154.
 21. Dimo W.N.: K woprosu o zawisimosti mieźdu tiempieraturoprowodnostiu i właźnostiu poczwij, Poczw., 1948, 12, 729-733.

22. Dobrzański B.: Wilgotnościomierz elektrometryczny do pomiaru wilgotności gleb wytworzonych z piasków, Roczn. Gleb., 1961, dodatek do t. X., 628-630.
23. Dobrzański B., Gliński J., Malicki M.: Electrical Resistance Method for Measuring Moisture Dynamics in Sandy Soils, Roczn. Gleb., 1964, dodatek do t. XIV, 15-21.
24. Dobrzański B.: Gleby i ich wartość użytkowa, PWRiL, Warszawa 1966.
25. Dobrzański B., Gliński J., Malicki M., Domżał H.: New Electrical Resistance Method for Continuos Measurements of Soil Moisture Content under Field Conditions, International Soil Water Symp., Praha, 1967, 177-187.
26. Dobrzański B., Domżał H., Malicki M.: Badania przydatności metody elektrometrycznej do pomiaru dynamiki wilgotności gleb wytworzonych z piasku w warunkach doświadczeń uprawowo-nawozowych, Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 1968, z. 77 b, 225-241.
27. Dobrzański B., Malicki M.: A Conductometric Method for the Control of the Moisture Dynamics of Mineral Soils, Polish J. of Soil Sci., 1979, vol. XII, nr 2, (w druku).
28. Domżał H., Malicki M.: Stacjonarna elektroda sonda do pomiarów wilgotności gleb wytworzonych z piasków, Roczn. Gleb., 1965, dodatek do t. XV, 193-197.
29. Edlefsen N.E., Anderson A.B.C.: Four Electrode Resistance Method for Measuring Soil Moisture Content under Field Conditions, 1941, Soil Sci. 51, 367-376.
30. Elektronnyje izmieritielnyje ustrojstwa w agrofiziczeskich issledowanijach, Sbornik trudow WASCHNİL, 1970, 25, 1-220.
31. Elicur A.G.: Gidridnyj mietod opriedielenija wody w akwakomplik-snych sojedineniach, Żurnał ob. Chimi, 1949, t.10, 22, 39-42.
32. Emelianow W.A.: Poliewoja radiometria wlaźnosti i płotnosti poczwo-gruntow, Atomizdat, Moskwa, 1970, 16-23.
33. Filipkowska H.: Polish Isotope Apparatus for Research on Soil Moisture. Water in the Unsaturated Zone, Proc. Wageningen Symp., 1969, t. 1, 124-127.

34. Foldi T., Szonyi L.: Measurement of Soil Moisture from the Temperature Gradient. Water in the Unsaturated Zone, Proc. Wageningen Symp., 1969, t. 1. 113-119.
35. Fakunaga E.T., Dean L.A.: A Simple Apparatus for the Rapid Determination of Moisture by the Carbide Method, Hawaiian Plant, Rec., 1939, 43, 1, 3-5.
36. Gardner F.D.: The Electrical Method of Moisture Determination in Soils, U.S. Dept. Agr. Div. Soils Bull., 1897, 12.
37. Gatke C.R.: Über die Bestimmung des Wassergehalts von Bodenproben mittels Carbid, A. Thaeer - Archiv., 1961, 5, 106-110.
38. Georgiew G.W., Jordanow W.: Warchu metoda na Kabaew za opredel-jane PPW i wlaźnost na poczwata, Poczwoznanie i Agrochimija, 1974, nr 4, 36-42.
39. Gerszkowicz E.A.: Elektrieskije gigromietrieskije datcziki, Pribori i sistemi uprawlenija, 1970, nr 1, 32-33.
40. Groenewelt P.H.: An Evaluation of the Performance of Various Instruments (Used by Different Nations) for Measurement of Soil Moisture Content by Neutron Scattering Technique, Atm. Env. Serv. Canada, 1976, 1-215.
41. Gruszka J.G.: O metodzie izmierienija wlaźnosti poczwy w pierie-miennom elektrieskiem polie, Trudy Inst. Eksper. Met., 1972, 29, 36-43.
42. Halada J., Zach B.: Konduktometricki pristroj na zjstawni obsahu vody v pude, Sb. Ces. Akad. Zem. ved. S.A., 1954, nr 2, 107-112.
43. Hancock C.K., Burdick R.L.: Rapid Determination of Water in Wet Soils, Soil Sci., 1957, t. 83, nr 3, 197-205.
44. Hang R.K.: Component Potentials and Hysteresis in Water Retention by Compacted Clay Soil Aggregates, Soil Sci., 1968, t. 105. nr 3, 172-176.
45. Jaworski J.: Opór elektryczny sond porowatych a wilgotność naturalnego środowiska glebowego, Przegląd Geograficzny, 1963, VIII/XVI/, z. 1-2, 45-53.
46. Jaworski J.: Nowsze metody pomiaru wilgotności glebowej, Ekologia Polska, 1965, t. 11. z. 3, 271-273.

