

doc. dr inż. Pavel Urcikán

Wydział Budownictwa
Politechniki w Bratysławie*

HYDRAULICZNE OBLICZANIE PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH PRACUJĄCYCH POD CIŚNIENIEM

Mieszanina ścieków miejskich i wód opadowych zawiera duże ilości cząstek zwirowo-piaszczystych oraz nierozpuszczalnych substancji mineralnych i organicznych, stanowiących heterogeniczną, polidyspergującą zawiesinę. W praktyce nie uwzględnia się, że ścieki stanowią tego rodzaju mieszaninę wód zużytych i opadowych, lecz obliczenia strat powodowanych tarciem prowadzi się przy użyciu równań dla ruchu cieczy homogenicznych.

Przy niskich prędkościach cząstki fazy stałej sedymentują, tworząc na dnie kanałów warstwę osadu, która przy przepływie ciśnieniowym zmniejsza przekrój kanału, czego wynikiem jest wzrost prędkości, chropowatości hydraulicznej oraz oporu hydraulicznego. Z tego powodu, w powszechnie stosowanych metodach obliczania strat wywołanych tarciem, przyjmuje się wyższe wartości chropowatości niż przy projektowaniu wodociągów.

Przy wyższych prędkościach przepływu niż minimalna prędkość zamulania, osad nie wytrąca się. Straty powodowane tarciem mogą być takie same, lub mniejsze niż w przypadku ruchu czystej wody, ze względu na niektóre, specyficzne własności ścieków. Obliczone straty przy przyjęciu wyższej wartości chropowatości mogą się znacznie różnić od stanu faktycznego. Przy ciśnieniowym przepływie ścieków powstają na skutek tarcia straty, które powoduje nie tylko chropowatość hydrauliczna, ale w znacznym stopniu także warunki hydrauliczne, masa właściwa cząstek stałych, ich wielkość, kształt, stężenie oraz skład granulometryczny ziarn. Chropowatość hydrauliczna ma charakter statyczny. Przez wybór większych, czy mniejszych chropowatości nie da się obiektywnie wyrazić dynamicznych procesów, występujących przy przepływie ścieków.

Charakterystyka osadów

Badania osadów w kanałach ogólnospławnych, przeprowadzone w Bratysławie [10] wykazały, że krzywa granulometryczna osadów ziarnistych zależy od spadku i wielkości kanałów oraz od charakterystyki odwadnianych powierzchni, zwłaszcza przepuszczalnych. Nie biorąc pod

uwagę ziarn większych niż 8 mm, ponieważ występują rzadko, uzyskano 18 krzywych granulometrycznych uziarnienia. Średnia wartość średnicy ziarna z przeciętnej krzywej wynosiła $d=1,18$ mm. Na pozostałych krzywych średnie wartości średnicy ziarna występowały w zakresie $d \in \langle 0,34; 2,94 \text{ mm} \rangle$. Na podstawie analizy matematyczno-statystycznej uzyskanych wartości, ustalono zależność, pozwalającą na obliczenie średniej wartości średnicy ziarna d w kanałach ogólnospławnych:

$$d = 0,00112 + 0,03 i_o^{0,7} - 0,00008 S_k \quad (1)$$

gdzie:

d — oznacza średnią średnicę ziarn, które wraz z mniejszymi stanowią 50% wagi osadu (m),

i_o — spadek dna kanału przed miejscem pobierania próbek ($m \cdot m^{-1}$),

S_k — przekrój kanału (m^2).

Gęstość osadów zmieniała się w zakresie $\rho_e \in \langle 2420; 2640 \text{ kg} \cdot m^{-3} \rangle$, natomiast przeciętna gęstość wynosiła $\rho_p = 2540 \text{ kg} \cdot m^{-3}$.

Zawartość nierozpuszczalnych substancji nieorganicznych zmieniała się w granicach od 87,88% do 98%. Równanie (1) odnosi się do spadku dna kanału $i_o \in \langle 0,35\%; 20\% \rangle$ dla średniej gęstości osadów $\rho_p = 2500 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ i zlewni, w której część terenów przy krawędzi zlewni ma charakter pagórkowaty z większymi spadkami terenu, natomiast centralna część zlewni przechodzi łagodnie w równinny teren. W niektórych miejscach, w okresie deszczów, dopływają do sieci kanalizacyjnej wody z powierzchni sąsiednich, pagórkowatych terenów (winnice), zawierające znaczne ilości piasku oraz pokaźną ilość rumowiska.

