

## ROLA SPADKU KRYTYCZNEGO W ROZWOJU SUFOZJI ZWIETRZELIN SKAŁ TRIASOWYCH

UKD 624.131.253:551.442:551.311.231:551.761.2:552.541/543(438.19+438.31)

### Wykaz oznaczeń

$a_0$	— współczynnik	T
$d$	— średnica wynoszonych cząstek	L
$h_0$	— wysokość podciągania kapilarnego	L
$h_a$	— głębokość zanurzenia rury w wodzie	L
$J$	— spadek hydrauliczny	—
$J_0$	— spadek hydrauliczny, przy którym rozpoczyna się filtracja	—
$J_{cr}$	— spadek hydrauliczny, przy którym rozpoczyna się sufozja	—
$k$	— współczynnik filtracji	LT-1
$n$	— porowatość	—
$t$	— czas	T
$v_s$	— rzeczywista prędkość wody	LT-1
$x$	— odległość	L

Ruch wody w gruncie może powodować zmiany jego struktury. Ze względu na duże znaczenie tego zjawiska dla różnych dziedzin budownictwa, a szczególnie budownictwa wodnego, wielokrotnie podejmowano prowadzenie różnych prac badawczych.

W działalności inżynierskiej wyróżnia się jakby trzy odrębne zjawiska noszące nazwy: sufozji, przebiecia hydraulicznego, oraz wyparcia gruntu. Należy jednak stwierdzić, że trudno jest spójkać się z odrębnym zjawiskiem w czystej postaci, lecz są one z sobą z reguły w jakimś stopniu powiązane. Z tych też względów wydaje się bardziej celowym używanie określenia filtracyjnej deformacji gruntu, pod którym to pojęciem będziemy rozumieli zespół zjawisk zachodzących w gruncie, a wywołanych ruchem wody gruntowej. Wystąpienie filtracyjnej deformacji gruntu, zależne jest od bardzo wielu czynników, których wpływ i znaczenie dotychczas nie jest jeszcze całkowicie wyjaśnione. Wobec braku wyjaśnień podstaw przebiegu zjawiska, stosowane dla celów projektowych wzory, stanowią z konieczności pewne przybliżenie i mogą być stosowane jedynie dla określonych przypadków ze ścisłym podaniem granic.

Najdawniej stosowany jest wzór opracowany przez Sichardta, podający zależność spadku krytycznego od współczynnika filtracji.

$$J_{cr} = \frac{1}{15\sqrt{k}} \quad [1]$$

Ponieważ wzór (1) nie uwzględnia wpływu szeregu czynników, można go stosować jedynie przy szacunkowych obliczeniach w odniesieniu do gruntów sypkich. Bardziej rozwiniętą postać wzoru podał Patraszew (1939).

$$J_{cr} = \frac{d}{a_0 k} \left( 1 + \frac{\sqrt{a_0 k}}{4d} \right) \quad [2]$$

We wzorze (2) wielkość spadku krytycznego została uzależniona nie tylko od współczynnika filtracji, ale i od średnicy wynoszonych cząstek, jak również wprowadzony został współczynnik zezwalający na do-

konywanie pewnej korekty ze względu na skład granulometryczny. Wzór ten został sprawdzony przy prowadzeniu własnych badań. W badaniach tych stwierdzono, że stosowalność jego jest ograniczona do minimalnej wielkości współczynnika filtracji  $k \geq 10^{-4}$  cm/sek.

Istnieją również wzory uzależniające średnicę wynoszonych cząstek od wielkości przekroju kanałków włoskowatych jak np. wzór Terzaghiego (1937), czy Istominy (2), jednak przy ich stosowaniu napotyka się na tak wielkie trudności pomiarowe, że konieczne jest przyjmowanie wielokrotnie nawet zupełnie dowolnych, założeń upraszczających.

Należy podkreślić, że podane wzory opracowane zostały dla gruntów pozbawionych spójności, natomiast dla gruntów spoiстых trudno jest znaleźć jakiegokolwiek wskazówki, pozwalające na ujęcie liczbowe możliwości wystąpienia filtracyjnej deformacji gruntu. W tej sytuacji możemy mówić jedynie o pewnym wyjaśnieniu problemów związanych z sufozją gruntów sypkich, natomiast dla gruntów spoiстых, brak jest obecnie danych, a określenia zawarte w literaturze są wielokrotnie sprzeczne, wykazując wiele niezgodności. Na szczególne trudności napotyka się przy zagadnieniu sufozji zwietrzelin. Grunty te bowiem wymagają specjalnych metod badawczych jak i innej aparatury, już przy określaniu podstawowych parametrów. W obecnej chwili brak jest jednoznacznie opracowanej metodyki badań zwietrzelin, stąd też wszelkie prace badawcze wymagają każdorazowo indywidualnego ich traktowania. Szczególne trudności napotyka się przy badaniu sufozji zwietrzelin, ze względu na brak podstawowych zależności, które ustalałyby znaczenie wpływu różnych czynników na przebieg procesu sufozji.

