

OZNACZANIE UZIARNIENIA GRUNTU METODĄ U-RURKI

Oznaczanie uziarnienia gruntu jest jednym z podstawowych i najczęściej w laboratoriach gruntowych wykonywanych badań. Dla określenia frakcji gruntu o ziarnach mniejszych od 0,074 mm stosuje się w polskich laboratoriach mechaniki gruntów przeważnie metodę areometryczną.

Oznaczanie uziarnienia gruntu metodą analizy areometrycznej jest kłopotliwe i obarczone pewnymi błędami systematycznymi. Wady tej metody polegają na tym, że:

a) Wkładanie i wyjmowanie areometru wywołuje nieuniknione mieszanie badanej zawiesiny gruntu, powodując zakłócenie jednostajnego ruchu opadania cząstek gruntowych i zmieniając rozdział cząstek według ich wielkości na różnych wysokościach badanej kolumny cieczy. Jednostajny ruch opadających cząstek jest podstawowym założeniem wzoru Stokesa stosowanego do obliczania średnicy cząstek.

b) Cechowanie areometru jest dość kłopotliwe i wymaga wprowadzenia szeregu poprawek nie zawsze ważnych. Na przykład poprawka na menisk ma wielkość właściwą tylko w tym przypadku, gdy areometr jest starannie odtłuszczony i ciecz zwilża jego powierzchnię, co nie zawsze ma miejsce.

c) Droga opadania cząstek, na której odbywa się pomiar, jest w metodzie areometrycznej stosunkowo krótka (około 16 cm). Początkowe czasy pomiaru muszą więc być również krótkie. Pierwszy odczyt, dokonywany po 0,5 min. trudno przeprowadzić w sposób dokładny, jeżeli weźmiemy pod uwagę, że zalecany czas zanurzenia i wyjmowania areometru powinien wynosić nie mniej niż 10 sek. i rozpocząć się co najmniej na 20 sek. przed wykonaniem odczytu.

Wielu spośród niedogodności metody areometrycznej można uniknąć, stosując do oznaczania uziarnienia gruntu metodę U-rurki. Metoda ta opiera się na tej samej zasadzie co metoda Wiegnera, o której wzmianki spotyka się w literaturze podręcznikowej (D. W. Taylor, Fundamentals of soil mechanics).

Podobnie jak szereg innych metod oznaczania uziarnienia gruntu metoda ta opiera się na prawie Stokesa, na którego podstawie można obliczyć prędkość opadania u cząstek w zawieszynie

$$u = \frac{s}{t} = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (d_g - d_w)}{\eta} \quad (1)$$

gdzie:

- s — droga (cm)
- t — czas (sek)
- r — promień cząstki (cm)
- g — przyspieszenie ziemskie (cm sek⁻²)
- d_g — gęstość gruntu (g cm⁻³)
- d_w — współczynnik lepkości ośrodka mierzony w pauzach (g cm⁻¹ sek⁻¹)
- η — gęstość wody (g cm⁻³)

Wzór Stokesa jest słuszny dla cząstek o kształcie kuli poruszających się ruchem jednostajnym. Dla cząstek o innym kształcie oznaczamy tzw. średnicę zastępczą, tzn. średnicę, jaką miałaby cząstka o kształcie kuli, opadająca w danych warunkach z taką samą prędkością jak cząstka badana.

Jeżeli jako drogę s przyjmiemy wysokość cylindra pomiarowego h (ryc. 1), to z powyższego wzoru możemy obliczyć promień cząstek r₁, które po upływie czasu t₁ przejdą drogę h, a więc nie będą się już znajdować w zawieszynie powyżej rurki bocznej (poziom AA). W zawieszynie nie będą się również znajdować wszystkie cząstki o promieniu r > r₁.

Jednak po upływie czasu t₁ poniżej poziomu AA znajdzie się oprócz wszystkich cząstek o promieniu r ≥ r₁ pewna ilość cząstek o promieniu r < r₁, które

na początku pomiaru znajdowały się w niewielkiej odległości od tego poziomu. Prędkość osadzania się (sedymentacji) tych cząstek aż do momentu t = t₁ będzie wielkością stałą, natomiast prędkość osadzania się (sedymentacji) cząstek o promieniu r ≥ r₁ w chwili t = t₁ będzie równa zeru, ponieważ cząstki te nie będą się już znajdowały w zawieszynie. Przez

prędkość osadzania się (sedymentacji) $\frac{dG}{dt}$ będziemy tu

rozumieć masę cząstek (G), które w jednostce czasu przejdą poziom AA, czyli osiądą na dnie naczynia.

