

Współczynnik szorstkości koryt z roślinnością trawiastą

Abstract

The roughness coefficient of grasslinned open channels. The paper presents the valuation of n - VR method, gave by Ree and Palmer [Ree, Crow 1977; Temple at all. 1987], for calculation of roughness coefficient n in grasslinned open channels. The analysis of this method grounds on the results of laboratory investigations have been made. It has been find that in grasslinned channels the values of n depend not only on VR but also on energy line slope J – this factor is not regard in n - VR method. The laboratory investigations results did not confirm the ranges of Temple's equations validity.

Key words: grasslinned open channels, roughness coefficient, hydraulic calculation method

Wstęp

Ruch wody po powierzchni trawiastej jest zjawiskiem złożonym. W jego badaniach oprócz zagadnień hydraulicznych trzeba uwzględnić również inne, związane z biologicznymi właściwościami traw, wytrzymałością gruntu i roślinności na ruch wody. W pracy wykorzystano wyniki doświadczeń przeprowadzonych w ramach realizacji projektu badawczego nr 5708 92 03 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych. Warunki pro-

wadzenia tych doświadczeń oraz bardziej szczegółowe charakterystyki runi traw użytych w badaniach zostały omówione w pracy Dąbkowskiego i Pachuty (1995).

Związek n - VR

Średnią prędkość przepływu w korycie porośniętym roślinnością trawiastą można obliczyć ze wzoru Manninga:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (1)$$

gdzie:

V – średnia prędkość przepływu [m/s],
 n – współczynnik szorstkości [$m^{-1/3}s$],
 R – promień hydrauliczny [m],
 J – spadek hydrauliczny [–].

Współczynnik szorstkości n charakteryzuje całkowite opory ruchu, które dla powierzchni zadarnionej [Temple i in. 1987] wyrażają średnią geometryczną współczynników cząstkowych:

$$n = \sqrt{n_s^2 + n_f^2 + n_r^2} \quad (2)$$

gdzie:

*Katedra Budownictwa Wodnego SGGW, ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa.

n – wsp. szorstkości koryta z roślinnością (zastępczy),

n_s – wsp. szorstkości ziarn gruntu,

n_f – wsp. szorstkości ujmujący nierówność powierzchni gruntu,

n_r – wsp. szorstkości wynikający z oddziaływania roślinności.

Wartości współczynnika szorstkości ziarn n_s dla gruntów niespoistych są zależne od uziarnienia tych gruntów. Według Lane'a [Temple i in. 1987] są równe:

$$n_s = 0,0156 m^{-1/3}_s \quad \text{dla } d_{75} < 1,3 \text{ mm}$$

$$n_s = 0,0156 \cdot d_{75}^{1/6} \quad \text{dla } d_{75} < 1,3 \text{ mm}$$

gdzie:

d_{75} – średnica charakterystyczna ziarna gruntu, stanowiąca wraz z frakcjami drobniejszymi 75% masy próbki gruntu [mm].

Natomiast dla gruntów spoistych o wskaźniku plastyczności $I_p > 10$ wartość współczynnika n_s jest według Lane'a stała i wynosi $n_s = 0,0156 m^{-1/3}_s$.

Według badań Ree i Palmera (1949) w korytach umocnionych trawami o zróżnicowanej wysokości (tab. 1) wartości współczynnika szorstkości n można uzależnić od iloczynu średniej prędkości i promienia hydraulicznego przekroju VR (rys. 1).

Wspomniane badania Ree i Palmera oraz późniejsze [Ree, Crow 1977; Temple i in. 1987] były prowadzone w następujących warunkach:

- okrywa roślinna była zanurzona w wodzie,
- spadek dna w korytach badawczych był mniejszy niż 1:10, tzn. $J < 100\%$,

Tabela 1. Parametry traw badanych przez Ree i Palmera [CIRIA 1985; Temple i in. 1987]

Oznaczenie krzywej na rys. 1	Średnia wysokość traw h_r [mm]	Współczynnik oporu trawy C_r [-]
A	> 750	10,0
B	280–610	7,64
C	150–250	5,60
D	50–150	4,44
E	< 50	2,88

- powierzchnia gruntu była bardzo wyrównana, tzn. można przyjąć $n_f = 0$,
- współczynnik szorstkości ziarn gruntu $n_s = 0,0156 m^{-1/3}_s$.

Biorąc pod uwagę powyższe ustalenia, wzór (2) można zapisać następująco:

$$n = \sqrt{0,0156^2 + 0^2 + n_s^2}$$

Krzywe pokazane na rysunku 1 Temple i in. (1987) opisali jednym równaniem:

$$n = \exp \{ C_r (0,0133 [\ln(VR)]^2 - 0,0322 \cdot \ln(VR) + 0,145) - 4,16 \} \quad (3)$$

ważnym w przedziale:

