

Kamil POCHWAT
Jacek OPALIŃSKI,
Studenci specjalizacji *Infrastruktura i Ekorozwój*
Politechnika Rzeszowska

Józef DZIOPAK
Katedra Infrastruktury i Ekorozwoju
Politechnika Rzeszowska

ANALIZA HYDRAULICZNA ZWIĘKSZENIA PRZEPUSTOWOŚCI PRZEJŚCIA SYFONOWEGO

Jednym z wielu elementów systemów kanalizacji grawitacyjnej, które podlegają rozbudowie są przejścia syfonowe sytuowane pod dnem rzeki. Zmieniające się z czasem warunki mogą wpływać na przyrost objętości strumienia transportowanych ścieków, co prowadzi do konieczności rozbudowy tych obiektów. Istnieje szereg możliwości indywidualnego podejścia do technicznego rozwiązania przejścia syfonowego przy sporządzaniu koncepcji konkretnego zadania inżynierskiego. W artykule zaprezentowano cztery warianty rozbudowy przejścia syfonowego. Biorąc pod uwagę względy hydrauliczne, inwestycyjne i eksploatacyjne związane z działaniem syfonu, dokonano oceny każdego z nich w różnych aspektach dla umożliwienia wyboru wariantu efektywnego.

1. Wprowadzenie

Systemy kanalizacyjne należą do najdroższych inwestycji infrastruktury sieciowej, a ich rozbudowa wiąże się często z prowadzeniem prac na terenie o gęstej zabudowie lub nie jest możliwa z uwagi na istniejące obiekty infrastruktury miejskiej, które zlokalizowane są na różnych głębokościach. W artykule przedstawiono wariantowe rozwiązania techniczne, które zapewniają przeprowadzenie dodatkowego strumienia objętości ścieków przez istniejące przejście syfonowe. Opracowane koncepcje nie przewidują konieczności kosztownej przebudowy istniejącej budowli, w tym budowy nowego przewodu syfonowego. Przyłączenie nowych osiedli i kolejnych użytkowników do systemu kanalizacji powoduje zwiększanie się strumienia objętości ścieków sanitarnych, transportowanych w systemie kanalizacji rozdzielczej, co wymusza w określonej sytuacji rozbudowę istniejącej infrastruktury podziemnej, wraz z przebudową szeregu jej elementów. Dotyczy to również strategicznych obiektów na sieci, a należą do nich głównie przejścia syfonowe [1,2] i pompownie lub przepompownie ścieków.

Szeroka analiza tej problematyki podczas sporządzania kursowego projektu skłoniła autorów do skupienia szczególnej uwagi na budowach hydrotechnicznych, jakimi są przejścia syfonowe. Zwłaszcza istotne jest ich funkcjonowanie w różnych warunkach lokalnych i hydraulicznych. Taką analizę przeprowadzono, aby określić zakres możliwych wariantów projektowych przy najniższych możliwych nakładach finansowych. Warunkiem projektu modernizacji jest zapewnienie efektywnego działania przejścia syfonowego przy transporcie znacznie większego strumienia objętości ścieków. Zatem zaproponowane w artykule cztery rozwiązania stanowią wynik analizowanych wariantów technicznych przebudowy przejścia syfonowego w projekcie rozbudowy kanalizacji sanitarnej przy przyłączeniu dwóch nowych zlewni o znacznych powierzchniach.

2. Warunki określające wymóg rozbudowy przejścia syfonowego

Sieci kanalizacyjne projektowane są na okres perspektywiczny i z założenia umożliwiają przyjęcie dodatkowego strumienia objętości ścieków. W planach zagospodarowania przestrzennego ustala się kierunki rozwoju miasta, między innymi po to, aby właściwie przewidzieć koncepcję rozbudowy systemu odprowadzenia ścieków. Za okres perspektywiczny korzystne jest przyjmowanie 50 lat i więcej [3], ponieważ pozwala to właściwie przewidywać spodziewany strumień objętości ścieków po to, aby do planowo zmieniających się warunków właściwie dobrać geometrię sieci i obiektów kanalizacyjnych w pełnym okresie użytkowania systemu. Niestety w praktyce zbyt często dzieje się tak, że następuje zmiana kierunku rozwoju zurbanizowanego obszaru zlewni, co wpływa na zmianę bilansu ścieków i rozkładu przepływów w całym systemie kanalizacyjnym. Niektóre elementy kanalizacji jak sieci nie wymagają przeprojektowania, ponieważ zwiększony przepływ strumienia ścieków spowoduje jedynie podniesienie się poziomu ścieków w kanale. W systemie są jednak obiekty współpracujące z systemem kanalizacji, które działają w określonych uwarunkowaniach i z ściśle określonymi ograniczeniami.

