

ZMIENNOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKÓW FILTRACJI PIASKU GLINIASTEGO I GEOWŁÓKNINY W PROCESIE DŁUGOTRWAŁEGO PRZEPLYWU

Dariusz Wojtasik

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki laboratoryjnych badań współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina, które zostały przeprowadzone zgodnie z normą ASTM D 5101-90. Badaniami objęto geowłókninę K-500 oraz piasek gliniasty przy zewnętrznych gradientach hydraulicznych w zakresie $i = 1-10$. Analiza wyników przeprowadzonych badań wskazuje, że do obliczeń projektowych powinno się wyznaczać, oprócz współczynnika filtracji geowłókniny i gruntu, także współczynnik filtracji układu grunt-geowłóknina. Zaproponowano obliczenie zmiany końcowego współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina na podstawie początkowych wartości współczynników filtracji gruntu i geowłókniny oraz zadanego gradientu hydraulicznego.

Słowa kluczowe: geowłóknina igłowana, współczynnik filtracji, gradient hydrauliczny

WSTĘP

Najliczniejszą grupę przepuszczalnych materiałów tekstylnych stosowanych w praktyce inżynierskiej stanowią geowłókniny [Wesolowski i in. 2000]. Na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych w samej Europie i Ameryce Północnej do budowy konstrukcji inżynierskich wykorzystano ponad 300 mln m² tych produktów [Rollin 1986]. Spowodowane to było licznymi zaletami powyższych materiałów, które wpływają m.in. na zmniejszenie robót ziemnych, większą stabilizację konstrukcji oraz mniejsze obciążenie podłoża.

Aby prawidłowo dobrać geowłókninę do gruntu chronionego, wymagana jest znajomość podstawowych parametrów zarówno właściwości gruntu, jak i materiału filtracyjnego. Zaliczamy do nich właściwości fizyczne, mechaniczne i hydrauliczne, a także odporności na działanie czynników atmosferycznych, chemicznych oraz biologicznych.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Dariusz Wojtasik, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Katedra Geoinżynierii, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, e-mail: dariusz_wojtasik@sggw.pl

Zastosowanie geowłóknin w systemach filtracyjnych i drenażowych wymaga ponadto określenia efektywności oraz czasu skutecznego działania tych produktów [Fannin i in. 1994, Młynarek 2000, Palmeria i in. 2002]. Prawidłowo dobrana geowłóknina, stanowiąca filtr ochraniający grunt w procesie filtracji, powinna spełniać kryterium przepuszczalności i kolmatacji. Pierwsze kryterium informuje nas o tym, iż przepuszczalność geowłókniny nie może być mniejsza od przepuszczalności gruntu. Można je zapisać w postaci nierówności:

$$k_{\text{geo}} > \alpha \cdot k_{\text{gruntu}} \quad (1)$$

gdzie $\alpha = 1-10$ (w zależności od autora kryterium).

Drugie kryterium dotyczy zmniejszenia przepuszczalności geowłókniny na skutek wnikania w jej strukturę drobnych cząstek (ziaren) gruntu podczas procesu filtracji. Zjawisko to zależy w głównej mierze od składu granulometrycznego gruntu chronionego oraz od zastępczej średnicy porów w geowłókninie. W trakcie badań laboratoryjnych stwierdzono, że wartości współczynników filtracji gruntu oraz geowłókniny zmieniają się w zależności od wielkości gradientu hydraulicznego [Krzywosz i Matusiewicz 1994]. Dotychczas, aby dobrać geowłókninę stanowiącą filtr odwrotny dla gruntów chronionych, wystarczyło przy określonym gradiencie hydraulicznym określić współczynnik filtracji w gruncie i porównać go ze współczynnikiem filtracji w geowłókninie. Nie rozpatrywano natomiast wzajemnego oddziaływania układu grunt-geowłóknina.

Ze względu na fakt, iż przepływ w gruncie wewnętrznie niestabilnym związany jest z występowaniem różnych gradientów hydraulicznych (w celu wyjaśnienia zaobserwowanych zjawisk) przeprowadzono badania współczynników filtracji układu grunt-geowłóknina.