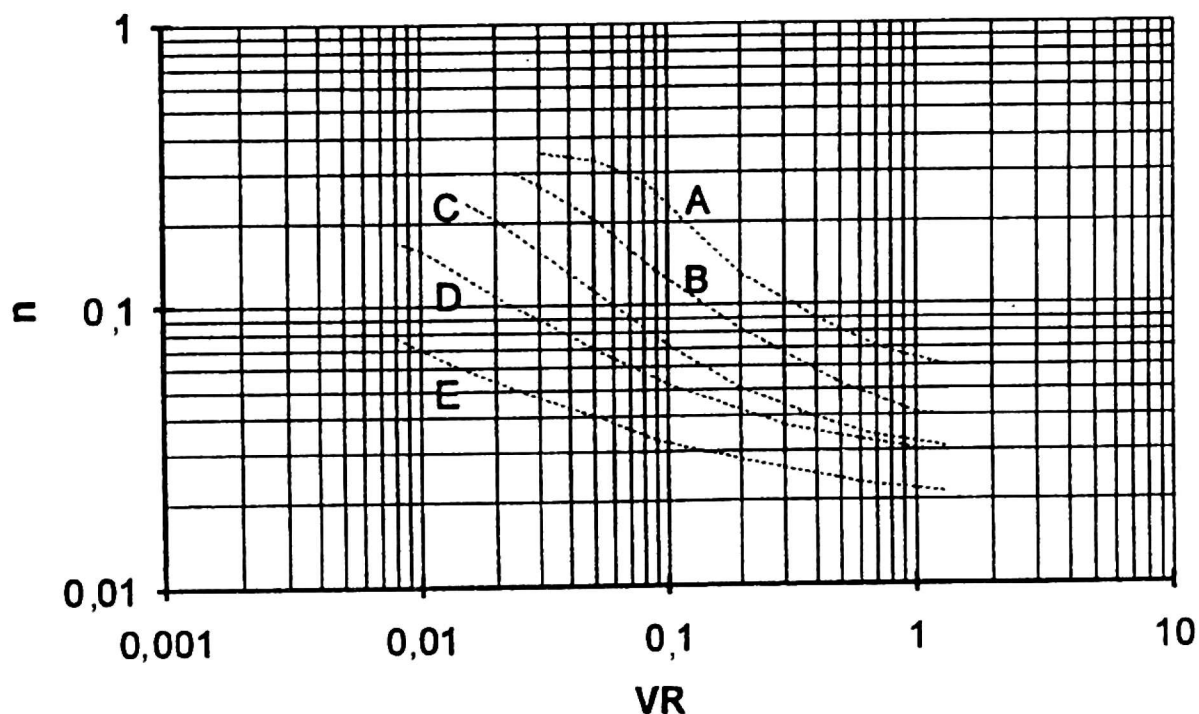
$$0,00023 \cdot C_r^{2,5} \leq VR \leq 3,3 \quad (4)$$

gdzie: C_r – współczynnik oporu roślinności wyrażony wzorem:

$$C_r = 2,5 \left(h_r \sqrt{M} \right)^{1/3} \quad (5)$$

gdzie:

h_r – wysokość trawy [m],



Rys. 1. Zależność $n = f(VR)$ dla traw o zróżnicowanej wysokości i gęstości według badań Ree i Palmera (1949)

M – gęstość roślinności, czyli liczba źdźbeł (łodyg) roślin rosnących na 1 m^2 powierzchni [$1/\text{m}^2$].

W tabeli 1 podano wartości C_r dla traw badanych przez Ree i Palmera, natomiast gęstości traw M według badań amerykańskich i polskich podano w tabelach 2 i 3.

Jeżeli wartość iloczynu VR nie spełnia warunku (4), to wg Temple'a współczynnik szorstkości n należy obliczać z następujących zależności:

$$n = \exp \{ C_r (0,0133 [\ln(0,00023 C_r^{2,5})]^2 - 0,0322 \cdot \ln(0,00023 C_r^{2,5}) + 0,145) - 4,16 \} \quad (6)$$

gdy spełniony jest warunek

$$VR < 0,0023 \cdot C_r^{2,5};$$

$$n = \exp (0,126 \cdot C_r - 4,16) \quad (7)$$

gdy $VR > 3,3$.

Tabela 2. Gęstość darniny M i stopień zadarnienia S_d według danych amerykańskich [Temple i in. 1987]

Rodzaj roślinności	Gęstość darniny M^* [$1/\text{m}^2$]	Stopień zadarnienia S_d [-]
Wiechlina łąkowa	3770	0,87
Mieszanka traw	2150	0,75
Lucerna	5380	0,50

*Dane dotyczą powierzchni w dobrym stanie; w innych warunkach podane wartości należy pomnożyć przez: 0,33 – warunki ubogie; 0,67 – średnie; 1,33 – bardzo dobre; 1,67 – doskonałe.

Ze wzorów (6) i (7) wynika, że dla małych i dużych wartości VR współczynnik szorstkości n zależy tylko od parametrów runi traw, natomiast nie zależy od hydraulicznych parametrów przepływu, takich jak V , R , J .