Najgrubsze frakcje osadu osadzają się przeważnie w górnych odcinkach sieci kanałów, a w jej dolnych odcinkach o mniejszym nachyleniu dna, średnica ziarenek ma mniejszą wartość.

Opory hydrauliczne przy przepływie ciśnieniowym ścieków o różnym stężeniu cząstek fazy stałej

Pomiary strat powodowanych tarciem [9, 11] prowadzono na eksperymentalnym urządzeniu, zbudowanym w oczyszczalni ścieków w Jurze koło Bratysławy (rys. 1). Stosowano czystą

*) Doc. Ing. Pavel Urcikán, CSC.

Stavebná Fakulta, Slovenská škola technická, 884 20 Bratislava, Radlinského 11, CSSR.

wodę oraz ścieki, do których dodawano osad z dna kanałów ogólnospławnych. Osad ten charakteryzował się średnią wartością średnicy ziarna $d=1,23$ mm. Mediana wartości średnicy cząstek wynosiła $d_{50}=0,75$ mm i $d_{90}=3,0$ mm. Na zakończenie pomiarów użyto wody z zawiesiną o charakterystycznych wartościach (z krzywej uziarnienia) $d=0,37$ mm, $d_{50}=0,3$ mm, $d_{90}=0,75$ mm. Gęstość fazy stałej wynosiła $\rho_s=2540$ kg·m⁻³. Osad dodawano do ścieków w tym celu, aby stwierdzić jaki wpływ ma stężenie fazy stałej na straty spowodowane tarcie. Stężenie fazy stałej zwiększano stopniowo od 0,15 kg·m⁻³ do 30,3 kg·m⁻³.

skutek zmiennej prędkości osadów dennych, poruszających się po wierzchu osadu przez toczenie się, a także na skutek zmiany powierzchni warstwy nieruchomej i wytwarzania się różnych formacji dennych.

2. Heterogeniczne warunki ruchu z okresowo poruszającą się warstwą cząsteczek na dnie kanału, gdy wartości współczynnika oporu liniowego mieszaniny λ_s są większe niż w wypadku ruchu czystej wody ($\lambda_s > \lambda$), przy czym różnica ta nie zawsze jest wyraźna, ze względu na małe stężenie cząstek fazy stałej w ściekach. Obecność minimalnych cząstek fazy stałej wpływa w pewnych, optymalnych warunkach



Rys. 1 Instalacja doświadczalna — widok ogólny

Badania eksperymentalne wykonano na rurowciągach z PCV o średnicach wewnętrznych $D_w=42,13$; 81,13; 96,85; 143,43 oraz 190,13 mm. Wyniki badań prowadzonych na rurowciągach o najmniejszej średnicy ($D_w=42,13$ mm) wykluczono z obliczeń, ze względu na problemy związane z utrzymaniem stałych własności recyrkulowanej mieszaniny, na skutek większej średnicy rurowciągu, łączącego pompę z eksperymentalnym odcinkiem niż średnica odcinka eksperymentalnego.

Zgodnie z wynikami badań eksperymentalnych, przepływ burzliwy ścieków występuje w czterech przypadkach ($D_w=81,13$; 96,85; 143,43; 190,13 mm):

1. Warunki przepływu z nieruchomą warstwą osadu na dnie, gdy wartości współczynnika oporu liniowego mieszaniny λ_s są znacznie większe niż przy przepływie czystej wody ($\lambda_s \gg \lambda$). Prędkości przepływu są mniejsze niż minimalna prędkość zamulania v_z ; dlatego cząstki fazy stałej zaczynają wytwarzać na dnie nieruchomą warstewkę. Zmierzone wartości λ_s , przy pewnym stężeniu cząstek fazy stałej wykazały charakterystyczny duży rozrzut, powstały na

na zmniejszenie się strat hydraulicznych. Różnica λ_s i λ wzrasta proporcjonalnie do ilości zwirowo-piaszczystych cząstek o rozmiarach ziarn większych niż 1—1,5 mm. I w tym wypadku obserwowano charakterystyczne zjawisko dużego rozrzutu mierzonych wartości λ_s , w związku z pulsacyjnym ruchem rumowiska dennego.