Zawartość cząstek w zawieszynie możemy obliczyć na podstawie pomiaru ciśnienia hydrostatycznego p, wywieranego przez nią na poziomie AA

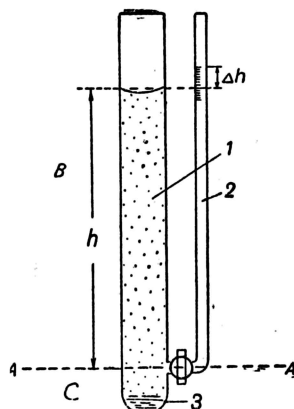
$$p = \frac{m'_w + m'_1/g}{\pi R^2} = \frac{m'_w + m'_1}{V'} h g \quad (2)$$

gdzie:

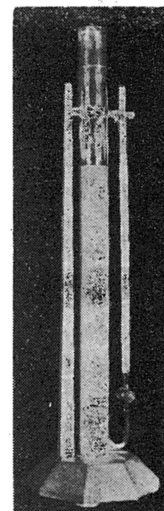
- m'_w — masa wody w części pomiarowej cylindra
- m'₁ — masa gruntu pozostałego w zawieszynie po upływie czasu t₁
- R — promień naczynia pomiarowego

$\frac{m'_w + m'_1}{V'}$ = d₁ możemy uważać za gęstość średnią

zawiesiny w cylindrze pomiarowym po upływie czasu t₁. Wielkość tę mierzymy na zasadzie naczyń połączonych (ryc. 1).



Ryc. 1



Ryc. 2

Ryc. 1. Schemat przyrządu do oznaczania uziarnienia gruntu metodą U-rurki.

1 — zawieszina gruntu, 2 — woda destylowana, 3 — osiadły grunt

Ryc. 2. Przyrząd do oznaczania uziarnienia gruntu metodą U-rurki.

Ciśnienie hydrostatyczne w prawym ramieniu przyrządu pomiarowego wynosi

$$p = d_w (h + \Delta h) g \quad (3)$$

d_w — gęstość wody.

Ponieważ na zasadzie naczyń połączonych ciśnienia hydrostatyczne w obu ramionach muszą być sobie równe, więc

$$d_1 h g = d_w (h + \Delta h) g$$

i

$$d_1 = \frac{d_w (h + \Delta h)}{h}$$

stąd

$$\Delta d = d_1 - d_1 - d_w = \frac{d_w \Delta h}{h} \quad (4)$$

Mając wyznaczone ciśnienie hydrostatyczne wywierane przez zawieszinę, możemy obliczyć ilość zawartych w całej zawieszinie cząstek gruntu o promieniu $r < r_1$ na podstawie układu równań

$$\frac{m_w + m_1}{V} = d_1 \quad \frac{m_w}{d_w} + \frac{m_1}{d_g} = V$$

skąd

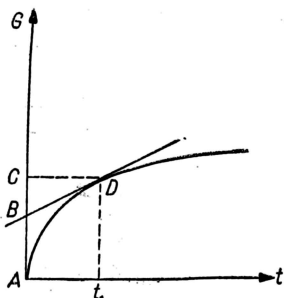
$$m_1 = \frac{d_g}{d_g - d_w} \Delta d \cdot V \quad (5)$$

gdzie:

- m_w — masa wody
- m_1 — masa gruntu w zawieszinie po upływie czasu t_1
- V — objętość zawiesziny

Ilość cząstek o promieniu $r < r_1$, pozostałych w zawieszinie będzie mniejsza od rzeczywistej zawartości cząstek o promieniu $r < r_1$, zawartych w badanej próbce. Ilość cząstek o promieniu $r < r_1$ osadzonych poniżej poziomu AA po upływie czasu t_1 można obliczyć w sposób następujący.