Tabela 3. Gęstość traw M [l/m^2] i stopień zadarnienia S_d [-] powierzchni pastwiska według danych polskich [Nazaruk i in. 1990]

Skład mieszanki	Udział [%]	Przy nawożeniu NPK [kg/ha]					
		169,2		263,2		458,3	
		M	S_d	M	S_d	M	S_d
Kupkówka pospolita	100	3050	0,90	3150	0,88	3600	0,79
Kupkówka pospolita Kostrzewa łąkowa Życica trwała Koniczyna biała	30 10 30 30	4800	0,88	4000	0,78	3800	0,73
Kupkówka pospolita Kostrzewa łąkowa Życica trwała Wiechlina łąkowa Koniczyna biała	20 20 20 20 20	4700	0,85	4550	0,81	4500	0,70
Tymotka łąkowa Życica trwała	60 40	5600	0,86	6650	0,75	6950	0,71
Tymotka łąkowa Kostrzewa łąkowa Życica trwała Koniczyna biała	30 10 30 30	5150	0,86	6200	0,78	6300	0,71
Tymotka łąkowa Kostrzewa łąkowa Życica trwała Wiechlina łąkowa Koniczyna biała	20 20 20 20 20	6450	0,89	7250	0,84	6650	0,74

W obliczeniach hydraulicznych koryt korzysta się z wykresów na rysunku 1 lub z równań (3), (6) i (7). Przebieg tych obliczeń jest następujący: przyjmuje się orientacyjną wartość współczynnika szorstkości n_i , na podstawie której oblicza ze wzoru (1) średnią prędkość V_i . Następnie dla znanych parametrów charakterystycznych traw (średniej wysokości h_r i gęstości M) oraz iloczynu VR odczytuje się z rysunku 1. [lub oblicza ze wzorów (3), (6) lub (7)] wartość współczynnika szorstkości n_{i+1} . Jeżeli przyjęta wartość współczynnika szorstkości i ob-

liczona są różne (tzn. $n_i \neq n_{i+1}$), to dla wartości n_{i+1} oblicza się nową wartość prędkości V_{i+1} . Procedurę powtarza się aż do uzyskania wystarczającej zgodności pomiędzy założonym i odczytanym z wykresu (lub obliczonym ze wzorów) współczynnikiem szorstkości.

Weryfikacja związków $n-VR$ na podstawie badań własnych

W przedstawionej metodzie wymiarowania koryt zarośniętych trawami przyj-

muje się, że dla danej runi traw istnieje jeden związek $n-VR$, jeśli spadek koryta nie przekracza 100‰, a trawy są pochylone przez strumień wody. Założenie to sformułowano w wielu publikacjach oraz wytycznych projektowania koryt umocnionych trawami [Hewlett i in. 1987]. W tym ostatnim opracowaniu zaleca się redukować wartość n określoną ze związku $n-VR$ dla danej runi, jeśli spadek J przekracza 100‰. Przyjmuje się redukcję prostoliniową od $n = 0,030 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ przy $J = 100‰$ do $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ przy nachyleniu koryta 1:3. Dla większych nachyleń koryta zakłada się stałą wartość współczynnika szorstkości $n = 0,020 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ niezależnie od cech runi traw.

Z badań przeprowadzonych w Laboratorium Katedry Budownictwa Wodnego SGGW [Dąbkowski 1995] wynika, że dla tej samej runi traw i tego samego natężenia przepływu, przy nieznacznie różniących się wartościach VR , uzyskuje się zróżnicowane wartości n , zmieniające się wraz ze zmianą spadku koryta. Przykłady na rysunkach 2 i 3 przedstawiają układy punktów z doświadczeń serii B, C i H na tle krzywych Ree i Palmera. Grupy punktów odpowiadające zbliżonym wartościom $VR \cong \text{const}$ charakteryzuje wyraźny rozrzut w pionie. Bliższa analiza przyczyn takiego rozrzutu wykazała, że:

- w doświadczeniach serii B wykonanych przy natężeniach przepływu $Q = 0,6; 1,7; 5,0; 10,0; 20,0 \text{ l/s}$ i przy spadkach koryta od 0 do 104,08‰ wartości n dla danego Q zmniejszały się wraz ze wzrostem spadku hydraulicznego;
- w doświadczeniach serii C wykonanych przy $Q = 24,0; 49,0; 95,0 \text{ l/s}$ i

przy spadkach wzrastających wartości n dla danego Q zmniejszały się wtedy, gdy spadek wzrastał;

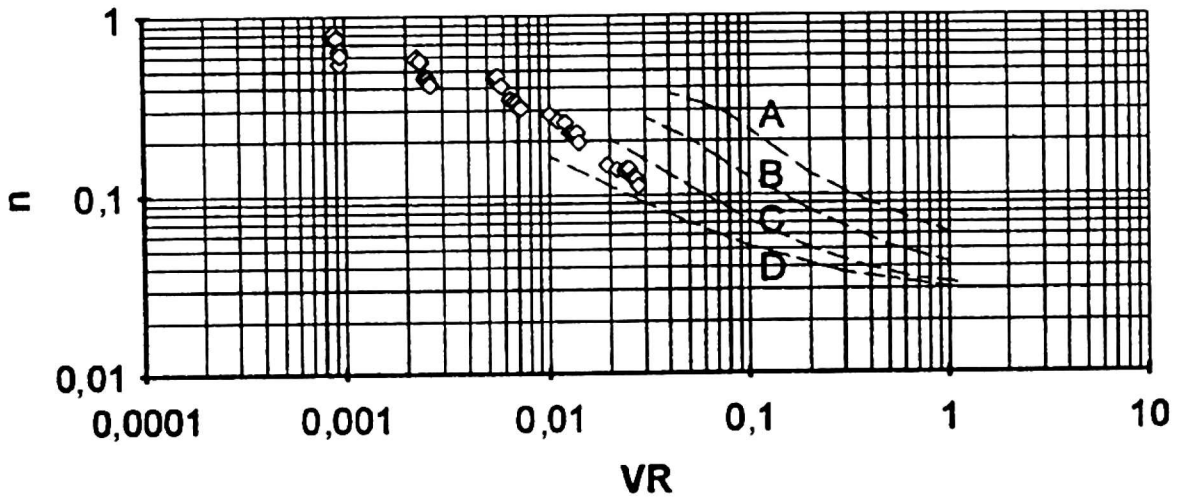
- w doświadczeniach serii H wykonanych przy $Q = 10,0$ i $20,0 \text{ l/s}$ wartości n wzrastały wtedy, gdy wzrastał spadek koryta.

