

Andrzej Wartalski, Jerzy Wartalski

Projektowanie hydrauliczne rurociągów z tworzyw sztucznych

W artykule podano zasady obliczeń hydraulicznych rurociągów z tworzyw sztucznych. Artykuł zawiera:

– reguły hydrauliczne i wzory opisujące przepływ wody i ścieków w rurociągach,

– przykład nomogramu (wykres wiążący średnice, natężenia przepływów, jednostkowe spadki hydrauliczne i średnie prędkości przepływu) opracowanego wg tych wzorów, dla wybranych średnic wewnętrznych i ustalonych chropowatości wewnętrznych ścianek rur, dla całkowitych wypełnień rur,

– krzywe sprawności dla przekroju kołowego w odniesieniu do przepływu, prędkości, pola powierzchni i promienia hydraulicznego,

– przykład nomogramu ujmującego na jednym wykresie związki pomiędzy średnicami, natężeniami przepływów, jednostkowymi spadkami hydraulicznymi i średnimi prędkościami przepływu dla dowolnie wypełnionych rur (bez konieczności korzystania z krzywych sprawności),

– zasady określania minimalnych spadków rur kanalizacyjnych,
– przepustowość ścianek perforowanych rur drenarskich,
– przykłady rozwiązań różnych zadań inżynierskich.

Obliczenia hydrauliczne przewodów

Rurociągi wypełnione całkowicie

Opory przepływu na długości rurociągu oblicza się na podstawie jednostkowego spadku ciśnienia, który dla rurociągu zamkniętego o kołowym przekroju poprzecznym określa się ze wzoru Darcy-Weisbacha:

$$i = \lambda \frac{1}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

gdzie:

i – jednostkowy spadek ciśnienia

λ – współczynnik oporu hydraulicznego

d – wewnętrzna średnica rurociągu, m

v – średnia prędkość przepływu, m/s

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²

Średnia prędkość przepływu (v) obliczana jest z równania ciągłości przepływu:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (2)$$

gdzie:

Q – natężenie przepływu przy całkowitym wypełnieniu przewodu, m³/s

Praktycznie w rurociągach występuje ruch burzliwy (ruch laminarny występuje przy $v < 0,0303$ m/s w rurach o średnicy wewnętrznej 100 mm i przy $v < 0,0029$ m/s w rurach o średnicy wewnętrznej 1050 mm; tak małe prędkości przepływu praktycznie nie występują). Spośród różnych stref ruchu burzliwego w praktyce występuje strefa przejściowa pomiędzy rurami hydraulicznie gładkimi i rurami z chropowatością zupełną (strefa rur z chropowatością zupełną, zwana też strefą kwadratowej proporcjonalności, występuje przy $v > 7,48$ m/s w rurach o średnicy wewnętrznej 100 mm i przy $v > 9,86$ m/s w rurach o średnicy wewnętrznej 1050 mm; tak duże prędkości przepływu praktycznie nie występują).

Do obliczania współczynnika oporu hydraulicznego w strefie przejściowej stosuje się wzór Colebrooka-White'a:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d} \right) \quad (3)$$

gdzie:

k – chropowatość bezwzględna wewnętrznych ścian rury, m
 Re – liczba Reynoldsa wyrażona wzorem:

$$Re = \frac{v d}{\nu} \quad (4)$$

gdzie:

ν – współczynnik kinetyczny lepkości wody (ścieków), m²/s (dla temperatury 10 °C $\nu = 1,308 \cdot 10^{-6}$ m²/s)

Po odpowiednich przekształceniach i połączeniu wzorów (1)+(4) otrzymuje się wzór:

$$Q = -6,958 \log \left(\frac{0,741}{10^6 d \sqrt{di}} + \frac{k}{3,710d} \right) d^2 \sqrt{di} \quad (5)$$

Zalecane przez większość producentów rur z tworzyw sztucznych wartości chropowatości bezwzględnych wewnętrznych ścian rur są następujące:

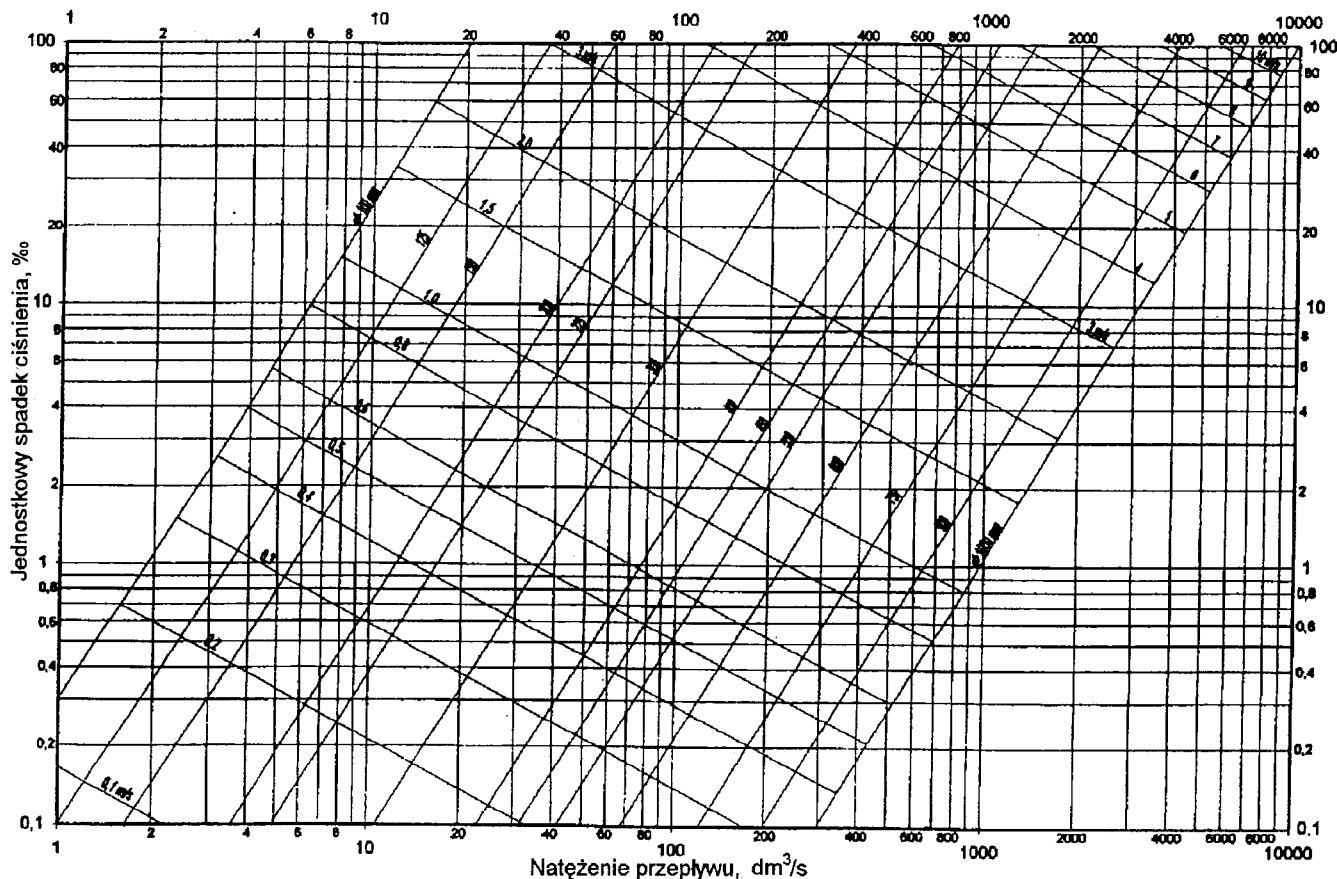
– dla wody $k=0,05$ mm,

– dla ścieków z małą zawartością wleczonych osadów mineralnych (np. ścieki bytowo-gospodarcze i przemysłowe) $k=0,25$ mm,

– dla ścieków z dużą zawartością wleczonych osadów mineralnych (np. ścieki deszczowe) $k=0,40$ mm.

Z uwagi na skomplikowaną postać wzoru (5), opracowuje się nomogramy dla całkowicie wypełnionych rur o produkowanych średnicach wewnętrznych, wykonane na podstawie tego wzoru, dla różnych wartości chropowatości bezwzględnych wewnętrznych ścian rur i (najczęściej) temperatury 10 °C. Biorąc pod uwagę dokładność i czytelność nomogramów ogranicza się zakres natężeń i prędkości przepływu oraz jednostkowych spadków ciśnienia do praktycznie spotykanych wartości.

Przykładowy nomogram tego typu, opracowany przez autorów niniejszego artykułu, dla chropowatości wewnętrznych ścian rur $k=0,40$ mm i wybranych średnic wewnętrznych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Nomogram do obliczeń hydraulicznych całkowicie wypełnionych kanałów kołowych, dla temperatury 10 °C i chropowatości 0,40 mm, do wzorów Darcy-Weisbacha i Colebrooka-White'a

Przykład I

Określenie maksymalnej przepustowości rurociągu o średnicy wewnętrznej 750 mm. Przepływ odbywać się będzie grawitacyjnie, z całkowitym wypełnieniem rurociągu (linia ciśnienia pokrywać się będzie z wewnętrznym sklepieniem rury). Jednostkowy spadek dna rurociągu wynosił będzie 2‰. Rurociąg przeznaczony jest dla ścieków deszczowych ($k=0,40$ mm).