47. Kaliński J.: Industrielle Feuchtmessung mit Mikrowellen, Feingeratechnik, 1974, t. 23, nr 1. 11-15.
48. Kirkham D., Taylor G.S.: Some Tests of a Four-Electrode Probe for Soil Moisture Measurements, Soil Sci. Am. Proc., 1949, vol. 14, 42-46.
49. Knight J.H. Philip J.R.: On Solving the Unsaturated Flow Equation: 2. Critique of Parlanges Method, Soil Sci., 1973, t. 116, nr 6, 407-416.
50. Kolasiewicz F.E.: K metodzie opredielienija "spjelosti" poczwy, Dokł. WASCHNIŁ., 1948, 7, 18-22.
51. Kolasiewicz F.E.: Nowyj poliewoj metod opredielienija wlaźnosti poczwy, Dokł. WASCHNIŁ., 1950, 4, 31-36.
52. Kolasiewicz F.E., Kozłow W.E.: Nowyj pribor dla opredielienija plotnosti i wlaźnosti poczwy w polewych usłowijach, Dokł. WASCHNIŁ., 1954, 3, 33-38.
53. Kołodziej J., Liniewicz K.: Wstępna ocena przydatności polowego wilgotnościomierza pojemnościowego do badań zmian wilgotności gleby, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczo-Technicznej w Olsztynie, Rolnictwo 1977, nr 21, 143-150.
54. Konstankiewicz K., Pukos A., Walczak R.: Domenowa teoria histerezy dla termodynamicznych procesów w glebie, Problemy Agrofizyki, 1974, nr 13.
55. Kowalik P.: Podstawy teoretyczne pomiarów potencjału wody glebowej, Problemy Agrofizyki, 1972, nr 2.
56. Kowalik P.: Zarys fizyki gruntów, 22-23, 73-80, 114-128. Gdańsk 1973.
57. Kowalik P., Zaradny H.: Przykład modelowania matematycznego dynamiki uwilgotnienia profilu glebowego, Arch. Hydrotech., 1973, t XX, 2, 215-222.
58. Kramer D., Tayer H.: Methodische Untersuchungen über Verfahren zur Bestimmung der Bodenfeuchte mit besonderer Behandlung der Alkoholbrennmethode, Z. Landeskultur., 1954, t. 5, nr 2, 111-132.
59. Kriczewski E.S.: Wysokozastotnyj kontrol wlaźnosti pri obogaszczienii polewych iskopajemych, Izd. Niedra, Moskwa 1972.

60. Królikowski L.: Alkoholowa metoda Bouyoucosa do szybkiego oznaczania zawartości wody w glebie. Wybrane metody pomiaru wilgotności gleb, PTGleb. Komisja Fizyki Gleby, Warszawa 1971.
61. Kuraž V., Matousek J.: A New Dielectric Soil Moisture Meter for Field Measurement of Soil Moisture, ICID Bull., 1977, vol. 26, no. 1, 76-79.
62. Lewandowski A., Danfors E.: Studies on the Use the Neutron Moisture Depth Probe for Surface Layer Measurements, Archiwum Hydrotechniki, 1973, t. XX, z. 3, 385-398.
63. Linder H.: Über ein Gerat zur Messung des Wassergehaltes und der Temperatur des Bodens mit hilfe von Thermistoren, Ä.-Theor archiv, 1964, t. 8, 79-87.
64. Majboroda N.M.: Opriedeilenije wlažnosti poczwy wodnym metodom, Poczw., 1957, nr 8, 101-103.
65. Makowski J.: Zastosowanie izotopów promieniotwórczych w budownictwie wodnym, hydraulice i mechanice gruntów, PWN, Warszawa-Poznań 1961.
66. Malicki M.: The Evaluation Criteria and an Evaluation of the Aplicability of the Electro-Physical Properties of the Soil-Electrode System for the Control of the Dynamics of Soil Moisture, Polish J. of Soil Sci., 1979. vol. XII, no. 2, (w druku).
67. Malicki M.: Zagadnienie przydatności pomiarów elektrofizycznych parametrów układu elektrody/gleba do oceny uwilgotnienia gleb. ZPPNR seria D (w druku).
68. Malicki M.: A Capacity Meter for the Investigation of Soil Moisture Dynamics. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, t. 220, (w druku).
69. Masson I.: The Use of Calcium Carbide for Determination of Moisture, Chemical News, 1928, 103, 37-38.
70. Meszkow L.: Poczwien termowłagomier, Sielsk. Tech., 1972, IX, nr 2, 65-70.
71. Metodiczieskije ukazanija po izmierenijem wlažnosti i plotnosti poczwo-gruntów radiometrichieskimi wlažomierami i plotnomierami propoczwiennych, gidromelioratywnych i inżynieryjno-geologiczieskich iziskaniach, W.N.I.I. Gidrot.