Przyczyna odwrotnej tendencji zmian n , w przypadku serii H w porównaniu do serii B i C, nie jest jeszcze ustalona i wymaga odrębnych analiz. Większość doświadczeń przeprowadzono przy spadkach $J < 100‰$, a tylko 5 – w serii B, 2 – w serii C i 1 – w serii H przy spadkach nieznacznie przekraczających 100‰.

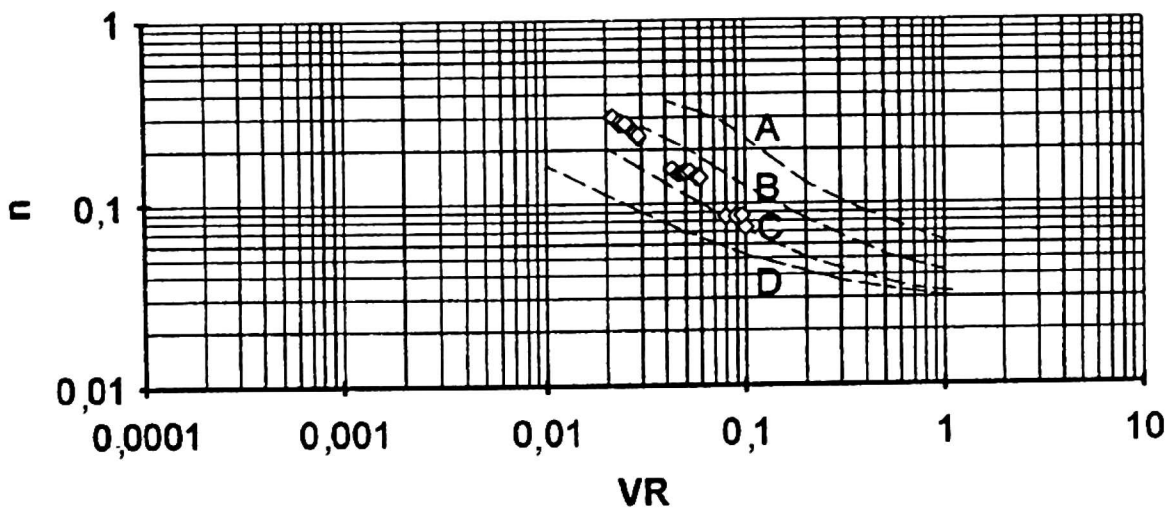
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki doświadczeń serii G i F wykonanych w okresie od 17.10 do 1.12.1994 roku. Runi traw w obu doświadczeniach miała prawie identyczne właściwości: wysokość traw średnio – 29–30 cm, największe – 37–39 cm, zadarnienie – około 70–75%, a liczba łodyg – 6000–6500 na 1 km^2 . W składzie gatunkowym największy udział miały: życica trwała – 40–44%, wiechlina łąkowa – około 15%, tymotka i kostrzewa czerwona – po około 10%. Doświadczenia w tych seriach prowadzono przy stałym spadku i zmieniających się natężeniach przepływu. Punkty z doświadczeń, przedstawione w układzie współrzędnych $n-VR$, układają się wzdłuż krzywych, przy czym krzywej położonej wyżej odpowiada większy spadek koryta (seria F), a krzywej leżącej niżej – mniejszy spadek (seria G).

Układ punktów uzyskanych ze wszystkich serii doświadczeń przedstawiony na tle krzywych Ree i Palmera (rys. 4) wykazuje, że:

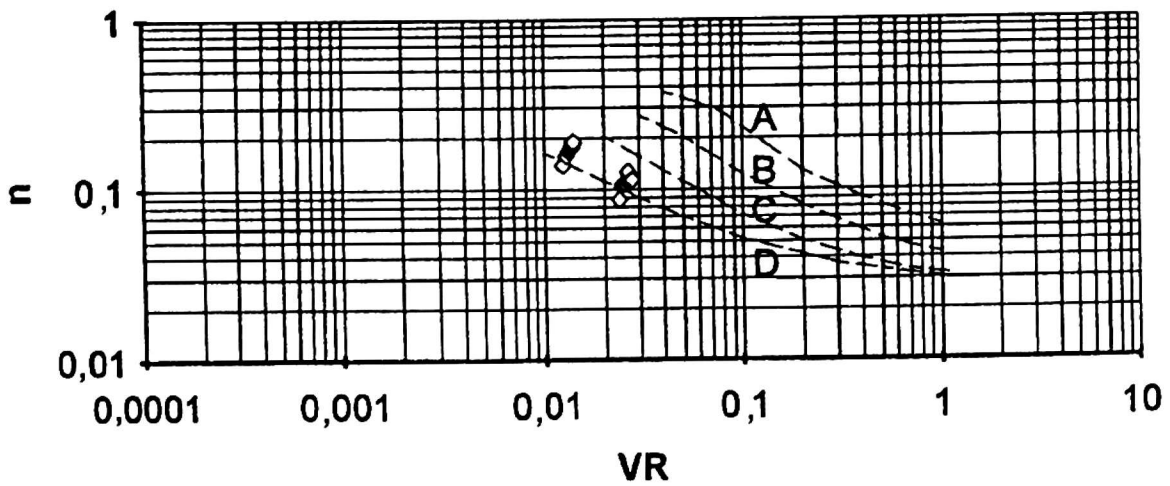
Seria B



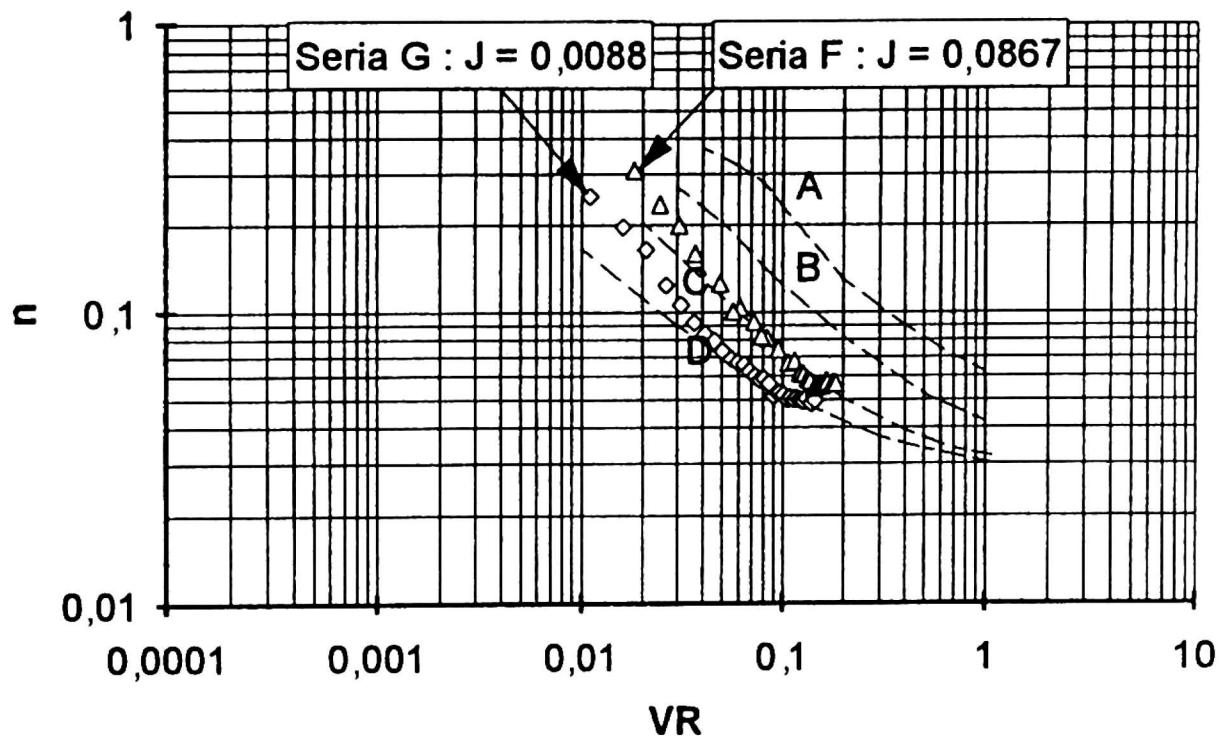
Seria C



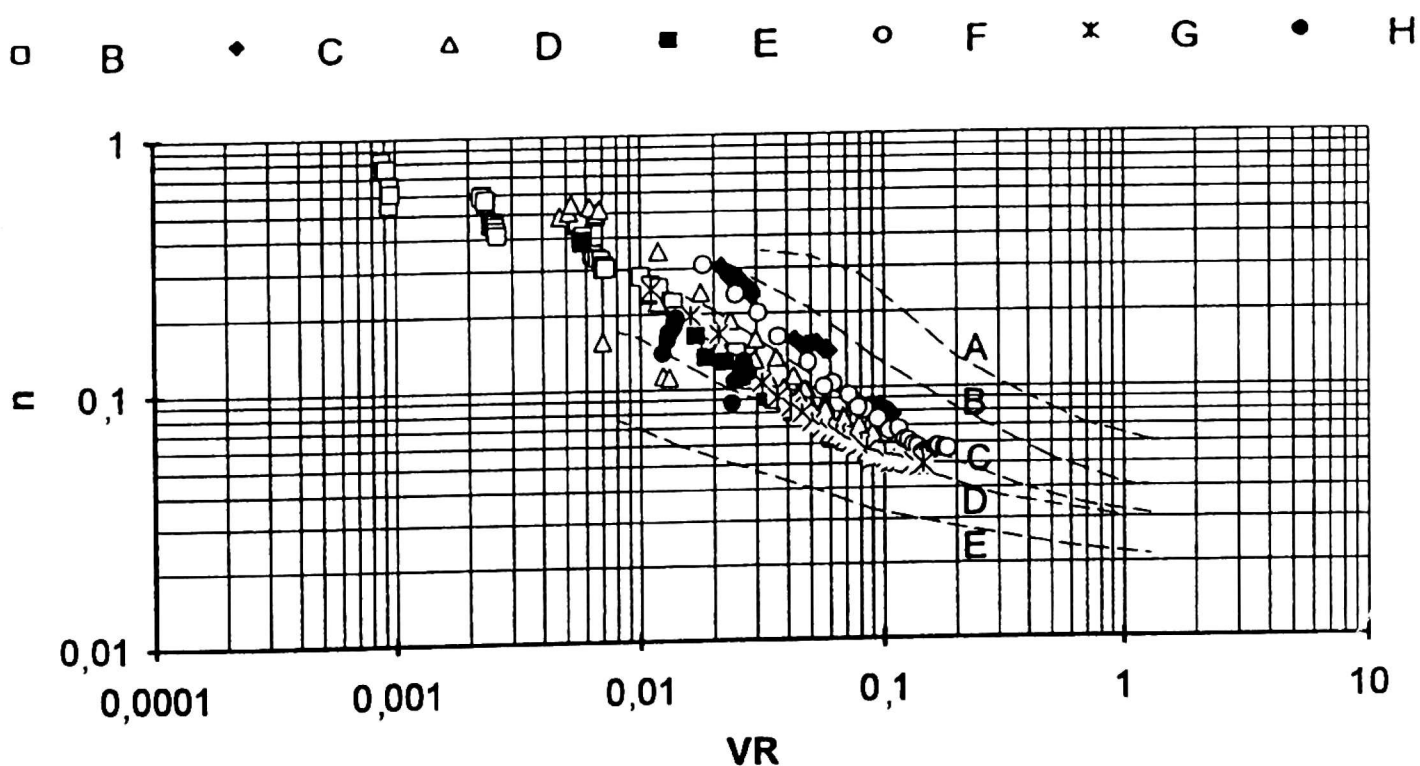
Seria H



Rys. 2. Związek n - VR według badań własnych



Rys. 3. Związki n - VR dla serii G i F według doświadczeń własnych



Rys. 4. Wyniki wszystkich serii doświadczeń własnych na tle krzywych Ree i Palmera

- większość punktów z doświadczeń własnych mieści się między krzywymi B i D;
- w strefie małych wartości iloczynu VR układy punktów nie wykazują załamania zaznaczonego w przebiegu krzywych D-D (rys. 1);
- w strefie $VR > 0,12 \text{ m}^2/\text{s}$ dla serii F i $VR > 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ dla serii G wartości współczynnika n w doświadczeniach

dążyły do stałej wartości, jednakże większej od zalecanych w opracowaniu Hewletta i in. (1987).

Weryfikacja przedziałów ważności równań Temple'a

W tabeli 4 przedstawiono charakterystykę biometryczną runi traw oraz zakresy iloczynów VR uzyskanych w doświadczeniach własnych serii B, F i G. Dolne ograniczenie stosowalności wzoru (3) wynikające z warunku (4) przedstawia się następująco:

$$(VR)_{\min} = 0,00023 \cdot C_r^{2,5} \quad (8)$$

Obliczone z niego wartości iloczynu $(VR)_{\min}$ dla serii badań B, F i G podano w tabeli 4. Porównując je z wartościami VR uzyskanymi w poszczególnych seriach doświadczeń, można stwierdzić, że:

- dla serii B we wszystkich doświadczeniach iloczyn VR jest mniejszy od $(VR)_{\min}$, a więc wartość n należy wyznaczać ze wzoru (6);
- dla serii F tylko w dwóch doświadczeniach $VR < (VR)_{\min}$, dla pozostałych doświadczeń wartość n należy obliczać wzorem (3);

- dla serii G tylko w czterech doświadczeniach było $VR < (VR)_{\min}$ – dla tych doświadczeń wartość n wyznaczano ze wzoru (6), dla pozostałych doświadczeń $VR > (VR)_{\min}$, a zatem n obliczano ze wzoru (3).