Jednymi z nich są przejścia syfonowe, które są projektowane na określony strumień przepływu ścieków [4]. Wymagana prędkość w całkowicie wypełnionym przewodzie ciśnieniowym syfonu ma zapewnić samoczynne splukiwanie transportowanych zanieczyszczeń i bezpośrednio wpływa na sumaryczną wysokość strat hydraulicznych na trasie ich przepływu. Przy badaniu działania syfonu największą rolę przywiązuje się do obliczeń hydraulicznych, ponieważ rzutują one na kształtowanie się poziomów zwierciadła ścieków w studzienkach przed i za syfonem. Przy wzroście strumienia objętości ścieków w syfonie, zwiększa się prędkość przepływu, a wraz z nią suma strat hydraulicznych w kwadracie prędkości. Takie zwiększenie oporów hydraulicznych powoduje przyrost poziomów napełnienia ścieków, ale w większym stopniu w kanale przed syfonem. Wpływają na to dwa

różne czynniki. Pierwszy wynika ze zwiększenia strumienia objętości dopływających ścieków przy tych samych warunkach działania kanałów grawitacyjnych na dopływie i odpływie z komór przejścia syfonowego. Natomiast na drugi czynnik składają się sumaryczne opory hydrauliczne na trasie przepływu ścieków pomiędzy studzienkami, wlotową przed i wylotową za syfonem [5].

Zatem w określonej sytuacji kanał doprowadzający ścieki do syfonu może działać jako ciśnieniowy, czego skutkiem może być zalewanie terenów położonych w jego sąsiedztwie. Takie warunki jego funkcjonowania są niedopuszczalne zwłaszcza w przypadku, gdy jest to odcinek odbierający ścieki z okolicznych zabudowań. Aby uniknąć takiej sytuacji, a jednocześnie sprawdzić możliwości hydrauliczne eksploatowanego przejścia syfonowego, należy ustalić poziom zwierciadła ścieków w kanale dopływowym dla ustalonych warunków krytycznych. W ściśle określonych uwarunkowaniach lokalnych może być wymagana kosztowna rozbudowa istniejącego przejścia syfonowego. Polega ona na budowie dodatkowego przewodu syfonowego, jako uzupełniającego obok już istniejących lub oddzielnej przepompowni do ciśnieniowego transportu określonego strumienia objętości dodatkowych ścieków na drugi brzeg rzeki.

W pracy przedstawiono cztery odmienne warianty przeprowadzenia dodatkowego strumienia objętości ścieków. Godne podkreślenia jest to, że proponowane rozwiązania wykorzystują w pełni możliwości hydrauliczne już istniejącego przejścia syfonowego.

3. Proponowane rozwiązania przejścia syfonowego

W artykule przedstawiono warianty projektowe i warunki działania, jakimi charakteryzują się proponowane rozwiązania przejścia syfonowego. Rozpatrzono cztery odmienne koncepcje, które zapewniają transport strumienia objętości ścieków wyznaczonego w oparciu o aktualnie sporządzony bilans. Przeprowadzono obliczenia hydrauliczne dla każdego z proponowanych układów sieci współdziałającej z syfonem. Na ich podstawie każdorazowo ustalono w nowych, odmiennych uwarunkowaniach wartości parametrów projektowych.