Na nomogramie (dla $k=0,40$ mm) oznaczono punkt przecięcia linii poziomej, oznaczającej jednostkowy spadek ciśnienia 2‰, z linią ukośną, oznaczającą średnicę wewnętrzną rury o średnicy 750 mm. Linia pionowa poprowadzona przez ten punkt określiła przepustowość rurociągu na około 570 dm³/s, zaś linia ukośna poprowadzona przez ten punkt równoległe do linii jednakowych prędkości określiła średnią prędkość przepływu na około 1,3 m/s (dla powyższego natężenia przepływu).

Przykład II

Określenie niezbędnego jednostkowego spadku dna rurociągu o średnicy wewnętrznej 500 mm dla uzyskania przepustowości 250 dm³/s ($k=0,40$ mm). Przepływ odbywać się będzie grawitacyjnie z całkowitym wypełnieniem rurociągu (linia ciśnienia pokrywać się będzie z wewnętrznym sklepieniem rury).

Na nomogramie (dla $k=0,40$ mm) oznaczono punkt przecięcia linii pionowej, oznaczającej natężenie przepływu 250 dm³/s, z linią ukośną, oznaczającą średnicę wewnętrzną rury 500 mm. Linia pozioma poprowadzona przez ten punkt określiła niezbędny jednostkowy spadek ciśnienia

(jednostkowy spadek dna rurociągu) na około 3,2‰, zaś linia ukośna poprowadzona przez ten punkt równoległe do linii jednakowych prędkości określiła średnią prędkość przepływu na około 1,3 m/s (dla powyższego natężenia przepływu).

Przykład III

Określenie niezbędnej średnicy wewnętrznej rurociągu, umożliwiającej uzyskanie przepustowości 170 dm³/s ścieków deszczowych ($k=0,40$ mm). Jednostkowy spadek dna rurociągu wynosił będzie 5‰. Przepływ odbywać się będzie grawitacyjnie z co najwyżej całkowitym wypełnieniem rurociągu (linia ciśnienia nie może leżeć wyżej niż wewnętrzne sklepienie rury).

Na nomogramie (dla $k=0,40$ mm) oznaczono punkt przecięcia linii pionowej, oznaczającej natężenie przepływu 170 dm³/s, z linią poziomą, oznaczającą jednostkowy spadek ciśnienia 5‰. Linia ukośna poprowadzona przez ten punkt równoległe do linii jednakowych średnic określiła średnicę na około 395 mm. Aby uzyskać bezciśnieniowy przepływ ścieków należy użyć rur o średnicy wewnętrznej 400 mm.

Przykład IV

Określenie maksymalnej przepustowości rurociągu o średnicy wewnętrznej 225 mm. Przepływ odbywać się będzie grawitacyjnie z całkowitym wypełnieniem rurociągu (linia ciśnienia pokrywać się będzie z wewnętrznym sklepieniem rury). Jednostkowy spadek dna rurociągu wynosił będzie 250‰. Rurociąg przeznaczony jest dla ścieków deszczowych ($k=0,40$ mm).

Ponieważ nomogram sporządzono dla jednostkowych spadków ciśnienia do 100‰, dlatego też nie można z niego skorzystać. Przepustowość obliczona ze wzoru (5) wynosi $Q=0,276284 \text{ m}^3/\text{s}$ ($276,284 \text{ dm}^3/\text{s}$), natomiast prędkość przepływu obliczona ze wzoru (2) wynosi $v=6,948 \text{ m/s}$.

Przykład V

Określenie niezbędnego jednostkowego spadku dna rurociągu o średnicy wewnętrznej 300 mm dla uzyskania przepustowości $430 \text{ dm}^3/\text{s}$ ścieków deszczowych ($k=0,40 \text{ mm}$). Przepływ odbywać się będzie grawitacyjnie z całkowitym wypełnieniem rurociągu (linia ciśnienia pokrywać się będzie z wewnętrznym sklepieniem rury).