Z tych względów celowe jest podanie badań, jakie zostały wykonane pod kątem zbadania własności izolacyjnych zwietrzelin wapieni gogolińskich i dolomitów kruszconych. Badania te pozwalają na określenie nie tylko współczynników filtracji oraz warunków przy których możliwym jest zaistnienie sufozji, ale mogą służyć jako podstawa dla prowadzenia dalszych badań nad zwietrzelinami.

Głównym celem badań było wyznaczenie wielkości spadku hydraulicznego  $J_{cr}$ , przy którym rozpoczyna się sufozja, jak również określenie wielkości współczynnika filtracji dla zwietrzelin. Wyniki tych badań posiadają bardzo duże znaczenie praktyczne ze względu na zlokalizowany zbiornik wodny, którego podłoże stanowią utwory triasowe, wapienie gogolińskie i dolomity kruszcony. Prace rozpoczęto od badań terenowych, przy czym zarówno w odśrodkach naturalnych jak i we wkopach zbadano dokładnie profil zwietrzelin, ze specjalnym zwróceniem uwagi na teksture. Było to niezbędne ze względu na konieczność modelowania próbek w laboratorium. Do badań laboratoryjnych pobrano próbki zwietrzelin, przy czym jako minimalną wielkość próbki należy określić 50 kg.

W badaniach laboratoryjnych określono podstawowe własności zwietrzelin, w oparciu o wypracowane dla tych celów metody badawcze. Specjalny nacisk położono na zbadanie i określenie współczynników filtracji, zarówno zwietrzelin jak i materiału

Tabela I

Numer próbki	Rodzaj zwietrzliny	Skład granulometryczny zawartość frakcji w %						W <sub>n</sub> %	k materiału gliniastego cm/sek	J <sub>cr</sub>	k zwietrzelin cm/sek	J <sub>cr</sub> w/g wzoru (2)				
		kamienista	25,0	żwirowa	2,0	piaskowa	0,05						pyłowa	0,002	iłowa	wskaznik zwietrzlenia
															$\frac{6+7}{3+4}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
Z-001	Zwietrzelnina druzgotowo-gliniasta wapieni gogolińskich	9,0	14,0	21,0	46,0	10,0	2,44	12,1	$5,7 \cdot 10^{-6}$	1,0	$1,4 \cdot 10^{-4}$	1,4				
Z-002	Zwietrzelnina druzgotowa wapieni gogolińskich	20,0	36,0	10,0	28,0	6,0	0,61	8,3	$2,4 \cdot 10^{-6}$	1,4	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1,0				
Z-003	Zwietrzelnina gliniasta wapieni gogolińskich	4,0	23,0	31,0	31,5	10,5	1,56	21,0	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,5	—	—				
Z-004	Zwietrzelnina druzgotowa dolomitów kruszonych	7,5	68,5	17,0	5,0	2,0	0,09	—	—	0,3	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,2				
Z-005	Zwietrzelnina gliniasta wapieni gogolińskich	13,0	7,0	6,5	40,0	33,5	3,68	22,0	$9,7 \cdot 10^{-7}$	2,6	$3,5 \cdot 10^{-6}$	—				
Z-006	Zwietrzelnina druzgotowa wapieni gogolińskich	31,0	26,0	7,0	29,0	7,0	0,63	13,1	$1,4 \cdot 10^{-5}$	1,6	$5,0 \cdot 10^{-4}$	1,7				
Z-007	Zwietrzelnina gliniasta wapieni gogolińskich	15,0	23,0	10,5	38,5	13,0	1,35	16,0	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,7	$3,5 \cdot 10^{-3}$	0,4				
Z-008	Zwietrzelnina rumoszowa dolomitów kruszonych	29,0	20,5	25,5	21,0	4,0	0,50	19,5	$3,6 \cdot 10^{-5}$	0,6	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,6				
Z-009	Zwietrzelnina gliniasta wapieni gogolińskich	15,0	16,0	2,0	43,0	24,0	2,16	14,3	$2,5 \cdot 10^{-7}$	2,7	$9,7 \cdot 10^{-7}$	—				
Z-010	Zwietrzelnina druzgotowa wapieni gogolińskich	33,0	15,0	18,5	27,5	6,0	0,70	11,2	$4,0 \cdot 10^{-6}$	0,6	$5,3 \cdot 10^{-3}$	0,4				
Z-011	Zwietrzelnina druzgotowa dolomitów kruszonych	26,0	21,0	31,0	18,0	4,0	0,47	11,2	$5,1 \cdot 10^{-6}$	0,7	$1,7 \cdot 10^{-3}$	0,7				