3. Pseudohomogeniczne warunki ruchu ścieków, gdy cząstki fazy stałej poruszają się przeważnie uniesione, a na dnie kanału porusza się niewielka ilość dennego rumowiska przez ciągle przesuwanie się lub toczenie. Wartości współczynnika oporu liniowego mieszaniny λ_s są identyczne jak przy przepływie czystej wody ($\lambda_s = \lambda$).

4. Warunki ruchu mieszaniny ścieków, gdy opór hydrauliczny jest mniejszy niż przy przepływie czystej wody ($\lambda_s < \lambda$), wzrost stężenia cząstek fazy stałej, zwłaszcza małych o kształcie włókienek oraz drobnozdyspergowanych cząstek pochodzenia organicznego, o średnicy mniejszej niż 0,5—1,0 mm, których gęstość jest podobna do gęstości transportowanej cieczy powoduje zwiększenie się lepkości zawie-

siny i redukuje wytwarzanie się wirów. Największe zmniejszenie strat, spowodowanych tarcieniem osiąga się przy pewnym optymalnym stężeniu małych cząstek, ich wielkości i zakresie liczby Reynoldsa [8]. Odwrotnie, większe cząstki niż 0,5–1 mm, zwłaszcza żwirowopiaszczyste mogą sedimentować na dnie i wytwarzać formacje powodujące wzrost strat na skutek tarcia. Na zmniejszenie strat hydraulicznych ma wpływ obecność niektórych tęsydów i polisacharydów (prawdopodobnie także detergentów) w ściekach, a także wytwarzanie się osadu śluzowego na ścianach przewodów, co zmniejsza chropowatość i tłumia uderzenia cząsteczek ścieków o ściany rurociągów. Z tego powodu dochodzi do zwiększenia się warstwy laminarnej, a zatem do redukcji energii burzliwej i oporu hydraulicznego. Grubość powłoki śluzowatej jest zmienna i zależy od charakteru ścieków, a częściowo także od prędkości przepływu. Przy wyższych prędkościach zauważono cieńsze warstwy śluzu. Grubsza warstwa śluzu niż 3–4 mm, ma już ujemny wpływ i powoduje zwiększenie się strat hydra-

ulicznych [2]. Jest rzeczą ogólnie znaną, że poważne zmniejszenie strat hydraulicznych można osiągnąć przez wprowadzenie do strumienia ścieków makromolekularnych linearnych polimerów.

Na rysunku 2 podano pomierzone wartości λ przy ciśnieniowym przepływie czystej wody i wartości λ_s przy ciśnieniowym przepływie ścieków o różnym stężeniu substancji nierozpuszczalnych, przeważnie pochodzenia nieorganicznego, w zależności od Re i Re_s na podstawie pomiarów [9] na rurociągu z PCV o średnicy $D_w=143,43$ mm na eksperymentalnym urządzeniu w Jurze koło Bratysławy.

Stężenie nierozpuszczalnych, nieorganicznych cząsteczek zmieniało się w zakresie $c \leq 0,34$; $10,57 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Gęstość fazy stałej wynosiła $\rho_p=2540 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, a reprezentowały ją cząstki, które przeszły przez siatkę o wymiarze oczek $d < 1,0 \text{ mm}$ ($d_{50}=0,3 \text{ mm}$, $d_{90}=0,75 \text{ mm}$, $d=0,37 \text{ mm}$)

Dla przypadków wymienionych w punktach 1 i 2 do obliczeń strat hydraulicznych spowodowanych tarcieniem zastosowano ogólne równanie, którego używa się przy obliczeniach ruchu mieszanin heterogenicznych:

$$i_s = i + \Delta i \quad (1)$$

gdzie:

Δi — specyficzna, dopełniająca wysokość strat, która wiąże się z hydrotransportem cząstek stałych ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)

i_s — wysokość strat mieszaniny ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)

i — wysokość strat transportowanej cieczy ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$)

Jeżeli wartości strat i , i_s i Δi wyrazić przy pomocy równania Darcy'ego — Weisbacha, a prędkość przepływu mieszaniny i jej gęstość uważać za równe prędkości przepływu i gęstości transportowanej cieczy (ze względu na niskie stężenie cząstek stałych, tzn. $v_s=v$ i $\rho_s=\rho$, równanie (2) można napisać następująco:

$$\lambda_s = \lambda + \Delta \lambda \quad (3)$$

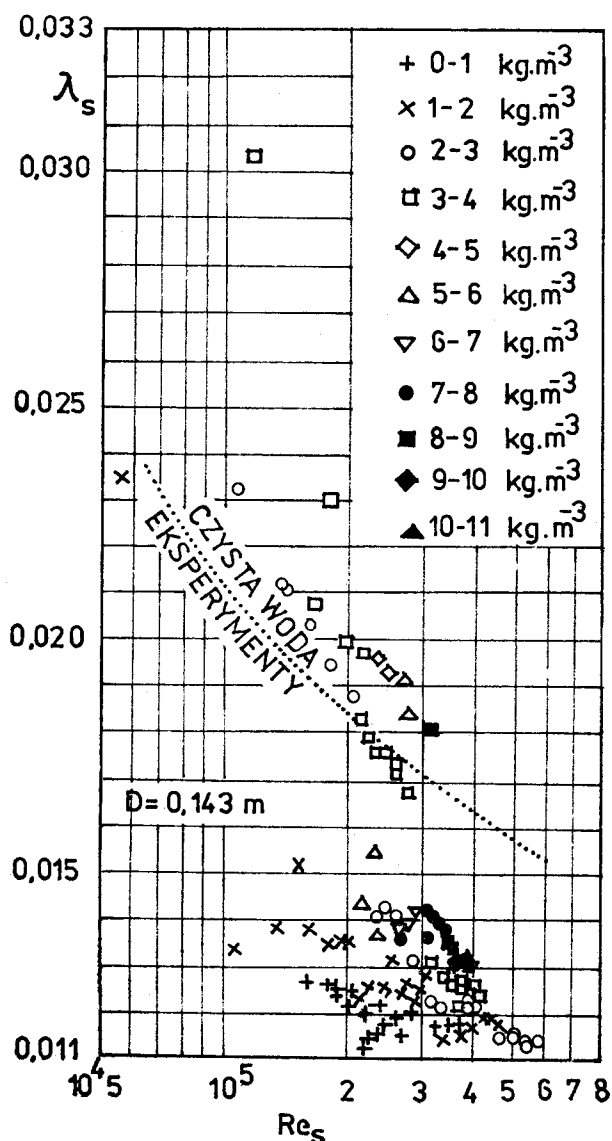
gdzie:

$\Delta \lambda$ — oznacza współczynnik dopełniający, uwzględniający dodatkowy opór przy przepływie mieszaniny, w porównaniu z czystą wodą.

W ciągu ubiegłych 30 lat wykonano w Anglii [1], w Związku Radzieckim [6], w Stanach Zjednoczonych i w Polsce [4] stosunkowo obszerne badania, co do określenia wartości współczynnika oporu liniowego λ przy przepływie czystej wody oraz λ_s przy przepływie ścieków, aplikując je do kanałów ściekowych. Przy obliczeniach strat spowodowanych tarcieniem przy przepływie ścieków, zaczęto pod koniec lat pięćdziesiątych stosować równania odnoszące się do całej strefy ruchu burzliwego.

Wymienione równania mają ogólną logarytmiczną postać:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -m \log \left[\frac{A}{Re^x} + B \left(\frac{k}{D_w} \right)^y \right] \quad (4)$$



Rys. 2 Zależność wartości współczynnika oporu λ_s od liczby Reynoldsa dla różnych gęstości fazy stałej

Ackers [1] poleca używanie ogólnej postaci równania w opracowaniu Colebrooka—White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,715 D_h} \right) \quad (5)$$

gdzie:

D_h (m) oznacza zastępczą średnicę hydrauliczną

$D_h = 4R$; R — oznacza promień hydrauliczny całkowicie wypełnionego przewodu (dla przekroju kołowego o średnicy D_w : $D_h = D_w$).

Uwikłana postać równania (5) jest niewygodna do obliczeń, toteż literatura fachowa zaleca różne równania aproksymacyjne w prostszej postaci, jak np. równanie El-Abdalla [5].

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{6,524}{\text{Re}^{0,908}} + \frac{k}{3,715 D_w} \right) \quad (6)$$

Fjodorov [6] podaje następujące parametry równania ogólnego (4): $m=2,0$; $x=y=1,0$; A — stała zależna od rodzaju materiału rury; $B=3,42^{-1}$; $D_w=D_h$; $\text{Re}=\text{Re}_s$, gdzie Re_s jest liczbą Reynoldsa mieszaniny ścieków, przy obliczaniu której wartość lepkości kinematycznej mieszaniny ν_s należy przyjmować uwzględniając jej temperaturę i stężenie substancji nierozpuszczalnych.