Nomogram nie obejmuje punktu przecięcia linii pionowej, oznaczającej natężenie przepływu $430 \text{ dm}^3/\text{s}$, z linią ukośną, oznaczającą średnicę wewnętrzną rury 300 mm, nie można więc z niego skorzystać. Jednostkowy spadek ciśnienia obliczono więc z równania powstałego ze wzoru (5), rozwiązując iteracyjnie to równanie:

$$Q + 6,958 \log \left(\frac{0,741}{10^6 d \sqrt{di}} + \frac{k}{3,710 d} \right) d^2 \sqrt{di} = 0 \quad (6)$$

Obliczony jednostkowy spadek ciśnienia (dna rurociągu) wynosić powinien co najmniej 0,133650, tzn. 133,650‰.

Rurociągi wypełnione częściowo

Zależność pomiędzy polem przekroju poprzecznego strumienia cieczy przy częściowych wypełnieniach rur i polem przekroju poprzecznego całych rur określa się z zależności geometrycznych dla koła:

$$\eta f = \frac{f_r}{f_c} = \frac{1}{2\pi} \left[2\arccos \left(1 - 2\frac{h}{d} \right) - \sin \left(2\arccos \left(1 - 2\frac{h}{d} \right) \right) \right] \quad (7)$$

gdzie:

f_r – pole przekroju poprzecznego strumienia cieczy przy częściowym wypełnieniu rury, m^2

f_c – pole przekroju poprzecznego rury, m^2

h – wypełnienie rury, m

Zależność pomiędzy promieniem hydraulicznym przy częściowych wypełnieniach rur i promieniem hydraulicznym całych rur określa się z zależności geometrycznych dla koła:

$$\eta Rh = \frac{Rh_r}{Rh_c} = 1 - \frac{\sin \left[2\arccos \left(1 - 2\frac{h}{d} \right) \right]}{2\arccos \left(1 - 2\frac{h}{d} \right)} \quad (8)$$

gdzie:

Rh_r – promień hydrauliczny przy częściowym wypełnieniu rury, m

Rh_c – promień hydrauliczny całej rury, m

Zależność pomiędzy natężeniem przepływu przy częściowych wypełnieniach rur i natężeniem przepływu przy wypełnieniach całkowitych określa formuła Brettinga:

$$\eta Q = \frac{Q_r}{Q_c} = 0,46 - 0,50 \cos \left(\pi \frac{h}{d} \right) + 0,04 \cos \left(2\pi \frac{h}{d} \right) \quad (9)$$

gdzie:

Q_r – natężenie przepływu przy częściowym wypełnieniu rury, m^3/s

Q_c – natężenie przepływu przy całkowitym wypełnieniu rury, m^3/s

Zależność pomiędzy prędkością przepływu przy częściowych wypełnieniach rur i prędkością przepływu przy wypełnieniach całkowitych określa się na podstawie formuły Brettinga (9) i zależności geometrycznych dla koła:

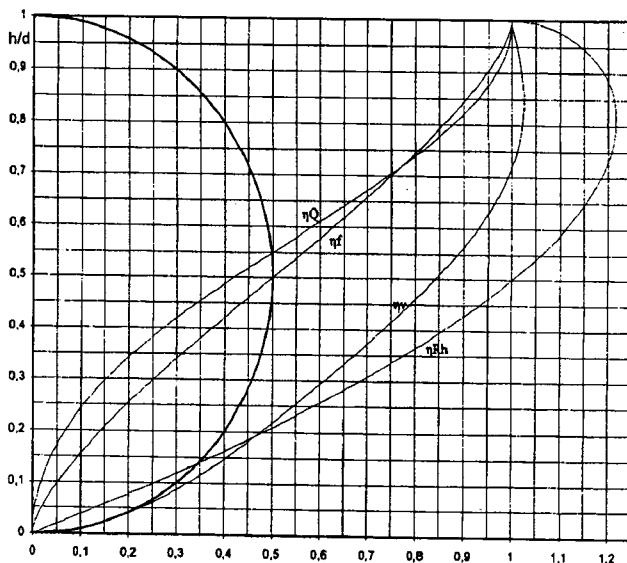
$$\eta v = \frac{v_r}{v_c} = \frac{2\pi \left[0,46 - 0,50 \cos \left(\pi \frac{h}{d} \right) + 0,04 \cos \left(2\pi \frac{h}{d} \right) \right]}{2\arccos \left(1 - 2\frac{h}{d} \right) - \sin \left[2\arccos \left(1 - 2\frac{h}{d} \right) \right]} \quad (10)$$

gdzie:

v_r – średnia prędkość przepływu przy częściowym wypełnieniu rury, m/s

v_c – średnia prędkość przepływu przy całkowitym wypełnieniu rury, m/s

Dla ułatwienia posługiwania się powyższymi zależnościami opracowuje się wykresy funkcji (7)+(10), tzw. krzywe sprawności dla przekroju kołowego. Krzywe sprawności, opracowane przez autorów niniejszego artykułu, przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Krzywe sprawności przekroju kołowego do wzoru Brettinga ($Q=Q_r/Q_c$, $v=v_r/v_c$, $Rh=Rh_r/Rh_c$, $f=f_r/f_c$; indeks r dotyczy częściowego wypełnienia rury (określonego stosunkiem h/d), natomiast indeks c dotyczy całkowitego wypełnienia rury)

Krzywe sprawności muszą być używane łącznie z nomogramami dla rur całkowicie wypełnionych.