- i Mell. im. Kostiakowa, w. II, 37-41, Moskwa 1967.
72. Muromcew N.A., Osipowa T.S. Ispolzowanije gipsowych blokow dla izmierenija wlaźnosti poczwy i potencjała poczwiennej wlaźi, Trudy Instituta Eksperymentalnej Meteorologii, w. 1972, 29, 50-53.
 73. Nagy K. Ryhla metoda stanovena vlhkosti pody, Les., 1954, nr 2. 21-32.
 74. Nilson L.: Simple Apparatus for Rapid Determination of Moisture by the Carbide Method, Analytical Chemistry, 1937, 10, 321-326.
 75. Oganiesjan A.P.: Uproszczennyj metod opredielenija wlaźnosti poczwy, Poczw., 1958, nr 4, 109-113.
 76. Parlange J.Y.: Soil Sci., 1971, nr 1, 2, 1972, nr 1, 2, 3, 5, 6, 1973, nr 1, 1975, nr 2.
 77. Parszin A.I.: O rozrabotkie izmeritiela wlaźnosti poczwy dla celej agrometeorologii, Trudy Instituta Ekspierimentalnoj Mieteorologii, 3-7, 29, Moskwa 1972.
 78. Perrier E.R., Evans D.D.: Soil Moisture Evaluation by Tensjometers, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1961, t. 25, 125.
 79. Plater C.W.: A Portable Capacitance Type Soil Moisture Meter, Soil Sci., 1955, vol. 80, 391-395.
 80. Pokojska U.: Wpływ składu mechanicznego na oznaczanie wilgotności gleb metodą ekstrakcyjną-kolorymetryczną, Roczn. Gleb., 1972, t. 23, 1, 349-356.
 81. Poulouvassilis A.: The Effects of the Entrapped Air on the Hysteresis Curves of a Porcus Body and on its Hydraulic Conductivity, Soil Sci., 1970, 109, 154-162.
 82. Prihar S.S., Sandhu B.S.: A Rapid Method of Soil Moisture Determination, Soil Sci., 1968, t. 105, nr 3, 142-144.
 83. Prusinkiewicz Z.: Nowy wariant ekstrakcyjno-kolorymetrycznej metody oznaczania wilgotności gleb, Roczn. Gleb., 1972, t. XXIII, 1, 335-347.
 84. Przestalski S.: Krytyczne uwagi o pomiarach wilgotności gleby przy pomocy sond porowatych, Zeszyty Naukowe WSR we Wrocławiu. Rolnictwo, 1959, 25, 135-152.
 85. Rastworowa C.G., Podalinskaja W.W.: Prostranstwiennoje wariro-