gliniastego, uzyskanego po oddzieleniu ziarn o średnicy większej od 2 mm.

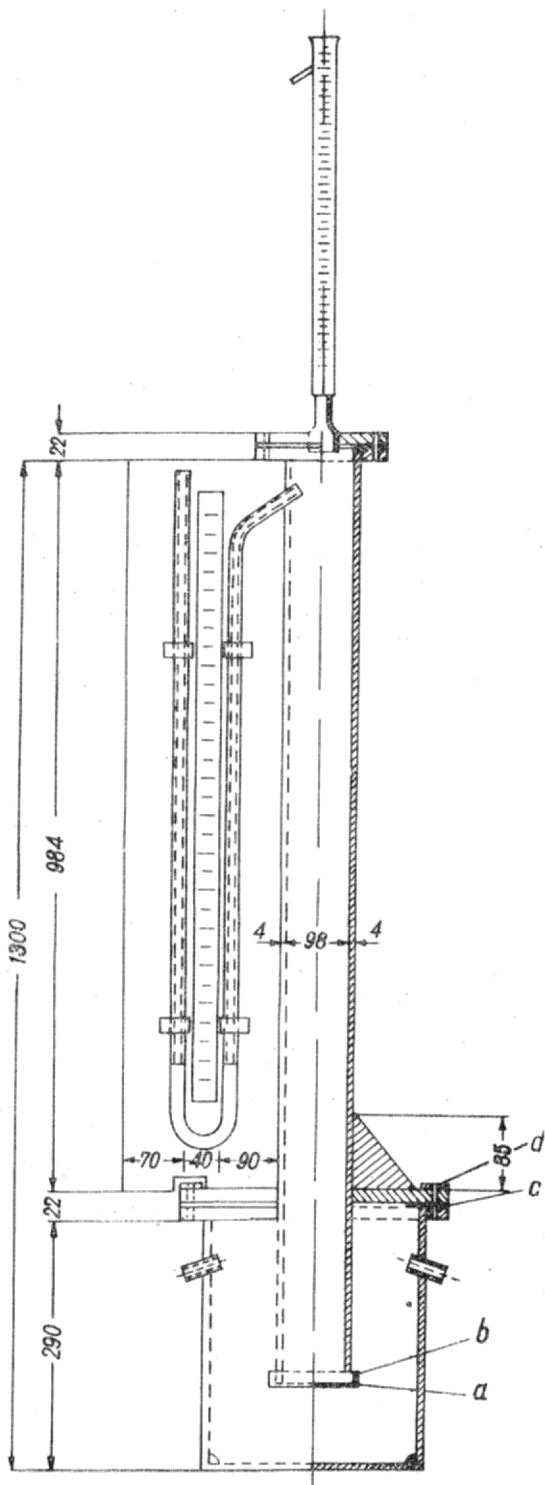
Dla badania zwietrzelin zaistniała konieczność zaprojektowania i wykonania specjalnego przyrządu (ryc. 1). Próbki zwietrzelin poddane badaniom umieszcza się w pionowej rurze plastikowej posiadającej u dołu siatkę metalową. Średnica rury została tak dobrana, aby możliwe było umieszczenie całej próbki, zawierającej wszystkie frakcje. Ułożenie i zagęszczenie próbki musi być wykonane z dużą starannością, tak aby możliwie jak najlepiej wymodelować warunki naturalne. Po ułożeniu gruntu, rura plastikowa umieszczona jest w zbiorniku dolnym, który może być szczelnie połączony z kolnierzem przyspawanym do rury. Wypełnienie wszystkich por wodą następuje od dołu w sposób powolny, tak aby z próbki całkowicie zostało usunięte powietrze. Dzięki szczelnemu połączeniu rury z dolnym zbiornikiem, możliwym jest wywieranie ciśnienia wody, niezbędnego dla wywołania filtracji z dołu do góry. Ciśnienie wody uzyskuje się przez połączenie dolnego zbiornika przyrządu, z oddzielnym naczyniem. Naczynie to może być ustawione na różnej wysokości, co zezwala zarówno na regulowanie jak i prosty pomiar wielkości ciśnienia wody.