Podobnie, mając na uwadze równanie (3), przystosowano ogólne równanie (4).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_s}} = -m \log \left[a_1 + \frac{A}{\text{Re}_s^x} + B \left(\frac{k}{D_w} \right)^y \right] \quad (7)$$

Do równania (7) wprowadzono parametr $a_1 = f(\Delta\lambda)$, który wyraża wpływ fazy stałej zawartej w ściekach na opór hydrauliczny. Na podstawie badań eksperymentalnych przepływu sedymentujących mieszanin, można napisać ogólną zależność dla parametru a_1

$$a_1 = F_1(\varrho, \varrho_p, \varrho_s, \mu_s, g, w, d, v, D_w) \quad (8)$$

gdzie:

ϱ, ϱ_p i ϱ_s — gęstość transportowanej cieczy, fazy stałej i mieszaniny ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

D_w i d — średnica przewodu i średnia średnica cząstek stałych (m)

v i w — prędkość przepływu i prędkość sedymentacji cząstek stałych ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

μ_s — lepkość dynamiczną mieszaniny ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

g — przyspieszenie ziemskie ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Przy pomocy „twierdzenia π ”, według metody analizy wymiarowej Buckinghama, dla równania (8) z dziewięcioma zmiennymi niezależnymi ($n=9$), których jednostki można określić przy pomocy trzech podstawowych jednostek miar kg , m , s ($r=3$), należy napisać sześć bezwymiarowych ($n-r=6$), niezależnych od siebie parametrów:

$$\pi_1 = \frac{\varrho_s - \varrho}{\varrho_p - \varrho} = \frac{c}{\varrho_p} = c_v$$

$$\pi_2 = \frac{\varrho_p - \varrho}{\varrho}$$

$$\pi_3 = \frac{D_w v \varrho_s}{\mu_s} = \text{Re}_s$$

$$\pi_4 = \frac{d}{D_w}$$

$$\pi_5 = \frac{v}{\sqrt{g D_w}} = \text{Fr} \quad (9)$$

$$\pi_6 = \frac{w}{\sqrt{g d}} = \text{Fr}_d$$

gdzie:

c — stężenie cząstek stałych ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

c_v — stężenie objętościowe cząstek stałych ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)

Fr i Fr_d — liczba Frouda mieszaniny i średnicy charakterystycznej cząstek stałych.

Można więc napisać ogólną zależność dla parametru a_1 :

$$a_1 = F_2 \left(c_v, \frac{\varrho_p - \varrho}{\varrho}, \text{Re}_s, \frac{d}{D_w}, \text{Fr}, \text{Fr}_d \right) \quad (10)$$

Wzrost strat spowodowanych tarcie przy ciśnieniowym przepływie mieszaniny ścieków i wód deszczowych przejawia się głównie w strefie przejściowej, w której na wielkość strat ma wpływ liczba Reynoldsa mieszaniny Re_s , oraz względna wielkość średniej średnicy ziarna cząstek $d \cdot D_w^{-1}$.

Dla danej mieszaniny charakterystyczne jest stosunkowo małe stężenie cząstek fazy stałej ($c < 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) natomiast wpływ ciężaru i liczby Fr można w tym wypadku pominąć. Wymiary charakterystycznego, przeciętnego ziarna składnika stałego przenoszonego w mieszaninie ścieków i wód deszczowych d , zmieniają się tylko nieznacznie, dlatego w dalszym matematycznym opracowaniu danych eksperymentalnych można wpływ liczby Fr_d także pominąć.

W wyniku małej gęstości cząsteczek pochodzenia organicznego, która zbliża się do gęstości transportowanej cieczy, a także ze względu na ich stosunkowo małe stężenie, można nie brać pod uwagę ich wpływu na zwiększenie się oporu hydraulicznego. Na wzrost oporu hydraulicznego wpływa zwłaszcza obecność większych zwirowo-piaszczystych cząstek o gęstości $\varrho_p = 2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, zatem w równaniu (10) przyjęto $\varrho_p = \text{const.}$, wpływ czynnika $(\varrho_p - \varrho) \cdot \varrho^{-1}$ pominięto, a parametr c_v zastąpiono parametrem c .