- wanie fizycznych swych poczw w lesostepnej dubrowie, Wiest. Leningrad. Uniw., 1973, nr 2, 112-122.
86. Richards L.A.: Thermocouple Psychrometer for Measuring the Relative Vapor Pressure of Water in Liquids or Porous Materials. I Intern. Symp. on Humidity and Moisture Control and Measurement in Science and Industry Proc. vol. 1, Reinhold Publ. Corp., N.Y. 1964.
 87. Roszkow W.A.: O radiometrii pŁotnosti i wŁaźnosti poczw w agrofizycznych isledowanijach, Poczw., 1970, nr 10, 75-81.
 88. Shaw B., Baver L.D.: Heat Conductivity as a Index of Soil Moisture, J. Amer. Soc. Agron., 1939, nr 10, vol. 31, 886-891.
 89. Shaw B., Baver L.D.: An Electrothermal Method for Following Moisture Changes in Soil in situ, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1939, vol. 4, 78-83.
 90. Skidmore E.L., Dickerson J.D.: Simplified Evaluating Surface-soil Moisture Content by Measuring Reflectance, Soil Sci. Proc., 1975, 39, 2, 238-242.
 91. Skripko A.Ł.: Protonnyje magnitorezonansnyje wŁagomiery, Pribory i Sistemy Uprawlenija, 1970, nr 1, 23-24.
 92. Sontag D.: Gigrometry razrabotannyje i wypuskajemyje w GDR, Pribory i Sistemy Uprawlenija, 1970, nr 1, 12-15.
 93. Staple W.J., Lechane J.J: Variability in Soil Moisture Sampling, Can. J. Soil Sci., 1962, t 42, 157-164.
 94. Sudnicyn I.N., Czong-Kong-Tay: Psichrometriczeskij mietod opredienija potencjała (dawlenija) poczwiennoj wŁagi, Trudy Inst. Ekspier. Mietieor., 1972, 29, 135-141.
 95. Święicki Cz.: Podstawowe wiadomości o wodzie glebowej. SGGW, 22-23, Warszawa 1967.
 96. Szpak I.S., Kostiučenko-Pawłowa M.M.: O toczności odnokrotnego opriedielenija wŁaźnosti poczwogrunto w wiesowym mietodom, Poczw., 1961, nr 6, 107-111.
 97. Taylor G.S.: A Portable Four-Electrode Probe for Measuring Soil Moisture, Iowa State College Journal of Sci., 1952, 26, 299-301.
 98. Tematyczne zestawienie bibliograficzne nr z /18/595/75. Pomiar

- wilgotności. Inst. Mat. Ogn. BOINTE. 1964-1974.
99. Tokarski J.: Hydrometr kolorymetryczny - nowy aparat do pomiarów wilgotności oraz jej dynamiki w profilach glebowych, Roczn. Gleb., 1961, t. X, z. 1, 17-47.
 100. Troiekiy N.B.: Czastotno wlažnostnaja zawisimost elektriczeskich paramietrow poczwy, Doklady WASCHNİL, 1973, nr 3, 43-45.
 101. Trzecki S., Szewczyk K.: Badania metodyczne nad oznaczaniem wilgotności gleby metodami grawimetrycznymi, Roczn. Gleb., 1975, t. XXVI, z. 3, 45, 47.
 102. Turski R., Malicki M.: A Precise Laboratory Meter of a Dielectric Constant of Soil of a Different Moisture, Polish Journal of Soil Science 1974, vol. VII, 71-79.
 103. Usolcew W.A.: Pribory dla izmierienia wlažnosti wozducha na mietieoroligiczeskich stanicach, Pribory i Sistiemy Uprawlenija, 1970, nr 1, 37-39.
 104. Vasa J.: Some Methods for the Determination of Soil Moisture and Balance Measuring. Water in the Unsaturated Zone, Proc. Wageningen Symp., 1969, vol. 1, 118-124.
 105. Wartanian G.W.: Opriedielenije wlažnosti poczwy mietodom izmierienija summarnogo elektriczeskiego sporotiwlenija, Trudy Inst. Eksp. Mietieor., 1972, 29, 31-35.
 106. Winkler E.M.: Moisture Measurements in Glacial Soils from Airphotos, Ecology, 1966, t. 47, 156-158.
 107. Witkowska B., Reszetin O., Walczak R., Stefańczyk M.: Matematyczny model pola temperaturowego w kolumnowych doświadczeniach glebowych, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 220. (w druku).
 108. Wompierskaja M.J., Sudnicyn I.I.: Izpolzowanie tiensiomietrow pri izuczeniji wodnogo riezima poczw w zabłoczonych lesach, Les. Choz., 1966, nr 8, 28-29.
 109. Woodson W.D.: Gadget Records Soil Moisture, Western Fruit Grower, 1953, 7, 30-31.
 110. Zaradny H., Kowalik P.: Współczynnik przewodności wodnej gleb i gruntów nienasyconych, Arch. Hydr., 1972, t. XIX, z. 3, 319-331.

111. Youngs E.C.: The Hysteresis Effect in Soil Moisture Studies,
7 the Inter. Cong. Soil Sci. Madison. Wisc. USA, 1960, t 1,
107-113.