Oznaczmy przez G masę cząstek, które po upływie określonego czasu przeszły z części B naczynia pomiarowego do części C i narysujemy wykres osiadania cząstek w układzie $G - t$ (ryc. 3). Po upływie czasu t_1 osiadłaby masa cząstek odpowiadająca odcinkami AC, w której będą zawarte wszystkie cząstki o promieniu $r \geq r_1$ oraz pewna ilość cząstek o promieniu $r < r_1$. Po upływie czasu t_1 prędkość osadzania się cząstek o promieniu $r \geq r_1$ będzie równa zero, gdyż wszystkie te cząstki już się osadziły, zaś prędkość sedymentacji cząstek o promieniu $r < r_1$.



Ryc. 3. Wykres osadzania się cząstek na dnie naczynia pomiarowego.

Można stąd obliczyć, że całkowita ilość cząstek o promieniu $r < r_1$, które przeszły poniżej poziomu AA po upływie czasu t_1 wyniesie $t_1 \cdot \frac{dG}{dt}$. Odpowiada to odcinkowi BC na ryc. 3. Odcinek AB odpowiada ilości cząstek o promieniu $r \geq r_1$, zawartych w całej badanej próbce.

WYKONANIE POMIARU

Pomiar przeprowadza się w przyrządzie przedstawionym na ryc. 1 i 2. Przyrząd ten składa się z cylindra szklanego o określonej pojemności (np. 0,5 l) z kreską zaznaczającą tę pojemność. Parę centymetrów powyżej dna jest przylpiona do cylindra rurka kalibrowana, połączona z cylindrem za pośrednictwem kranu. Dla zwiększenia dokładności odczytów najlepiej jest wykonać rurkę kalibrowaną z biurety Schelbacha, zaopatrzonej na tylnej ścianie w pasek niebieski na białym tle.

Do analizy odważa się 20—25 g gruntu ilastego o znanej wilgotności i ciężarze właściwym lub odpowiednio większą ilość gruntu o mniejszej zawar-

tości cząstek koloidalnych (a więc stężenie zawiesziny jest nieco większe niż przy analizie areometrycznej) i przygotowuje w zwykły sposób zawieszinę (PN-55-B-04483) przez przemycie przez sito 0,071 mm i półgodzinne gotowanie. Jeżeli okaże się konieczne, dodaje się jako stabilizatora 25 ml 2% pyrofosforanu sodu i miesza zawieszinę przez 20 minut za pomocą mieszadła magnetycznego. Zawieszinę gruntową zlewa się do cylindra, rurkę kalibrowaną napełnia się wodą destylowaną, otwiera kran i przez dolewanie wody do rurki dopełnia się objętość zawiesziny do kreski. Po zamknięciu kranu i zatknięciu rurki kalibrowanej korkiem zamyka się otwór cylindra ręką i miesza jego zawartość przez wielokrotne odwracanie cylindra do góry dnem. Przyrząd ustawia się na stole w miejscu zabezpieczonym od wstrząsów i znacznych zmian temperatury. Uruchamiając sekundomierz i notując czas, otwiera się kran i sprawdza poziom cieczy w cylindrze. Jeżeli w czasie mieszania ilość cieczy zmniejszyła się, należy ją dopełnić bardzo dokładnie do kreski wodą destylowaną. Należy również zwracać uwagę na to, aby zawieszina gruntowa nie dostała się do rurki kalibrowanej, ponieważ wpłynęłoby to ujemnie na dokładność pomiaru. Zapobiega się temu przez otwieranie kranu jedynie na czas wykonania pomiaru. Odczytów dokonuje się po upływie 2, 4, 8, 15, 30 minut; 1, 2, 4, 8, 24 godzin. Odczyt po 8 godz. można pominąć lub zastąpić odczytem po upływie krótszego czasu.