METODYKA BADAŃ

Badania laboratoryjne współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina przeprowadzono w zmodyfikowanym aparacie [Wojtasik i Krzywosz 2006]. Modyfikacja zalecanego w normie ASTM D 5101-90 aparatu polegała na zainstalowaniu dodatkowych piezometrów 6 i 7 w celu uzyskania pomiarów ciśnienia w jak najbliższym sąsiedztwie geowłókniny. Zastosowany układ piezometrów umożliwił analizę zachowania się układu grunt-geowłóknina z podziałem na następujące strefy:

dla układu grunt-geowłóknina

- strefa 7–8, geowłóknina i 4-milimetrowa warstwa gruntu od piezometru 7 do 8,
- strefa 6–8, geowłóknina i 8-milimetrowa warstwa gruntu od piezometru 6 do 8,
- strefa 4, 5–8, geowłóknina i 25-milimetrowa warstwa gruntu od piezometrów 4 i 5 do 8.

dla gruntu

- strefa 6–7, 4-milimetrowa warstwa gruntu znajdująca się w odległości 4–8 mm powyżej geowłókniny między piezometrami 6 i 7,
- strefa 4, 5–6, 17-milimetrowa warstwa gruntu znajdująca się w odległości 8–25 mm powyżej geowłókniny pomiędzy piezometrami 4 i 5 oraz 6,
- strefa 2, 3–4, 5, 50-milimetrowa warstwa gruntu znajdująca się w odległości 25–75 mm powyżej geowłókniny pomiędzy piezometrami 2 i 3 oraz 4 i 5.

Badania współczynnika filtracji polegały na pomiarze przepływu wody prostopadle do płaszczyzny układu grunt-geowłóknina w jednostce czasu przy zadanej różnicy ciśnień. Do badań przygotowano próbki gruntu przesianego przez sito 2 mm, który wysuszono w temperaturze 105°C. Przygotowany grunt rozdzielono na cztery równe porcje, które, po umieszczeniu geowłókniny, kolejno zagęszczono w aparacie poprzez ubijanie ubijakiem. W celu usunięcia nagromadzonego powietrza doprowadzono odpowietrzoną wodę w temperaturze 20°C od dołu badanej próbki. Następnie po 12 godzinach zmieniono kierunek przepływu wody i przeprowadzono serię odczytów pomiarowych przy zadanych zewnętrznych gradientach hydraulicznych, które wynosiły odpowiednio: 1,0, 2,5, 5, 7,5 i 10. Każdorazowo po ustabilizowaniu się przepływu dokonywano odczytów temperatury przepływającej wody (T), jej objętości (V), czasu przepływu (t) oraz wysokości ciśnienia piezometrycznego dla poszczególnych piezometrów (Δh). Czas, po którym dokonywano odczytów od momentu stabilizacji przepływu, wynosił: 0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 6, 24 h i trwał aż do momentu zaniku przepływu. Współczynnik filtracji określono według zależności:

$$k = \frac{V \cdot R_T \cdot L}{\Delta h \cdot A \cdot t} \quad [\text{m/s}] \quad (2)$$

gdzie: V – objętość wody [m^3],

A – powierzchnia próbki [m^2],

t – czas przepływu mierzonej objętości wody [s],

Δh – różnica odczytów piezometrycznych [m],

L – grubość warstwy filtracyjnej [m],

R_T – temperaturowy współczynnik korekcyjny wody (odniesiony do 20°C), można go odczytać z tabeli zamieszczonej w normie ASTM D 4491-92, wykresów (EN 12040) lub obliczyć z zależności:

$$R_T = \frac{\eta_T}{\eta_{20}} = \frac{1,762}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad [-] \quad (3)$$

$$\eta_T = \frac{1,78}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad [\text{mPa}\cdot\text{s}] \quad (4)$$

gdzie: η_T – dynamiczny współczynnik lepkości wody w temperaturze $T^\circ\text{C}$ [$\text{mPa}\cdot\text{s}$],

T – temperatura wody [$^\circ\text{C}$],

η_{20} – dynamiczny współczynnik lepkości wody w temperaturze 20°C [$\text{mPa}\cdot\text{s}$].