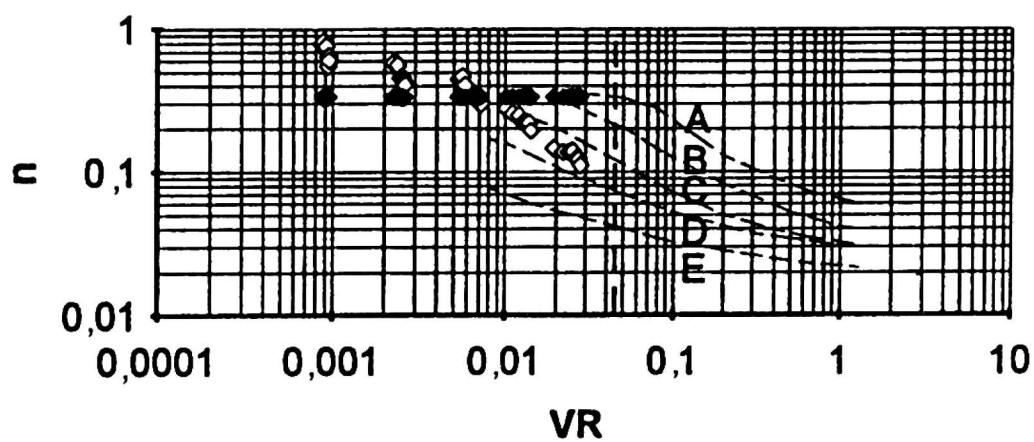
Z porównania wartości współczynników szorstkości n_{obl} (rys. 5) obliczonych wzorami (3) lub (6) z wartościami n_{pom} wyznaczonymi z przekształconego wzoru (1) na podstawie wyników pomiarów w seriach B, F i G wynika, że największe różnice pomiędzy n_{obl} i n_{pom} występują w serii B. W obliczeniach n_{pom} uwzględniono wpływ szorstkości ścian koryta na wartość tego współczynnika. Dla $VR < (VR)_{\min}$ wartości n_{pom} wzrastają wtedy, gdy zmniejsza się wartość iloczynu VR . Dla pomiarów w seriach F i G przy $VR > (VR)_{\min}$ wraz ze wzrostem VR wartości n_{obl} zmniejszają się, a różnice pomiędzy n_{obl} i n_{pom} są znaczne. Wartości n_{obl} dla serii F są większe od wartości z pomiarów n_{pom} – średnio prawie o 60%, natomiast dla serii G n_{obl} są większe od n_{pom} – średnio prawie o 130%.

W przypadku serii F i G na rysunku 5 widoczna jest wyraźna różnica w układzie punktów n_{obl} i n_{pom} dla wartości VR większych od około $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$. W tym

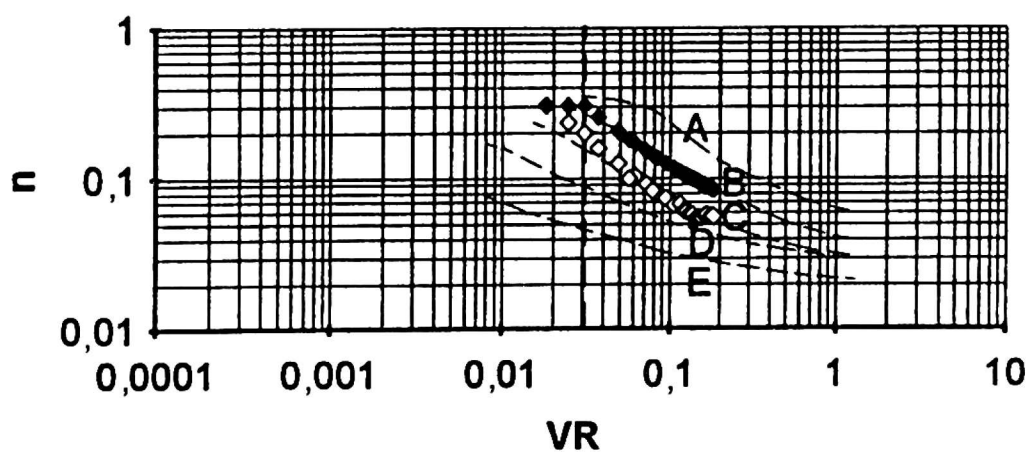
Tabela 4. Charakterystyka runi traw, parametrów hydraulicznych i dolnego ograniczenia stosowalności wzoru Temple'a (3) dla doświadczeń własnych serii B, F i G

Seria doświadczeń	Średnia wysokość traw h_r [m]	Gęstość darniny M [l/m^2]	$(VR)_{\min} = 0,00023 \cdot C_r^{2,5}$ [m^2/s]	Zakres pomiarów VR [m^2/s]
B	0,33	12680	0,0449	0,0009–0,0277
F	0,29	6500	0,0306	0,0182–0,1836
G	0,30	6000	0,0305	0,0110–0,1442

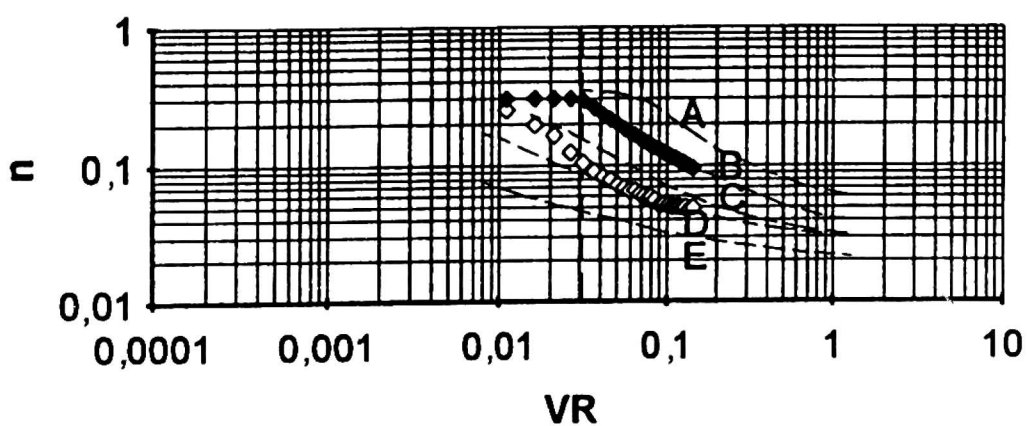
Seria B



Seria F



Seria G



Rys. 5. Porównanie wartości współczynników szorstkości obliczonych (n_{obl}) ze wzorów Temple'a (3) lub (6) i uzyskanych z pomiarów własnych (n_{pom}) dla serii B, F i G