Badanie musi być prowadzone w jednakowej temperaturze, tak aby wyeliminować wpływ zmian lepkości filtrującej wody. Pomiar temperatury wody

wykonywany jest zarówno w naczyniu, z którego dopływa woda, jak i na odpływie. W prowadzonych badaniach temperatura wody wynosiła 20°C.

Istnieje również możliwość zamknięcia szczelnego rury plastikowej od góry, co pozwala zarówno na wywieranie przeciwcisnienia przy prowadzeniu filtracji z dołu do góry, jak również umożliwia zmianę kierunku filtracji z góry na dół. Dla pomiarów wielkości ciśnienia skóry zamstawiany manometr rtęciowy. Przyrząd dzięki swej konstrukcji umożliwia więc prowadzenie bardzo dokładnych badań filtracji i to dla dwu kierunków, jak i dla celowo dobranych różnic ciśnień. Fotografia przyrządu podana jest na ryc. 2.

Przedstawione w artykule wyniki obejmują badania zwietrzelin, przy filtracji z dołu do góry, bez wywierania ciśnienia od góry. Wielkość ciśnienia wody zwiększana była w sposób powolny, stopniami o wielkości 0,05 kG/cm<sup>2</sup>, przy ciągłym pomiarze wydatku, dla różnych zwiększających się spadków hydraulicznych. Po rozpoczęciu filtracji, dla każdego ciśnienia wody pomiar wydatku prowadzono tak długo, aby mieć pewność, że jest on całkowicie ustabilizowany. Dzięki wymodelowaniu warunków naturalnych, co uzyskano przez właściwe ułożenie zwietrzliny w rurze, właściwe wypełnienie por wodą, stopniowe i powolne podnoszenie ciśnienia przy jednoczesnym pomiarze ustabilizowanego wypływu wody



Ryc. 1. Przyrząd do badania zwietrzelin.

a — siatka metalowa, b — obręcz metalowa, c — podkładka gumowa, d — pierścień metalowy.

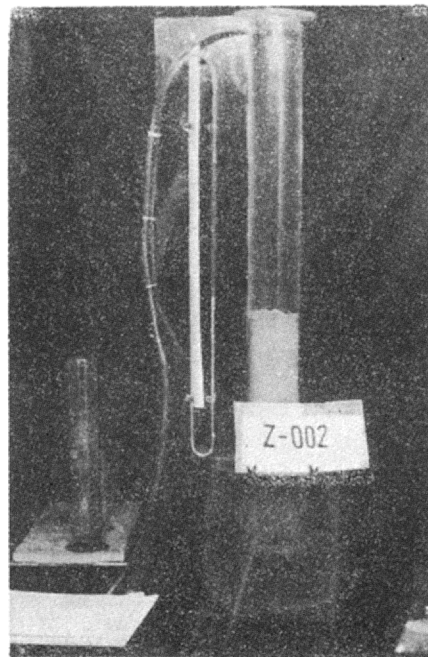
Fig. 1. Apparatus for examination of weathered products.

a — metal grid, b — metal hoop, c — rubber washer, d — metal ring.

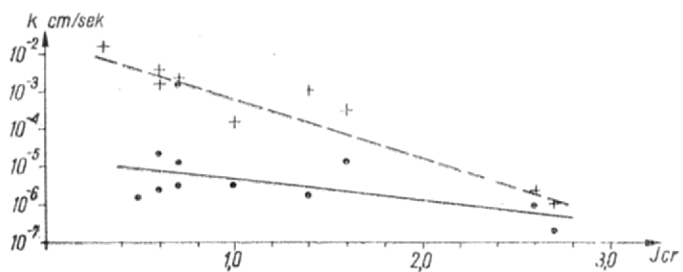
możliwe było określenie wielkości filtracji dla zwietrzelin w przypadku filtracji z dołu do góry.

W czasie badania prowadzone były w sposób ciągły obserwacje zmian własności zwietrzelin, pozwalające na określenie filtracyjnych deformacji gruntu.

Szczególne uwagi została zwrócona na zagadnienie wynoszenia małych cząstek z porowatego



Ryc. 2. Fotografia przyrządu do badania zwietrzelin.  
Fig. 2. Photograph of the apparatus for examination of weathered products.