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH MATERIAŁÓW

Do badań laboratoryjnych wykorzystano geowłókninę igłowaną K-500 oraz piasek gliniasty. Geowłóknina o grubości $g = 5,3$ mm i charakterystycznej średnicy porów $O_{90} = 0,06$ mm posiadała współczynnik filtracji (kierunek prostopadły do jej powierzchni) $k_v = 5,4 \cdot 10^{-3}$ m/s. Piasek gliniasty zawierał w swoim składzie: 70% frakcji piaskowej,

25% – pyłowej oraz 5% – ilowej. Zgodnie z kryterium Kenneya i Lau [1985] badany grunt jest wewnątrznie niestabilny i charakteryzuje się następującymi właściwościami: wskaźnikiem nierównomierności uziarnienia $C_u = 6$, wskaźnikiem krzywizny $C_c = 1,2$, porowatością $n = 0,43$ oraz współczynnikiem filtracji $k = 6,3 \cdot 10^{-5}$ m/s. Zbiorecze zestawienie właściwości fizycznych, hydraulicznych oraz mechanicznych badanej geowłókniny oraz gruntu przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Właściwości badanej geowłókniny K-500
Table 1. Properties of tested nonwoven geotextile K-500

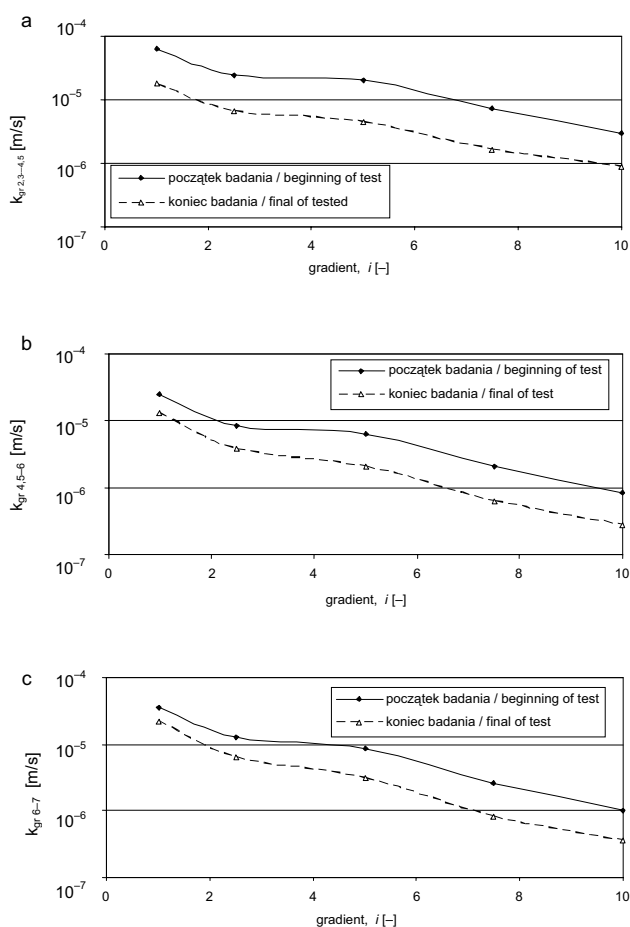
Właściwości – Properties	Wartości parametrów – Parameters values
Fizyczne – Physicals	
Grubość przy zadanych obciążeniu 2 kPa Thickness for the applied load 2 kPa	$g = 5,3$ mm
Masa powierzchniowa Mass per unit area	$\mu A = 515,8$ g/m ²
Zastępcza średnica porów Apparent opening size	$O_{90} = 0,06$ mm
Hydrauliczne – Hydraulics	
Współczynnik filtracji prostopadły do próbki Permeability coefficient (cross-plane flow)	$k_v = 5,4 \cdot 10^{-3}$ m/s
Współczynnik filtracji w płaszczyźnie próbki Transmissivity (in plane flow)	$k_h = 2,7 \cdot 10^{-3}$ m/s
Mechaniczne – Mechanicals	
Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength	
– wszerz pasma strip tensile cross machine direction	$\alpha_{f c.m} = 23$ kN/m
– wzdłuż pasma strip tensile machine direction	$\alpha_{f m} = 15,5$ kN/m
Przebiecie statyczne Static puncture (met. CBR)	$F_p = 3,04$ kN

Tabela 2. Właściwości badanego gruntu
Table 2. Properties of tested soils

Właściwości – Properties	Wartości parametrów – Parameters values
Rodzaj – Type	
Piasek gliniasty – Slightly clayey sand	piasek – sand – 70%, pył – silt – 25%, il – clay – 5%
Fizyczne – Physicals	
Wskaźnik nierównomierności uziarnienia Coefficient of uniformity	$C_u = d_{60}/d_{10} = 6$
Wskaźnik krzywizny Coefficient of curvature	$C_c = d_{30}^2/(d_{60} \cdot d_{10}) = 1,2$
Charakterystyczne średnice Characteristic diameters	$d_{90} = 0,21$ mm; $d_{60} = 0,12$ mm; $d_{10} = 0,02$ mm
Gęstość objętościowa szkieletu Density of dry soil	$\rho_d = 1,8$ t/m ³
Porowatość Porosity	$n = 0,43$
Wskaźnik zagęszczenia Relative compaction	$I_s = 0,83$
Hydrauliczne – Hydraulics	
Współczynnik filtracji – Permeability coefficient	$k = 6,3 \cdot 10^{-5}$ m/s