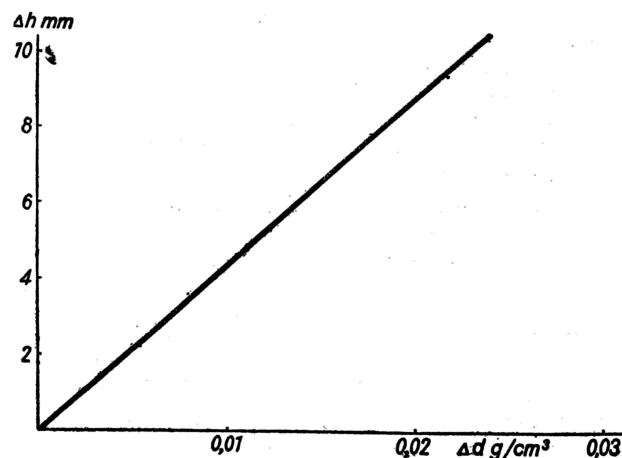
Dla obliczenia składu granulometrycznego gruntu użytego do analizy przeprowadzić następujące dodatkowe czynności: 1) cechowanie przyrządu, 2) obliczenie średnicy cząstek, które opadną po upływie określonych czasów.

CECHOWANIE PRZYRZĄDU

Należy przygotować 4, 3, 2 i 1 procentowe roztwory NaCl (jedno-procentowy roztwór powinien zawierać 1 g NaCl w 100 g roztworu). Roztwory te wykazują przy 20° następujące gęstości

- 1 % NaCl $d = 1,0053 \text{ g/cm}^3$
- 2 % NaCl $d = 1,0122 \text{ "}$
- 3 % NaCl $d = 1,0195 \text{ "}$
- 4 % NaCl $d = 1,0268 \text{ "}$

Roztwory należy wlewać kolejno do cylindra, zaś do rurki kalibrowanej wlewać wodę destylowaną i mierzyć różnicę poziomów Δh , przyjmując za h odczyt na rurce kalibrowanej, gdy w cylindrze znajduje się woda destylowana. Następnie należy sporządzić wykres przedstawiający zależność między Δh a różnicą gęstości Δd cieczy w obu naczyniach połączonych.



Ryc. 4. Zależność między różnicą wysokości słupów cieczy a ich różnicą gęstości ($h = 44 \text{ cm}$).

Na ryc. 4 przedstawiono taką zależność dla przyrządu, którego h wynosi 44 cm. Wartości pośrednie między oznaczonymi znaleziono przez interpolację.

OBLICZENIE ŚREDNICY CZĄSTEK

Średnicę cząstek obliczamy z wzoru Stokesa po jego przekształceniu

$$2r = \sqrt{\frac{h}{t} \frac{18\eta}{g(d_g - d_w)}} = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (6)$$

gdzie

$$K = \sqrt{\frac{h 18 \eta}{g(d_g - d_w)}}$$

ma wartość stałą dla określonej temperatury (od której zależy wielkość η) dla gruntów o tej samej gęstości.

Na podstawie tych obliczeń sporządzamy szereg tabel dla określonej wysokości h , określonej temperatury i określonej gęstości gruntu (przykład na tab. I).

Tabela I

Średnica cząstek, które opadną po upływie czasu t , przy długości drogi $h = 44$ cm i temperaturze 20°

t	$2r$ mm	t	$2r$ mm
1 min.	0,090	3 godz.	0,0066
2 "	0,063	4 "	0,0058
3 "	0,045	6 "	0,0047
8 "	0,031	7 "	0,0043
15 "	0,023	8 "	0,0041
30 "	0,016	20 "	0,0026
1 godz.	0,011	22 "	0,0024
2 "	0,0082	24 "	0,0023
		48 "	0,0017

Procentową zawartość cząstek, które pozostały w zawieszynie, obliczamy z wzoru (5)

$$X = \frac{m_1}{G_s} \frac{100}{2C_s} \frac{d_g}{d_g - d_w} \Delta d_i \cdot V \quad (7)$$

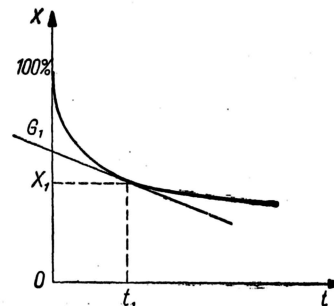
gdzie G_s — sucha masa wziętej do analizy próbki gruntu.