Przykład VI

Określenie niezbędnej średnicy wewnętrznej rurociągu, umożliwiającej przeprowadzenie $400 \text{ dm}^3/\text{s}$ ścieków deszczowych ($k=0,40 \text{ mm}$). Jednostkowy spadek dna rurociągu wynosić będzie 2‰. Przepływ odbywać się będzie grawitacyjnie z co najwyżej całkowitym wypełnieniem rurociągu (linia ciśnienia nie może leżeć wyżej niż wewnętrzne sklepienie rury). Określenie parametrów przepływu przy częściowym wypełnieniu rurociągu.

Na nomogramie dla $k=0,40 \text{ mm}$ oznaczono punkt przecięcia linii pionowej oznaczającej natężenie przepływu $Q_r=400 \text{ dm}^3/\text{s}$, z linią poziomą, oznaczającą jednostkowy spadek ciśnienia 2‰. Ukośna linia poprowadzona przez ten punkt równoległa do linii jednakowych średnic określiła średnicę na około 650 mm. Aby uzyskać bezciśnieniowy przepływ ścieków należy użyć rur o średnicy wewnętrznej $d=750 \text{ mm}$.

Następnie na tym samym nomogramie oznaczono punkt przecięcia linii poziomej, oznaczającej jednostkowy spadek ciśnienia 2‰, z linią ukośną, oznaczającą średnicę wewnętrzną 750 mm. Linia pionowa poprowadzona przez ten punkt określiła przepustowość rurociągu (natężenie przepływu przy całkowitym wypełnieniu rurociągu) na $Q_c \approx 570 \text{ dm}^3/\text{s}$,

zaś linia ukośna poprowadzona przez ten punkt równolegle do linii jednakowych prędkości określiła średnią prędkość przepływu przy całkowitym wypełnieniu rurociągu na $v_c \approx 1,30$ m/s (dla natężenia przepływu około $570 \text{ dm}^3/\text{s}$). Obliczono wartość $\eta Q = 400/570 \approx 0,70$. Dla tej wartości ηQ odczytano z krzywej sprawności ηQ wartość h/d wynoszącą około 0,67. Obliczone wypełnienie rurociągu wynosi $h = (h/d) \cdot d \approx 0,67 \cdot 75 \approx 50$ cm. Następnie z krzywych sprawności η_f , η_v i η_{Rh} dla $h/d \approx 0,67$ odczytano następujące wartości: $\eta_f \approx 0,71$, $\eta_v \approx 0,98$ i $\eta_{Rh} \approx 1,1$. Obliczone wartości f_r , v_r i Rh_r wynoszą: $f_r \approx \eta_f \pi d^2/4 \approx 0,71 \cdot 3,14 \cdot 0,75^2/4 \approx 0,31 \text{ m}^2$, $v_r \approx \eta_v \cdot v_c \approx 0,98 \cdot 1,30 \approx 1,28$ m/s i $Rh_r \approx \eta_{Rh} \cdot h \cdot d/4 \approx 1,1 \cdot 0,75/4 \approx 0,21$ m.

Ponieważ korzystanie z krzywych sprawności łącznie z nomogramami dla całkowicie wypełnionych rur jest żmudne, opracowuje się czasami tzw. nomogramy scalone, umożliwiające określenie podstawowych parametrów przepływu (natężenie przepływu, średnia prędkość przepływu, pole przekroju poprzecznego strumienia cieczy i wypełnienie rury) oraz parametrów technicznych (średnica wewnętrzna rury i spadek dna rury) dla przepływów przy częściowych wypełnieniach rur.

Przykładowy nomogram tego typu, opracowany przez autorów niniejszego artykułu dla chropowatości wewnętrznych ścian rur $k=0,40$ mm i wybranych średnic wewnętrznych, przedstawia rysunek 3.