Zatem ogólne równanie (10) możemy teraz zapisać:

$$a_1 = F_3 \left(c, \text{Re}_s, \frac{d}{D_w} \right) \quad (11)$$

W celu matematyczno-statystycznej analizy wartości parametru a_1 z równania (11), obliczono a_1 na podstawie eksperymentalnie pomierzonych przez Korabiewa wartości λ_s [7] dla różnych stężeń cząstek stałych w przewodach azbestowo-cementowych, oraz na podstawie danych eksperymentalnych pomierzonych w Jurze w przewodach z PCV [9], przy pomocy ogólnej postaci równania (7) z parametrami Colebrooka—White'a:

$$a_1 = 10 \left(- \frac{0,5}{\sqrt{\lambda_s}} \right) - \frac{2,51}{\text{Re}_s \sqrt{\lambda_s}} - \frac{k}{3,715 D_w} \quad (12)$$

Wartości chropowatości hydraulicznej k do równania (12) obliczono na podstawie pomierzonych wartości λ przy przepływie czystej wody za pomocą przekształconego wzoru Colebrooka-White'a:

$$k = 3,715 D_w \left(10^{\frac{0,5}{\sqrt{\lambda}}} - \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (13)$$

Na podstawie tak obliczonych wartości parametru a_1 metodą regresji wielokrotnej ustalono zależność do obliczania parametru a_1 :

$$a_1 = \frac{510 c^{0,667}}{(Re_s - 5000)^{1,25}} - 0,194 \left(\frac{d}{0,05 + D_w} \right)^{1,55} \quad (14)$$

gdzie:

c — przedstawia stężenie ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) cząstek żwirowo-piaszczystych oraz substancji nieorganicznych, nierozpuszczalnych o gęstości $\rho_p = 2500 - 2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Wymiary charakterystycznej średnicy ziarna d zmieniają się tylko nieznacznie.

Z tego powodu badania wykonywano ze stałą charakterystyką fazy stałej, w przybliżeniu o przeciętnej krzywej uziarnienia [10] z wartością średniej średnicy ziarna $d = 1,23 \text{ mm}$ ($d = \text{const.}$). Po wstawieniu do równania (14) eksperymentalnej wartości średniej średnicy ziarna osadów $d = 0,00123 \text{ m}$, otrzymano zależność:

$$a_1 = \frac{510 c^{0,667}}{(Re_s - 5000)^{1,25}} - \frac{6,0 \cdot 10^{-6}}{(0,05 + D_w)^{1,55}} \quad (15)$$

Liczbę Reynoldsa dla mieszaniny (Re_s) obliczono przy współczynniku lepkości dynamicz-

nej μ_s wyznaczonym z równania (16), opisującego zależność μ_s od stężenia objętościowego (c_{jv}) małych cząstek o średnicy mniejszej niż $0,05 \text{ mm}$ [12]:

$$\mu_s = \mu [1 + 0,41 (c_{jv})^{0,38}] \quad (16)$$

Ogólna postać równania (7) do obliczania współczynnika oporu liniowego mieszaniny ścieków λ_s przy uwzględnieniu parametrów Colebrooka-White'a jest następująca:

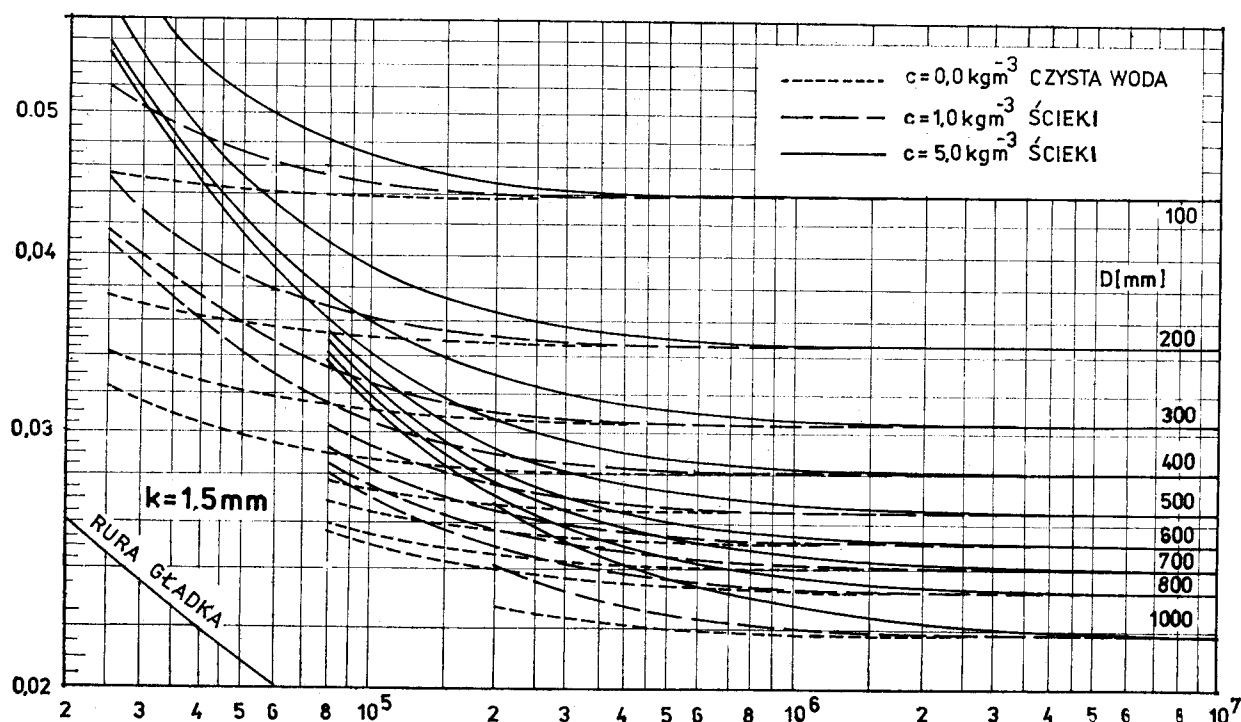
$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_s}} = -2 \log \left(a_1 + \frac{2,51}{Re_s \sqrt{\lambda_s}} + \frac{k}{3,715 D_w} \right) \quad (17)$$

lub w uproszczonej postaci rozszerzonego równania (6):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_s}} = -2 \log \left(a_1 + \frac{6,524}{Re_s^{0,908}} + \frac{k}{3,715 D_w} \right) \quad (18)$$

Równania (17) lub (18) można stosować przy obliczeniach ciśnieniowego przepływu w przewodach poziomych mieszaniny ścieków i wód deszczowych o stężeniu cząstek fazy stałej $c \leq 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, dla ziarn o maksymalnej średnicy $d < 8,0 \text{ mm}$, średniej średnicy ziarn $d = 1,0 - 1,5 \text{ mm}$, których gęstość $\rho_p = 2500 - 2650 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Wartość parametru a_1 obliczoną przy pomocy równania (15) podstawiamy do równania (17) lub (18) tylko w przypadku, gdy $a_1 > 0$, natomiast gdy obliczona wartość parametru a_1 jest ujemna, przyjmujemy $a_1 = 0$; ruch odbywa się wówczas w warunkach pseudohomogenicznych ($\lambda_s = \lambda$) a równanie (17) przechodzi w klasyczną postać równania Colebrooka-White'a.

Na rys. 3 podano nomogram $\lambda_s - Re_s$ do określania wartości λ_s przy przepływie ciśnieniowym



Rys. 3 Zależność wartości współczynnika oporu λ_s od liczby Reynoldsa dla rurociągów o różnych średnicach

ścieków i wód deszczowych w zależności od liczby Reynoldsa mieszaniny Re_s , dla przewodów o średnicach $D_w = 100\text{--}1000$ mm przy stężeniu cząstek fazy stałej $0 \leq c \leq 5,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, dla najczęściej stosowanej wartości chropowatości hydraulicznej $k = 1,5 \text{ mm}$.

Dla przewodów o innej chropowatości hydraulicznej można użyć znanego nomogramu Moody'ego używając zamiast parametru chropowatości względnej $k \cdot D_w^{-1}$ tzw. fikcyjnej chropowatości $(k \cdot D_w^{-1})_f$, którą obliczamy przy pomocy równania:

$$(k \cdot D_w^{-1})_f = 3,715 a_1 + k \cdot D_w^{-1} \quad (19)$$

Problem projektowania przewodów ciśnieniowych jest skomplikowany, zwłaszcza ze względu na niestabilność przepływu ścieków i wód deszczowych, co wpływa na zmienność stężenia substancji nierozpuszczalnych i cząstek zwirowo-piaszczystych w ściekach a zwłaszcza w wodach deszczowych oraz w wyniku różnych rozkładów granulometrycznych uziarnienia cząstek zwirowo-piaszczystych w poszczególnych miejscach i odcinkach sieci przewodów odprowadzających ścieki, a także ze względu na różne warunki lokalne.