Jeżeli $V = 500$ ml, to

$$X = \frac{100}{2G_s} \frac{d_g}{d_g - d_w} \Delta d_i \cdot 10^3 \quad (8)$$

Na podstawie wyników tych obliczeń wykreślamy krzywą osadzania się cząstek z zawiesziny (ryc. 5). Na osi rzędnych odkładamy udział procentowy cząstek, które pozostały w zawieszynie (X), na osi odciętych — czas, po którego upływie dokonywano pomiaru. Wykreślamy krzywą i dla każdego punktu pomiarowego

wykreślamy styczną do krzywej. Z punktu przecięcia stycznej z osią rzędnych G_1 odczytujemy wartość frakcji o średnicy $2r < 2r_1$ (odcinek OG_1) oraz zawartość frakcji $2r \geq 2r_1$ ($100 - G_1$). Na podstawie tych wartości wykreślamy krzywą uziarnienia, odczytując z tablicy średnicę cząstek $2r_1$, które osiadły całkowicie po upływie czasu t_1 .



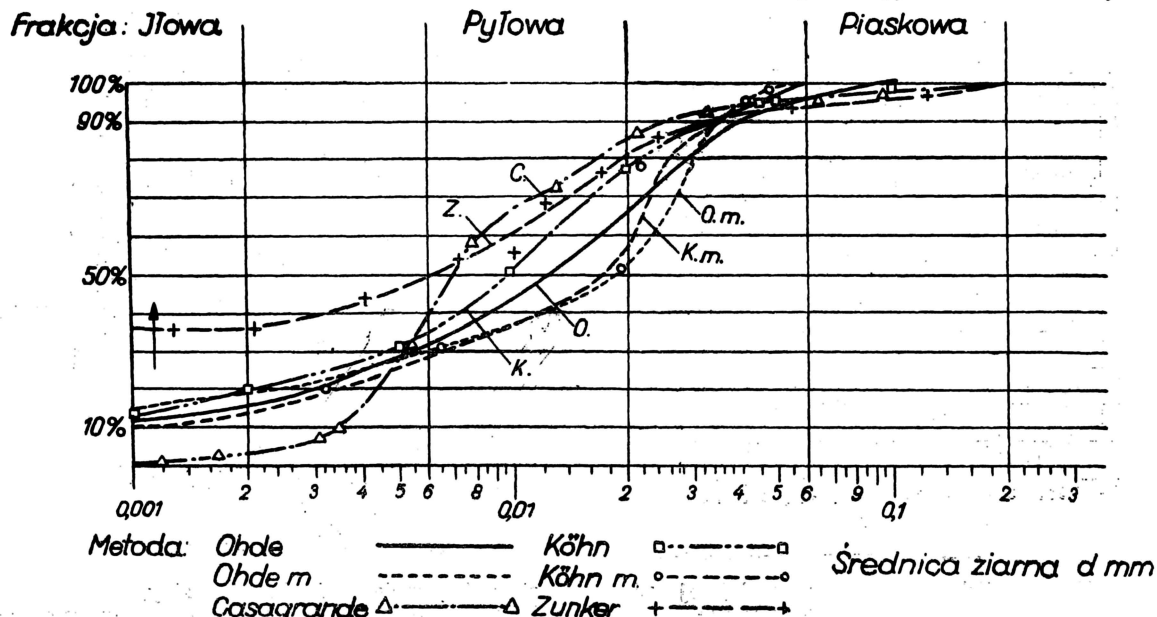
Ryc. 5. Wykres osadzania się cząstek zawiesziny.

Na ryc. 7—12 przedstawiono porównanie wyników badań dla metody areometrycznej i metody U-rurki. Dla porównania przedstawiono na ryc. 6 wyniki oznaczeń uziarnienia iltu z Brandis wykonywanych różnymi metodami (G. Becher — Genauigkeit Gebräuchlicher Absetzanalysen — Veröffentl. der Forschungsanstalt für Schiffahrt, Grund und Wasserbau, Berlin 1959 Nr 7, s. 49—62).

Zalety metody U-rurki w porównaniu z metodą areometryczną polegają na tym, że:

a) nie zakłóca się jednostajnego ruchu opadania cząstek przez mieszanie cieczy wskutek wkładania i wyjmowania areometru,

b) cechowanie przyrządu jest bardzo proste, polega bowiem tylko na sporządzeniu roztworów soli o odpowiednim stężeniu d na wykonaniu pomiarów dla tych roztworów. Unika się wprowadzenia kilku poprawek koniecznych przy metodzie areometrycznej. Jeżeli przygotowujemy tabele z obliczonymi średnicami cząstek dla różnych czasów pomiaru i dla różnych temperatur zawiesziny, to możemy łatwo przeprowadzać pomiary przy różnych temperaturach, odczytując wyniki z odpowiedniej tabeli. Należy tylko pamiętać o tym, aby temperatura zawiesziny w cylindrze i temperatura wody w rurce kalibrowanej były jednakowe. Możemy wtedy założyć, że różnice gęstości, które mierzymy nie będą zależeć od temperatury, a ta ostatnia będzie wpły-



Ryc. 6. Krzywe uziarnienia iltu z Brandis oznaczone różnymi metodami.