zakresie wartości VR w serii G uzyskano wartości n_{pom} zmienne od 0,049 do 0,052 $m^{-1/3}s$. Jeżeli przyjąć, że dla $VR > 0,1 m^2/s$ wartość współczynnika szorstkości jest stała, to dla tego zakresu ważne jest równanie (7). Podstawiając do niego odpowiadającą serii G wartość C_r ze wzoru (5) równą 7,06, otrzymuje się $n_{obl} = 0,038 m^{-1/3}s$, a więc wartość prawie o 30% mniejszą od n_{pom} uzyskanych serii G.

W przypadku serii F (rys. 5) dla $VR > 0,12 m^2/s$ otrzymane w pomiarach wartości współczynników n_{pom} wzrastają od 0,055 $m^{-1/3}s$ przy $VR \approx 0,12 m^2/s$ do 0,060 $m^{-1/3}s$ przy maksymalnych wartościach VR . Wzrost ten mógł być spowodowany tym, że przy dużych wartościach VR , a więc i przy dużych prędkościach przepływu, wzrastał wpływ ukształtowania powierzchni gleby na opory przepływu.

Wnioski

Przeprowadzone badania przepływu w runi traw łąkowych wykazały, że na przebieg zależności n od VR duży wpływ ma spadek dna koryta. Wartość współczynnika szorstkości n rośnie lub maleje wraz ze wzrostem spadku hydraulicznego przy zbliżonych właściwościach runi traw. Zalecenia Kouwena i in. (1992) oraz Hewletta i in. (1987) odnośnie związków $n-VR$ wymagają uściślenia. Szczególnie duże błędy można popełniać w strefie małych wartości VR . Dla tego obszaru wyniki badań własnych w serii B nie potwierdziły występowania wartości granicznej $(VR)_{min}$, podawanej przez

Temple'a [równanie (8)], przy której współczynnik szorstkości n przyjmuje stałą wartość niezależną od parametrów przepływu. Dla strefy małych wartości VR (jak w przypadku serii B) dotychczas niewiele jest wykonanych badań. Krzywe podane przez Ree i Palmera nie obejmują tej strefy, a ich załamania nie wydają się być uzasadnione.

Wartości współczynników szorstkości n od 0,020 do 0,030 $m^{-1/3}s$, zalecane w obliczeniach dla koryt o dużych spadkach, wydają się być zaniżone. Stwierdzono też, że stabilizacja wartości n występowała przy iloczynie VR dużo mniejszym od wartości granicznej $VR = 3,3 m^2/s$ podanej przez Temple'a. Współczynnik n osiągał w pomiarach serii G praktycznie stałą wartość, tzn. $n \approx 0,050 m^{-1/3}s$ przy wartościach VR zmieniających się od 0,1 do 0,14 m^2/s , a w serii F $n \approx 0,057 m^{-1/3}s$ przy wartościach VR w przedziale od 0,12 do 0,18 m^2/s .

Literatura

- DĄBKOWSKI SZ.L. (z zespołem) 1995: *Badania szorstkości hydraulicznej i odporności powierzchni trawiastych na ruch wody*. Raport końcowy z realizacji projektu KBN nr 5708 92 03. SGGW, Warszawa.
- DĄBKOWSKI SZ.L., PACHUTA K. 1995: *Badania przepływu wody w runi traw*. Mat. Seminarium "Hydrauliczne i ekologiczne problemy inżynierii rzecznej". SGGW, Warszawa.
- HEWLETT H.W.M., BOORMAN L.A. BRAMLEY M.E. 1987: *Design of Reinforced Grass Waterways*. CIRIA, Report 116, London.
- KOUWEN N. 1992: *Modern Approach to Design of Grassed Channels*. J. of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 118. No 5.
- NAZARUK M., KIERUZAL M., PIEKUT K., MIHALAK A. 1990: *Dobór gatunków i odmian traw do mieszanek pastwiskowych o różnico-*

wanym okresie uzyskiwania dojrzałości pastwiskowej, częstotliwości użytkowania i intensywności nawożenia. Maszynopis, Katedra Przyrodniczych Podstaw Melioracji SGGW, Warszawa.

REE W.O., PALMER V.J. 1949: *Flow of water in channels protected by vegetative linings*. US Dept. of Agriculture, Technical Bulletin 967.

REE W.O., CROW F.R. 1977: *Friction factors for vegetated waterways of small slope*. USDA ARS-S-151.

TEMPLE D.M., ROBINSON K.M., AHRING R.M., DAVIS A.G. 1987: *Stability Design of Grass-lined Open Channel*. USDA, Agricultural Handbook. No 667.