Przykład VII

Określenie niezbędnej średnicy wewnętrznej rurociągu umożliwiającej przeprowadzenie $400 \text{ dm}^3/\text{s}$ ścieków deszczowych ($k=0,40$ mm). Jednostkowy spadek dna rurociągu wynosił będzie 2‰. Przepływ odbywać się będzie grawitacyjnie z co najwyżej całkowitym wypełnieniem rurociągu (linia ciśnienia nie może leżeć wyżej niż wewnętrzne sklepienie rury). Określenie parametrów przepływu przy częściowym wypełnieniu rurociągu.

Na środkowej części nomogramu scalonego (dla częściowo wypełnionych rur, dla $k=0,40$ mm) oznaczono punkt przecięcia linii pionowej, określającej natężenie przepływu $400 \text{ dm}^3/\text{s}$, z linią ukośną, określającą spadek 2‰. Pozioma linia poprowadzona przez ten punkt na prawą część nomogramu (napęnienia dla odczytywania spadków) określiła średnice wewnętrzne rur, które mogą bezciśnieniowo przeprowadzić $400 \text{ dm}^3/\text{s}$ ścieków deszczowych – są to te średnice, dla których pogrubiona część linii pionowej przecina się z linią poziomą (można więc określić również najmniejszą średnicę wewnętrzną rury, która może bezciśnieniowo przeprowadzić $400 \text{ dm}^3/\text{s}$ ścieków deszczowych – jest to średnica 750 mm). Punkt przecięcia tej linii poziomej z linią pionową dla wybranej średnicy wewnętrznej

rury (750 mm) umożliwiła oszacowanie wypełnienia rurociągu na $h \approx 50$ cm (punkt ten leży przy linii jednakowych napęnień 50 cm). Następnie na lewej części nomogramu (napęnienia dla odczytywania prędkości) oznaczono punkt przecięcia linii pionowej, oznaczającej średnicę 750 mm, z linią jednakowych napęnień 50 cm. Pozioma linia poprowadzona przez ten punkt na środkową część nomogramu określiła punkt jej przecięcia z linią pionową, oznaczającą natężenie przepływu $400 \text{ dm}^3/\text{s}$. Ten punkt umożliwił oszacowanie średniej prędkości przepływu na $v \approx 1,30$ m/s (punkt ten leży przy linii jednakowych prędkości 1,30 m/s). Punkt przecięcia tej linii poziomej z linią pionową, ograniczającą z lewej strony środkową część nomogramu, określił pole przekroju poprzecznego strumienia ścieków (ok. $0,30 \text{ m}^2$).

Minimalne spadki kanałów

Rurociągi transportujące ścieki (kanały ściekowe) powinny prowadzić je z odpowiednio dużą przydenną prędkością przepływu, zwaną prędkością samooczyszczającą. Taka prędkość zapewnia – w czasie dużych (nominalnych) natężeń przepływu ścieków – zarówno transport osadów włączonych po dnie rurociągów, jak i rozmywanie i transport tych osadów, które zaległy na dnie rurociągu w czasie mniejszych niż nominalne natężeń przepływu ścieków. Transport osadów odbywa się oczywiście w kierunku przepływu ścieków. Prędkość samooczyszczająca można zapewnić, według zdania większości producentów rur z tworzyw sztucznych, jeżeli opór tarcia (wyrażony stycznymi naprężeniami ścinającymi pomiędzy ścianką rury i ściekami) – odpowiedzialny za transport osadów po dnie kanału – będzie większy niż $\tau_{\min} = 0,150 \text{ kg/m}^2$ dla ścieków deszczowych oraz większy niż $\tau_{\min} = 0,225 \text{ kg/m}^2$ dla ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych.

Średnie styczne naprężenie ścinające występujące pomiędzy ścianką rury i ściekami określa się ze wzoru:

$$\tau = \gamma Rh_i \quad (11)$$

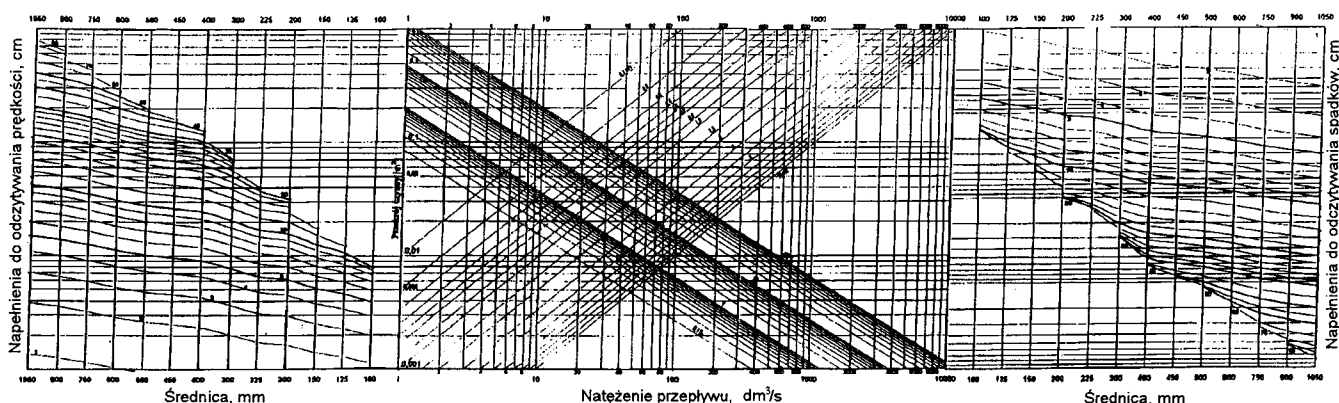
gdzie:

τ – średnie styczne naprężenie ścinające pomiędzy ścianką rury i ściekami, kg/m^2

γ – ciężar właściwy ścieków, kg/m^3

Na podstawie zależności (11) można określić minimalne spadki hydrauliczne ($i_{\min}$) (spadki den kanałów przy przepływie bezciśnieniowym) zapewniające samooczyszczanie kanałów:

$$i_{\min} = \tau_{\min}/(\gamma Rh) \quad (12)$$



Do powyższego wzoru należy wstawiać wartość promienia hydraulicznego dla wypełnienia rury 60% dla kanalizacji bytowo-gospodarczej i przemysłowej (kanały tej kanalizacji mogą pracować z wypełnieniem co najwyżej 60%) oraz wartość promienia hydraulicznego całego przekroju rury dla kanalizacji deszczowej (kanały tej kanalizacji mogą pracować z całkowitym wypełnieniem). W tabeli 1 zestawiono spadki minimalne dla wybranych średnic wewnętrznych rur kanałów, obliczone na podstawie wzoru (12).

Tabela 1. Spadki minimalne kanałów obliczone na podstawie wzoru (12)

Średnica wewnętrzna mm	Spadek minimalny, ‰	
	kanalizacja bytowo-gospodarcza i przemysłowa	kanalizacja deszczowa
100	8,1	6,0
125	6,5	4,8
150	5,4	4,0
200	4,1	3,0
225	3,6	2,7
300	2,7	2,0
400	2,0	1,5
450	1,8	1,3
500	1,6	1,2
600	1,4	1,0
750	1,1	0,9 (1,0)
900	0,9 (1,0)	0,7 (1,0)
1050	0,8 (1,0)	0,6 (1,0)

Wartości w nawiasach dotyczą zaleceń normy PN-92/B-10735, która dopuszcza tylko wyjątkowo (przy bardzo staranym wykonawstwie) spadki minimalne mniejsze niż 1,0‰.

Przepustowość ścianek perforowanych rur drenarskich

Niekiedy kanalizacja deszczowa pełnić może jednocześnie rolę drenażu. Przepustowość jednego metra bieżącego perforowanej rury drenażowej opisuje wzór:

$$q = \mu f \sqrt{2g\Delta h} \quad (13)$$

gdzie:

q – przepustowość ścianki perforowanej rury drenażowej o długości 1 m, m^3/s

μ – współczynnik wypływu

f – pole powierzchni szczelin perforacji na długości 1 m rury drenażowej, m^2

g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2

Δh – różnica poziomów zwierciadła wody gruntowej przy zewnętrznej ścianie rury drenażowej i zwierciadła wody (ścieków deszczowych) wewnątrz rury, m

Współczynnik wypływu (μ) dla najczęściej wykonywanego typu szczelin perforacji wynosi 0,62. W tabeli 2 zestawiono przykładowe rozmieszczenie, wymiary i powierzchnię szczelin perforacji.

Przykład VIII

Określenie średnicy, spadku dna i zagłębienia rurociągu drenarskiego obniżającego poziom wód gruntowych. Obniżone zwierciadło wód gruntowych przy drenażu położone będzie $H_w = 1,70$ m pod powierzchnią terenu. Dopyw wód gruntowych do drenażu wyniesie $q = 2,10 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}$. Długość rurociągu powyżej rozpatrywanego przekroju $l = 10$ m. Wypełnienie rurociągu nie może przekroczyć 50% wewnętrznej jego średnicy ($h/d \leq 0,50$). Rurociąg powinien być ułożony ze spadkiem minimalnym.