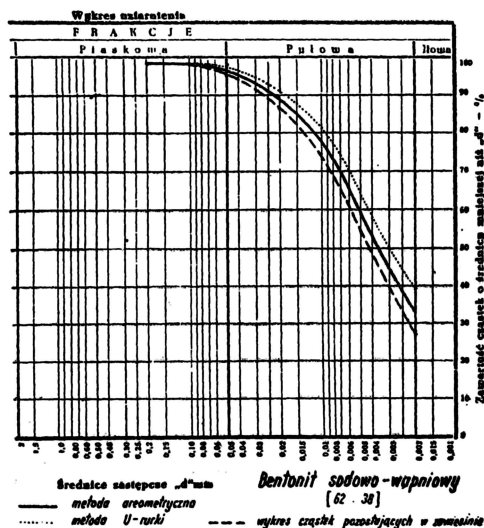
wać tylko na współczynnik lepkości, co będzie uwzględnione przy obliczaniu średnicy cząstek.

c) Można znacznie przedłużyć drogę opadania cząstki, na której przeprowadza się pomiar, co zwiększa dokładność pomiaru. Ponieważ jednak zwiększa się również czas trwania pomiaru, należy zastosować cylinder o takiej wysokości, aby po 24 go-

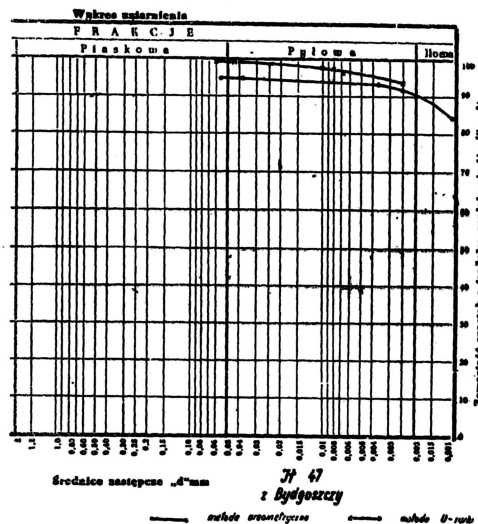
unika się konieczności wykonywania pomiarów po upływie krótkich czasów (0,5 i 1 min.).

Wadą metody U-rurki jest stosunkowo nieznaczna różnica wysokości Δh rzędu około 0,8 cm. Mimo to jednak dokładność odczytów nie była mniejsza niż przy metodzie areometrycznej a niedogodność tę można zmniejszyć przez:

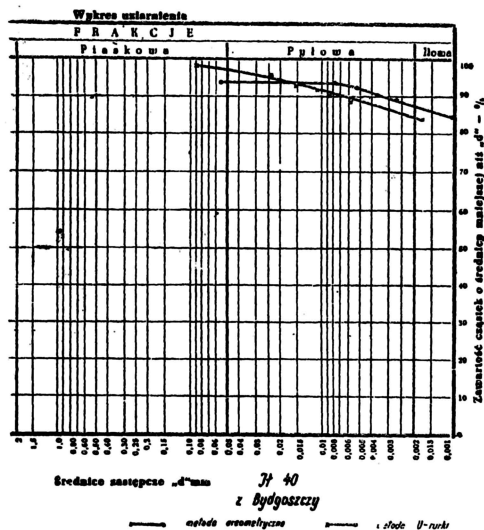
Ryc. 7.