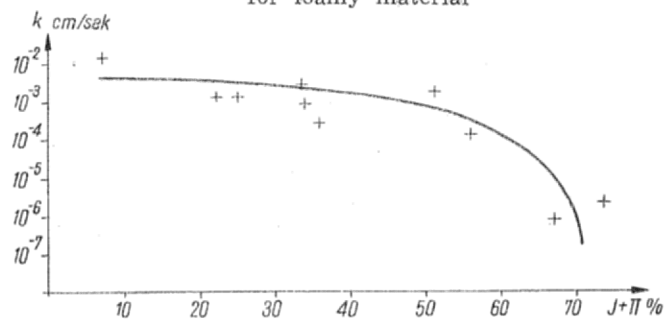


Ryc. 3.

--- dla zwietrzelin, — dla materiału gliniastego.

Fig. 3.

--- for weathered products, — for loamy material



Ryc. 4. Fig. 4.

ośrodka. W zasadzie na podstawie prowadzonych obserwacji możliwe jest wyróżnienie w ciągu badania, czterech następujących kolejno okresów.

W pierwszym okresie, przy niewielkich spadkach, filtracji nie obserwowano. Zwietrzelina zachowywała się, aż do momentu wywarcia pewnego ciśnienia, jak ośrodek całkowicie nieprzepuszczalny.

W drugim okresie, po uzyskaniu pewnej określonej wartości ciśnienia, przy spadku hydraulicznym  $J_0$ , przez zwietrzelinę rozpoczyna się proces filtracji. W tym czasie nie daje się zaobserwować wynoszenia cząstek, mamy do czynienia z ruchem laminarnym i możemy określić wielkość współczynnika filtracji dla zwietrzelin. Badanie w tym okresie prowa-

dzone musi być przez stosunkowo długi okres, tak aby uzyskać zarówno stałą wielkość wydatku, jak i móc przeprowadzić obserwacje odnośnie do możliwości powstania sufozji, przy filtracji przez dłuższy czas.

Przy stopniowym zwiększaniu wielkości spadku hydraulicznego dochodzimy do trzeciego okresu, kiedy następuje wymywanie drobnych cząstek z gruntu. W tym okresie następuje zwiększenie szybkości ruchu wody, a przez to wywarcie przez strumień filtracyjny tak dużego nacisku na cząstki gruntu, że zostają przewyższone siły spójności, a przez to możliwe jest wyraźne zaobserwowanie procesu sufozji. Należy podkreślić, że dla zwietrzelin ten okres daje się bardzo precyzyjnie zaobserwować.

W okresie czwartym po dalszym zwiększeniu spadku, a przez to i wzroście szybkości strumienia filtrującego, następuje wymywanie cząstek gruntu, aż do utworzenia się kanału, a więc powstaje zjawisko przebiccia hydraulicznego, ewentualnie następuje zniszczenie gruntu poprzez jego wyparcie. W tym okresie badana zwietrzelnia traci jakiegokolwiek własności izolujące.

Badanie musi być prowadzone w sposób bardzo powolny, gdyż jedynie w ten sposób można zaobserwować kolejne okresy. Jednocześnie należy zwracać uwagę na utrzymywanie stałej wielkości ciśnienia statycznego wody, gdyż niewielkie jego wahania, szczególnie w trzecim okresie, mogą spowodować zniszczenie próbki. Uchwycenie właściwego postępu, przy zwiększaniu ciśnienia wymaga dużego doświadczenia w prowadzeniu badań.

Również przy badaniu wielkości współczynnika filtracji materiału gliniastego, a więc po usunięciu ziarn  $\phi$  2,0 mm, musiała być zastosowana specjalna metoda badań. Ze względu na wartości współczynnika filtracji  $k = 10^{-5}$  do  $10^{-7}$  cm/sek zastosowano badanie, filtracji przez podciąganie kapilarne.

W tym celu zastosowano poziomą rurę szklaną  $\phi$  40 mm umieszczoną w basenie z wodą. Zgodnie z prawem Darcy dla pełnego nasycenia mamy:

$$n \cdot v_s = kJ \quad [3]$$

$$\text{lub} \quad n \frac{dx}{dt} = k \frac{h_0 + h_c}{x} \quad [4]$$

skąd po scałkowaniu uzyskujemy

$$\frac{x_2^2 - x_1^2}{t_2 - t_1} = \frac{2k}{n} (h_0 + h_c) \quad [5]$$

Ponieważ mamy dwie niewiadome  $k$  i  $h_c$ , dla ich wyznaczenia muszą być dokonane dla jednej próbki

## SUMMARY

The phenomenon of suffosion of weathered products is of particular importance for building industry, especially for hydraulic engineering. Since so far no bases of this phenomenon have been explained, the applied formulae can be used in the determined cases, within a strongly limited area.