Tabela 2. Rozmieszczenie, wymiary i powierzchnia szczelin perforacji rur drenarskich

Średnica wewnętrzna mm	Liczba		Wymiary szczelin mm		Pole powierzchni szczelin na długości 1 m rury m^2
	szczelin na obwodzie rury	rzędów szczelin na długości 1 m rury	długość	szerokość	
100	4	70	10	1,5	0,0042
150	4	50	10	1,5	0,0030
200	4	40	10	1,5	0,0024
225	8	30	20	2,0	0,0096
300	10	20	20	2,0	0,0080
400	10	30	20	2,0	0,0120

Nateżenie przepływu w rozpatrywanym przekroju poprzecznym rurociągu wyniesie $Q_c = q \cdot l = 2,10 \cdot 10 = 21 \text{ dm}^3/\text{s} = 0,021 \text{ m}^3/\text{s}$. Stosunek nateżenia przepływu przy wypełnieniu $h/d = 0,50$ do nateżenia przepływu przy całkowitym wypełnieniu rurociągu wynosi wg formuły (9) $\eta Q = Q_c / Q = 0,42$. Nateżenie przepływu przy całkowitym wypełnieniu rurociągu wyniesie wówczas $Q_c' = Q_c / \eta Q = 0,021 / 0,42 = 0,050 \text{ m}^3/\text{s}$. Najmniejsza średnica rurociągu (ułożonego ze spadkiem minimalnym), który może przetransportować taką ilość wody wynosi $d = 300$ mm. Minimalny spadek dna rurociągu o takiej średnicy wynosi $i = 2 ‰ = 0,002$. Nateżenie przepływu przy całkowitym wypełnieniu takiego rurociągu wynosi wg wzoru (5) $Q_c = 0,0535 \text{ m}^3/\text{s}$. Obliczona wartość $\eta Q = 0,021 / 0,0535 \approx 0,39$. Dla tej wartości ηQ odczytano z krzywej sprawności ηQ wartość $h/d \approx 0,48$. Obliczone wypełnienie rurociągu wynosi $h = (h/d)d \approx 0,48 \cdot 30 \approx 14$ cm. Różnica poziomów zwierciadła wód gruntowych, przy zewnętrznej ścianie rury drenażowej i zwierciadła wody wewnątrz rury, obliczona na podstawie wzoru (13), wyniesie $\Delta h = q^2 / (2g\mu^2 f^2) = 0,0021^2 / (2 \cdot 9,81 \cdot 0,62^2 \cdot 0,008^2) \approx 0,01$ m. Dno rurociągu drenażowego powinno więc być ułożone na głębokości $H_d = H_w + \Delta h + h = 1,70 + 0,01 + 0,14 = 1,85$ m poniżej poziomu terenu.

LITERATURA

1. W. BŁASZCZYK, H. STAMATELLO, P. BŁASZCZYK: Kanalizacja. Sieci i pompownie. Tom 1. Arkady, Warszawa 1983.
2. K. DĘBSKI: Hydrologia i hydraulika. PWSZ, Kraków 1964.
3. T. GĄBRYSZEWski: Wodociągi. Arkady, Warszawa 1983.
4. T. GRUSZECKI, J. WARTALSKI: Kanalizacja. Materiały pomocnicze do ćwiczeń projektowych. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin 1986.
5. E. W. MIELCARZEwicz: Melioracje terenów miejskich i przemysłowych. Arkady, Warszawa 1971.
6. E. W. MIELCARZEwicz: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę. Arkady, Warszawa 1977.
7. E. W. MIELCARZEwicz, J. WARTALSKI: Modyfikacja metod obliczania układów kanalizacyjnych i ich elementów. Raport Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1980 (praca nie publikowana).
8. E. W. MIELCARZEwicz, J. WARTALSKI: Systemy zaopatrzenia w wodę i usuwania ścieków. Wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
9. Norma PN-92/B-10735. Kanalizacja. Przewody kanalizacyjne. Wymagania i badania przy odbiorze.
10. C. ZAKASZEwski: Melioracje rolne. PWRiL, Warszawa 1956.

On the Hydraulic Design of Plastic Pipes

The hydraulic principles governing the uniform stationary flow of municipal sewage in plastic pipes under subcritical and critical flow conditions are discussed. Presented are nomograms established in two variants: (1) for critical flow conditions, including plots which describe the relationship between critical

and subcritical flow, and (2) for arbitrary flow conditions in sewage pipes. Practical examples of how to use the analytical formulae and the two nomogram variants mentioned are given. Described are also methods of determining the channel slopes and the flow capacity of walls of perforated drainage pipes.