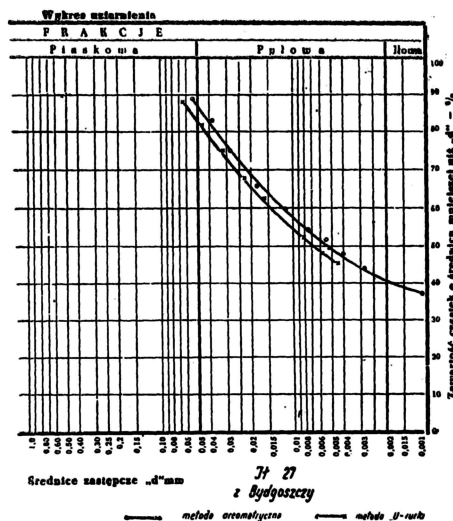
Ryc. 10.



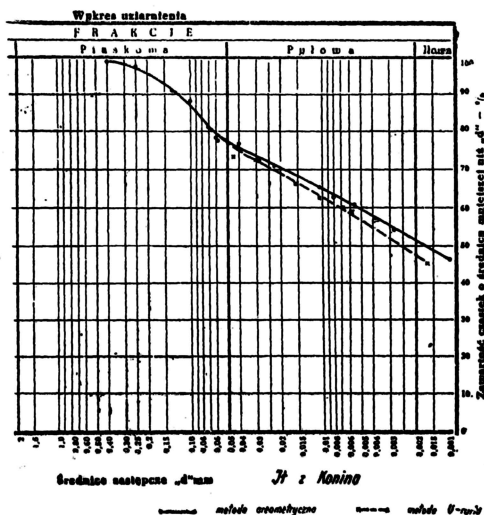
Ryc. 8.



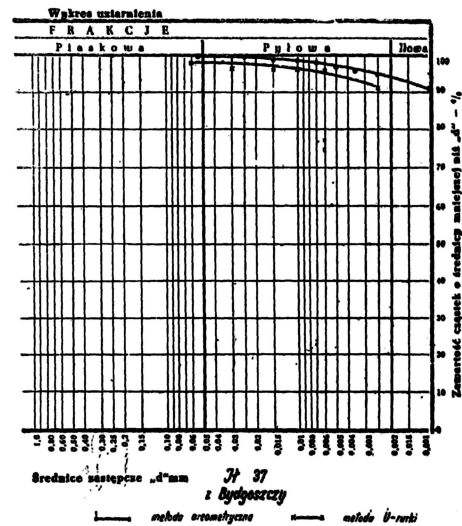
Ryc. 11.



Ryc. 9.



Ryc. 12.



dzinach opadły cząstki o średnicy mniejszej od około 0,002 mm, a więc h powinno wynosić 40—45 cm. Dzięki zwiększeniu drogi opadania cząstek

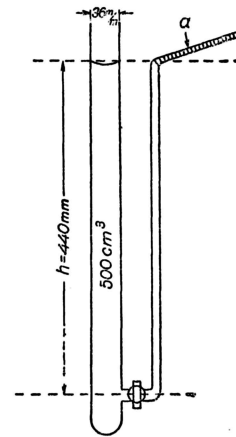
a) zwiększenie stężenia zawiesiny,
b) zwiększenie dokładności odczytów (np. zastosowanie lupy),

c) zastosowanie modyfikacji przyrządu (ryc. 13).
Przy metodzie U-rurki konieczne jest bardzo staranne zachowanie zawsze jednakowego poziomu cieczy w naczyniu pomiarowym w czasie wszystkich pomiarów. Najlepiej jest dopełniać ciecz w ten sposób, aby górny menisk pokrywał się dokładnie z kreską, zaznaczającą poziom cieczy.

W celu umożliwienia wygodnego stosowania opracowanych z góry tabel proponuje się wykonywanie przyrządów o ściśle znormalizowanych wymiarach: wysokość cylindra około 60 cm, średnica wewnętrzna 36 cm, h — odległość między poziomem zawiesziny a poziomem rurki łączącej cylinder z rurką kalibrowaną — 44 cm.

Średnice wzorcowe cząstek gruntu dla h = 44 cm w zależności od czasu pomiaru, temperatury i ciężaru właściwego gruntu przedstawione są w tabeli II.

Autorka wyraża swe podziękowanie prof. R. Moliszowi za przedyskutowanie pewnych zagadnień i udzielenie cennych wskazówek oraz kol. J. Boninowi za pomoc w wykonaniu oznaczeń uziarnienia gruntu.