Special apparatus has been constructed to conduct studies on insulating properties of the weathered products of the Gogolln limestones and ore-bearing dolomites. On the basis of the researches made, the values of permeability coefficient and of critical heads were determined, and the results were given that show conditions at which the filtration deformation of soils begins.

According to the results obtained, diagram were made to illustrate a dependence between the value of the critical head and the permeability coefficients of the weathered products and of loamy materials, as well as between the permeability coefficients and the contents of clay and silt fractions.

dwa pomiary, przy jednej wartości  $h_0$ , a następnie dla innej wartości  $h_0$ . Pozwala to uzyskać dwa równania z dwiema niewiadomymi, z których można obliczyć wartość współczynnika filtracji  $k$ . Wyniki badań zostały zestawione w tabeli.

W oparciu o uzyskane wyniki wykreślono zależność pomiędzy wielkością spadku krytycznego, a współczynnikami filtracji dla zwietrzelniny i dla materiału gliniastego. Przy przyjęciu podziałki półlogarytmicznej zależności ta jest liniowa (ryc. 3). Wykreślono również zależność wielkości współczynnika filtracji od zawartości frakcji ilowej i pyłowej (ryc. 4.) Nie udało się natomiast stwierdzić zależności od wskaźnika zwietrzenia, ani od porowatości. Po dokonaniu analizy dotychczas przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

1. Wzór Sichardta (wzór 1) nie znajduje zastosowania dla obliczeń krytycznego spadku dla zwietrzelin.

2. Wzór Patraszewa (wzór 2) może mieć zastosowanie dla zwietrzelin o ile współczynnik filtracji jest większy niż  $10^{-4}$  cm/sek.

3. Zwietrzelnina dolomitów kruszonośnych wykazuje niski wskaźnik zwietrzenia, wahający się od 0,09—0,50 i najmniejszą wartość frakcji ilowej od 2%—4%, wykazuje również najwyższe współczynniki filtracji dla zwietrzelniny rzędu  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  cm/sek. Wiąże się z tym małe wartości spadków, powodujących powstanie sufozji. Wielkość spadków waha się od 0,3—0,7.

4. Zwietrzelnina wapieni gogolińskich posiada wyższy wskaźnik zwietrzenia od 0,62—3,7. Zawartość frakcji ilowej waha się od 6%—33,5%. Współczynniki filtracji są rzędu  $10^{-3}$ — $10^{-6}$  cm/sek, z czym związane są z reguły, wyższe niż dla dolomitów kruszonośnych, wartości spadków krytycznych, wynoszące 0,5—2,7.

5. Współczynnik filtracji zwietrzelnin wapieni gogolińskich i dolomitów kruszonośnych, przy zawartości frakcji ilowej i pyłowej do 50%, może być przyjęty rzędu  $10^{-3}$  cm/sek. Przy większej ilości tych frakcji, wartość współczynnika filtracji gwałtownie maleje.

## LITERATURA

1. Hansen J., Brinch, Lundgren H. — Hauptprobleme der Bodenmechanik, Berlin — Göttingen, Heidelberg 1960.
2. Istomina W. C. — Filtracionnaja ustojcziwost gruntow. Moskwa. 1957.
3. Means R. E. Parcher — Physical properties of soils, Columbus Ohio 1963.
4. Szechman J. M. — Filtracja małokoncentrowanych suspenzji. 1961.

## РЕЗЮМЕ

Важное значение для строительства, особенно гидростроительства, имеет явление суффозии продуктов выветривания. В связи с тем, что до сих пор не выяснены основы этого явления, существующие формулы могут применяться лишь в конкретных, детально ограниченных случаях.

Для изучения продуктов выветривания гоголинских известняков и рудоносных доломитов был сконструирован специальный аппарат. Проведены исследования по определению коэффициентов фильтрации, критических склонов и условий, в которых начинается фильтрационная деформация грунта.

На основании полученных результатов составлены графики определяющие зависимость между величиной критического склона и коэффициентами фильтрации продуктов выветривания и глинистого материала и между коэффициентами фильтрации и содержанием глинистой и пелитической фракций.