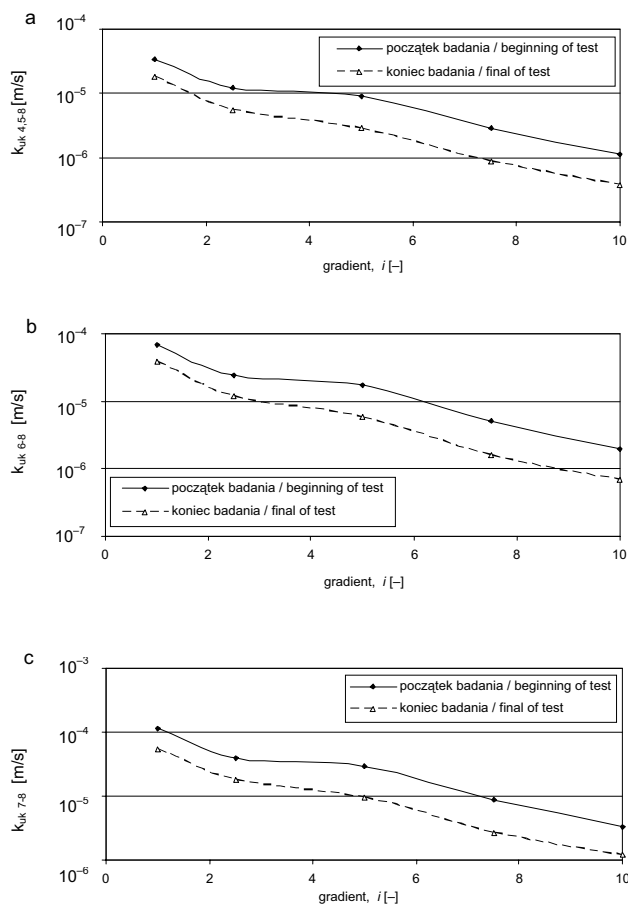
ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań współczynników filtracji w poszczególnych strefach w gruncie oraz układzie grunt-geowłóknina zamieszczono na rysunkach 1 i 2. Przedstawiono na nich zależność współczynnika filtracji w stosunku do zewnętrznego gradientu hydraulicznego. Zmiany współczynników filtracji w poszczególnych strefach spowodowane były kolmatacją na skutek zmniejszenia porowatości gruntu i geowłókniny, jak również zjawiskiem przemieszczania się drobnych cząstek szkieletu gruntowego (rys. 3), wynoszonych podczas przepływu poza sekcję badawczą. Wynikało to z wewnętrznej niestabilności badanego gruntu. Zestawienie początkowych i końcowych wartości współczynników filtracji w poszczególnych strefach przy skrajnych zewnętrznych gradientach hydraulicznych przedstawiono w tabeli 3.



Rys. 1. Zmiany współczynnika filtracji w gruncie w zależności od zewnętrznego gradientu hydraulicznego dla poszczególnych stref: a – strefa 2, 3–4, 5; b – strefa 4, 5–6; c – strefa 6–7

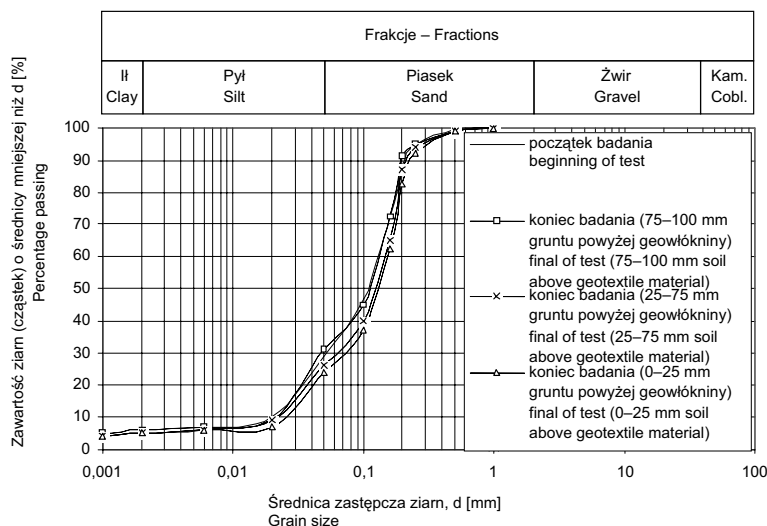
Fig. 1. The changes of permeability coefficient values of soil under different outside hydraulic gradient for selected zones: a – zone 2, 3–4, 5; b – zone 4, 5–6; c – zone 6–7