Na podstawie opublikowanych danych o zanieczyszczeniu wód deszczowych, można dla przeciętnych warunków zalecać wykonywanie obliczeń dla stężeń fazy stałej $c = 2,0\text{--}5,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Niektóre źródła podają niższe wartości stężeń substancji nierozpuszczalnych, ponieważ próbki były pobierane w strumieniach różnej wielkości, a małe strumienie mają niską zdolność transportu. Niekiedy próbki pobierano w pobliżu zwierciadła ścieków, a tego rodzaju próbki nie są reprezentatywne, gdyż nie mogą się do nich dostać cząstki poruszające się przeważnie w dolnej części kanału ściekowego, w pobliżu dna. W niektórych przypadkach, np. dla wód deszczowych, dopływających z powierzchni terenów niezurbanizowanych, można przyjąć $c = 6,0\text{--}10,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Przyjmowana wartość stężenia substancji nierozpuszczalnych c zależy też od warunków działania ciśnieniowego systemu transportu ścieków. Przy stopniowym włączaniu i wyłączaniu pomp, w wyniku zmiennego dopływu ścieków do pompowni, może nastąpić znaczne obniżenie prędkości przepływu ścieków w rurociągach ciśnieniowych, aż do minimalnej prędkości zamulającej v_z . Rurociąg zostaje zamulony, a opory hydra-

uliczne mogą znacznie wzrosnąć. Wyższe, uwzględniane w projektowaniu stężenia c , w których bierze się pod uwagę także warunki działania systemu, można uważać za stężenia robocze (eksploatacyjne). Przy projektowaniu rurociągów ciśnieniowych dla ścieków bytowo-gospodarczych w rozdzielczym systemie kanalizacji, można zalecać robocze stężenia substancji nierozpuszczalnych $c = 3,0\text{--}5,0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Autor będzie wdzięczny specjalistom posiadającym doświadczenia w działaniu rurociągów ciśnieniowych do odprowadzania ścieków, za podzielenie się z nim swoimi uwagami i doświadczeniem.

LITERATURA

1. P. ACKERS: The hydraulic resistance of drainage conduits. Institut of Civil Eng., Proceedings, vol. 19, July, 1961.
2. P. ACKERS, M. CRICKMOORE, I.D.W. HOLMES: Effects of use on the hydraulic resistance of drainage conduits. Institut of Civil Eng. vol. 28, July, 1964.
3. B.A. ASKEROV, J.A. BUEVIČ J.M. RASIZADE: O zmene režimu prúdenia a zmenšovani hydraulického odporu pri pridávaní častíc do prúdacej väzkej kvapaliny. Izv. AN ZSRR, Mechanika kvapalin a plynov, č. 4, 1968.
4. P. BŁASZCZYK: Opory przepływu ścieków w zamkniętych kanałach ściekowych. Wodociągi i kanalizacja 3, Warszawa, Arkady 1973.
5. M. EL-ABDALLA: Príspevok k výpočtu tlakových strát trením v potrubí. Vod. hospod., 28, č. 9, 1973.
6. N. F. FJODOROV: Novyje issledovania i gidravličeskie rasčety kanalizacionnyh setej. Leningrad, Strojizdat, 1964.
7. A. I. KORABLEV: Gidravličeskie soprotivlenja azbesto-cementnyh trub pri napornom dviženii čistoj i stočnoj vody. Kand. diz. práca, LISI, Leningrad, 1965.
8. P. URČIKÁN: Hydraulické straty pri tlakovom prúdení mestských odpadových vod. Fak. výsk. úloha 24/72. Stav. fakulta SVŠT, Bratislava, 1974.
9. P. URČIKÁN: Výskum hydraulických parametrov kanalizačného potrubia z PCV. Výsk. úloha S-R-30-K 115. Stav. fakulta SVŠT, Bratislava, 1979.
10. P. URČIKÁN, D. RUSNÁK, M. KRIŠŤÁK: Matematicko-štatistická analýza fyzikálnych ukazovateľov sedimentov z jednotnej stokovej sústavy. Vodohosp. čas. 27, 1979, č. 4.
11. P. URČIKÁN. Výskum tlakových strát trením na potrubíach z PCV. Vodohosp. čas., 28, 1980, č. 1.
12. P. URČIKÁN, G. GAVENČIAKOVÁ: Viskozimetrické štúdium suspenzie odpadových vod. Vodohosp. čas., 32, 1984, č. 3.