Ryc. 13. Schemat przyrządu do oznaczania uziarnienia gruntu metodą U-rurki.

a — rurka kalibrowana, \varnothing 2—3 mm.

Tabela II

ŚREDNICE WZORCOWE DLA H = 44 CM W ZALEŻNOŚCI OD CZASU POMIARU, TEMPERATURY I GĘSTOŚCI GRUNTU

Temperatura	D'wz ¹)10 ⁻³ mm							D''wz ²)10 ⁻³ mm			
	1 min	2 min	4 min	8 min	15 min	30 min	1 godz	2 godz	4 godz	8 godz	24 godz
10°	101 103 100	72 72 71	51 52 50	36 36 35	26 27 26	18,5 19 18	13 13 13	93 94 91	65 66 65	46 47 46	27 27 26
11°	101 102 99	71 73 70,5	50 51 50	36 36 36	26 26 26	18 19 18	13 13 13	92 93 91	65 66 64	46 46 45	26,5 27 26
12°	99 100 97,5	70 71 69	49 50 49	35 35 34,5	25,5 26 25	18 18 18	13 13 13	90 92 89	64 65 63	45 46 44	26 26 26
13°	97 99 96	69 70,5 68	49 50 48	34,5 35 34	25 26 25	18 18 17,5	13 13 12	89 90,5 88	63 64 62	44,5 45 44	26 26 25
14°	96 98 95	68 69 67	48 49 47	34 34,5 33,5	25 25 24	17,5 18 17	12 13 12	88 89 87	62 63 61	44 44,5 43	25 26 25
15°	95 96 94	67 68 66,5	47 48 47	33,5 34 33	24 25 24	17 17,5 17	12 12 12	87 88 86	61 62 60	43 44 43	25 25 25
16°	94 95 92	66,5 67 66	47 47 46	33 33,5 33	24 24 24	17 17 17	12 12 12	86 87 84	60 61 60	43 43 42	25 25 24
17°	92 94 91	66 66,5 65	46 47 46	33 33 32	24 24 24	17 17 17	12 12 12	84 86 83	60 60 59	42 43 42	24 25 24
18°	91 92 90	65 66 64	46 46 45	32 33 32	24 24 23	17 17 16	12 12 12	83 84 82	59 60 58	42 42 41	24 24 24
19°	90 91 89	64 65 63	45 46 44,5	32 32 31	23 24 23	16 17 16	12 12 11,5	82 83 81	58 59 57	41 42 40,5	24 24 23
20°	89 90 88	64 64 63	44,5 45 44	31 32 31	23 23 23	16 16 16	11,5 12 11	81 82 80	57 58 57	40,5 40 40	23 24 23
21°	88 89 87	63 63 62	44 44,5 43,5	31 31 31	23 23 22,5	16 16 16	11 11,5 11	80 81 79	57 57 56	40 40,5 40	23 23 23
22°	87 88 86	62 63 61	43,5 44 43	31 31 30	22,5 23 23	16 16 16	11 11 11	79 80 78	56 57 55	40 40 39	23 23 23
23°	86 87 85	61 62 60	43 43,5 42,5	30 31 30	22 22,5 22	16 16 15,5	11 11 11	78 79 77,5	55 56 55	39 40 39	23 23 23
24°	85 86 84	60 61 59,5	42,5 43 42	30 30 30	22 22 22	15,5 16 15	11 11 11	77,5 78 77	55 55 54	39 39 39	22 23 22
25°	84 85 83	59,5 60 59	42 42,5 41,5	30 30 29	22 22,5 21	15 15,5 15	11 11,5 11	77 77,5 76	54 55 54	38 39 38	22 22 22

1) średnice wzorcowe dla czasu 1 min do 1 godz, oblicza się z wzoru $Dwz = D'wz \cdot 10^{-3}mm$
2) średnice wzorcowe dla czasu 2 godz do 24 godz oblicza się z wzoru $Dwz = D''wz \cdot 10^{-3}mm$
Układ wartości $D'wz$ i $D''wz$ w zależności od gęstości gruntu (dg) n_1, n_2, n_3
gdzie n_1 — dla dg = 2,65 ÷ 2,69
 n_2 — dla dg = 2,70 ÷ 2,75
 n_3 — dla dg = 2,76 ÷ 2,80