Rys. 2. Zmiany współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina w zależności od zewnętrznego gradientu hydraulicznego dla poszczególnych stref: a – strefa 2, 3–4, 5; b – strefa 4, 5–6; c – strefa 6–7

Fig. 2. The changes of permeability coefficient values of soil-geotextile system under different outside hydraulic gradient for selected zones: a – zone 2, 3–4, 5; b – zone 4, 5–6; c – zone 6–7

Początkowy współczynnik filtracji geowłókniny, wynoszący $5,4 \cdot 10^{-3}$ m/s, zmniejszył się na koniec badań do wartości $0,9 \cdot 10^{-3}$ m/s (rys. 4). Największą wartość współczynnika filtracji w gruncie zaobserwowano dla strefy 2, 3–4, 5 przy gradiencie hydraulicznym $i = 1$, w której $k = 6,3 \cdot 10^{-5}$ m/s, najmniejszą zaś w strefie 4, 5–6 przy $i = 10$, w której $k = 3 \cdot 10^{-7}$ m/s. Dla układu grunt-geowłóknina największą wartość współczynnika filtracji zaobserwowano w strefie 7–8 przy $i = 1$, w której $k = 1,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, najmniejszą zaś w strefie 4, 5–8 przy $i = 10$, gdzie $k = 4 \cdot 10^{-7}$ m/s. Uzyskane wyniki badań potwierdzają wewnętrzną niestateczność gruntu, którego cząstki (ziarna) pod wpływem filtracji ulegają przemieszczeniu w kierunku geowłókniny, powodując zmniejszenie porowatości w strukturze przepływu we wszystkich badanych strefach. W wyniku tego procesu



Rys. 3. Zmiana współczynnika filtracji geotekstyny na początku i na końcu badania
 Fig. 3. The change of permeability coefficient value of geotextile at the beginning and at the final test

Tabela 3. Wartości współczynników filtracji w poszczególnych strefach
 Table 3. Coefficient permeability values for selected zones

Rodzaj strefy Zone type	Badana strefa Tested zone	Numery piezometrów Piezometer number	Współczynnik filtracji, k [m/s] Permeability coefficient		Redukcja współczynnika filtracji (k_p/k_k) Reduction of permeability coefficient $i = 1-10$
			Początek badania (k_p) Beginning of test $i = 1$	Koniec badania (k_k) Final of test $i = 10$	
Układ grunt-geotekstyna Soil-nonwoven geotextile system	geo+25 mm	4, 5-8	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$	≈ 85
	geo+8mm	6-8	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-7}$	≈ 99
	geo+4mm	7-8	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	≈ 92
Grunt Soil	25-75mm	2, 3-4, 5	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-7}$	≈ 70
	8-25mm	4, 5-6	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-7}$	≈ 80
	4-8mm	6-7	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-7}$	≈ 90

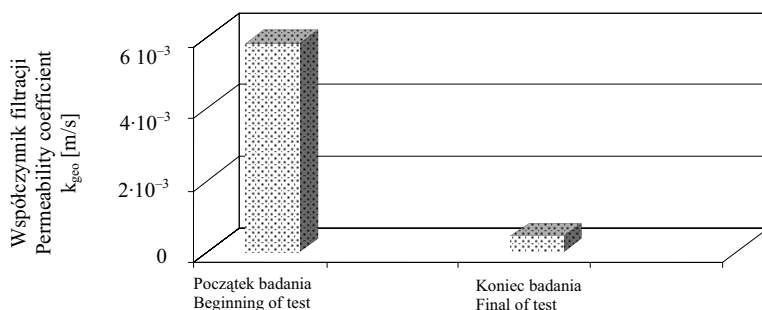
w gruncie nastąpiła ponad 70-krotna redukcja współczynnika filtracji oraz ponad 80-krotna w układzie grunt-geotekstyna.

Na podstawie przeprowadzonych 5 serii badań oraz analizy statystycznej przy wykorzystaniu programu Statgraphics opracowano zależność, pozwalającą obliczyć końcowy współczynnik filtracji układu grunt-geotekstyna przy żądanym gradiencie hydraulicznym:

$$k_{uk\ ko\ \text{ń}} = k_{ego} \cdot k_{gr}^{0,6} \cdot i^{-0,6} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

gdzie: k_{geo} – początkowa wartość współczynnika filtracji geowłókniny [m/s],
 k_{gr} – początkowa wartość współczynnika filtracji gruntu [m/s],
 i – zewnętrzny gradient hydrauliczny [-].

Zależność (5) o współczynniku determinacji $R^2 = 98\%$ została opracowana dla geowłókniny o grubości $g = 5,3$ mm, jej współczynniku filtracji $k_{\text{geo}} = 5,4 \cdot 10^{-3}$ m/s przy zewnętrznych gradientach hydraulicznych w zakresie $i = 1-10$.



Rys. 4. Zmiana współczynnika filtracji geowłókniny na początku i na końcu badania
 Fig. 4. The change of permeability coefficient value of geotextile at the beginning and at the final test

WNIOSKI

Przeprowadzone badania współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina wykazały, że:

1. W miarę upływu czasu przy różnych zewnętrznych gradientach hydraulicznych maleje współczynnik filtracji zarówno w gruncie, jak i układzie grunt-geowłóknina (wynika to ze zjawiska przemieszczania się szkieletu gruntowego, powodującego zmniejszenie porowatości gruntu oraz geowłókniny).

2. Na zakończenie procesu filtracji współczynnik filtracji geowłókniny igłowanej K-500 uległ nieznacznemu zmniejszeniu.

3. W procesie filtracji nastąpiła ponad 80-krotna redukcja współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina oraz ponad 70-krotna w gruncie.

4. Zmiana końcowego współczynnika filtracji układu grunt-geowłóknina może być określona na podstawie proponowanej zależności (5), wyznaczonej na podstawie początkowych wartości współczynnika filtracji gruntu i geowłókniny oraz zewnętrznego gradientu hydraulicznego w zakresie $i = 1-10$.

PIŚMIENNICTWO

- ASTM D 4491-92. Standard Test Method for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity.
 ASTM Designation: D 5101-90, 1990. Standard Test Methods for Measuring the Soil – Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio.

- EN 12040 1995. Determination of water Permeability Characteristics Normal to the Plane, Without Load.
- Fannin R.J., Vaid Y.P., Shi Y.C., 1994. Filtration behaviour of nonwoven geotextiles. *Canadian Geotechnical Journal* 31, 555–563.
- Kenney T.C., Lau D., 1985. Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal* 22, 2, 215–225.
- Krzywosz Z., Matusiewicz W. 1994. Doświadczenia nad określaniem wodoprzepuszczalności włóknin. *Przegląd Naukowy Wyzd. Mel. i Inż. Środ. SGGW-AR*, Warszawa, 15–21.
- Młynarek J., 2000. Geo drains and geo filters. Retrospective and future trends. *Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering*. Wolski & Młynarek, Eds. Balkema, Rotterdam, 27–47.
- Palmeria E.M., Fannin R.J., 2002. Soil-geotextile compatibility in filtration. *The Seventh of International Conference on Geotextile*, Nicea, 853–870.
- Rollin A.L., 1986. Filtration Opening Size of Geotextile. *ASTM Standardization News*, 50–52.
- Wesołowski A., Krzywosz Z., Brandyk T., 2000. Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Wojtasik D., Krzywosz Z., 2006. Ocena zachowania się układu grunt-geowłóknina w procesie filtracji. *Acta Scientiarum Polonorum, Architectura* 5 (2), 45–54.

THE CHANGES OF PERMEABILITY COEFFICIENT VALUES OF THE CLAYEY SAND AND GEOTEXTILE DURING LONG-TERM FLOW PROCESS

Abstract. The paper presents the results of laboratory analysis of permeability coefficient tests carried out in the modified soil-geotextile permeameter, recommended in ASTM standard D 5101-90. Laboratory tests were performed on nonwoven geotextile K-500 and clayey sand. The analysis of tests results indicates that in the design calculations for nonwoven geotextile used as filters not only permeability coefficient of geotextile and soil, but also permeability coefficient of soil-geotextile system should be determined. The change of the final permeability coefficient of soil-geotextile system based on the initial values of the permeability of geotextile and soil as well as hydraulic gradient were proposed.

Key words: nonwoven geotextiles, permeability coefficient, hydraulic gradient

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 31.10.2006