- Wariant 1.** Zastosowanie przepompowni do transportu ciśnieniowego nadmiaru ścieków nad przeszkodą dodatkowym rurociągiem, wykorzystując istniejącą kładkę dla pieszych w konstrukcji mostu.
- Wariant 2.** Transport całego strumienia objętości ścieków w jednym z istniejących przewodów syfonowych (eksploatowany lub rezerwowy), po zainstalowaniu pompy do ciśnieniowego przesyłu ścieków przez wymuszenie zwiększonej prędkości przepływu w jednym przewodzie syfonowym.
- Wariant 3.** Wykorzystanie przewodu awaryjnego do transportu nadmiaru

ścieków. W razie awarii przewodu syfonowego zakłada się wykorzystanie pompy zaprojektowanej jak w Wariancie drugim, przy zapewnieniu sterowania układem zasuw.

Wariant 4. Wykorzystanie przewodu awaryjnego na przeprowadzenie strumienia objętości ścieków, rozdzielanego przez dodatkowo zaprojektowany przelew, który powinien zapewnić jego podział w równym stosunku na obydwie przewody. Na wypadek wystąpienia awarii zaprojektowano i dobrano pompę na parametry, podobnie jak w Wariancie drugim.

4. Układy hydraulicznego działania przewodu syfonowego

4.1. Transport dodatkowego strumienia objętości ścieków nowym rurociągiem ciśnieniowym

Do transportu ciśnieniowego ścieków przewidziano przewód usytuowany nad przeszkodą i podwieszony pod istniejącą kładką. Przewód ten wykonany ze szczelnych rur PE-HD umieszczono w stalowej rurze osłonowej, która zabezpiecza go przed uszkodzeniami mechanicznymi. Przewidziano włączenie pompy dopiero po osiągnięciu ustalonego poziomu ścieków w komorze wlotowej (rys. 1). Położenie kosza ssawnego pompy zostanie wyznaczone na podstawie obliczeń tak, aby pompa działała okresowo i przepompowywała jedynie nadmiar ścieków. Zatem tylko nadmiar ścieków zostanie przetransportowany ciśnieniowo rurociągiem dzięki właściwie dobranej pompie i odpowiedniemu ustawieniu wysokościowym kosza ssawnego na ustalone parametry eksploatacyjne. Wylot rury ciśnieniowej znajdzie się w komorze końcowej istniejącego przejścia syfonowego i na takiej wysokości h nad poziomem ścieków, aby zapewniał normalną eksploatację komory końcowej przejścia syfonowego. To rozwiązanie przekształci komorę wlotową przejścia syfonowego w komorę przepompowni ścieków.

4.2. Transport ciśnieniowy całego strumienia objętości ścieków istniejącym przewodem syfonowym

Wariant ten obejmuje zaprojektowanie i dobranie pompy na takie parametry, aby zapewnić przeprowadzenie całego strumienia objętości dopływających ścieków (istniejących i dodatkowych) przez jeden przewód w wyniku zwiększenia prędkości przepływu ścieków w istniejącym syfonowym przewodzie ciśnieniowym. Zatem nie ma istotnego znaczenia to, w jakim stopniu zwiększy się suma strat hydraulicznych, ponieważ przed syfonem połączenie przewodu z pompą będzie szczelne. W tym wariancie nie występuje problem działania kanału dopływowego pod ciśnieniem. Pompa zostanie zainstalowana w oddzielnym pomieszczeniu przy komorze wlotowej. Przewiduje się montaż dodatkowej instalacji, która podczas wystąpienia awarii zapewni przełączenie króćca

wylotowego pompy pomiędzy istniejącym przewodem syfonowym i przewodem awaryjnym syfonu. Rozwiązanie to przedstawiono na rysunku 2.

4.3. Transport dodatkowego strumienia objętości ścieków przewodem awaryjnym z użyciem pompy na warunki awaryjne

W tym wariancie przewiduje się wykorzystanie istniejącego przewodu awaryjnego do transportu nadmiaru ścieków (dodatkowy strumień objętości ścieków). Natomiast w razie awarii przewodu syfonowego zostanie wykorzystana pompa zaprojektowana jak w Wariancie 2., przy odpowiednim sterowaniu układem zasuw (rys. 3). W zaproponowanej koncepcji dokonano rozdziału ścieków dopływających do komory początkowej syfonu. W studni wlotowej zaprojektowano przelew boczny, rozdzielający ścieki na przepływ projektowany i na dodatkowy strumień objętości ścieków. Ideą tego wariantu jest wykorzystanie istniejącego awaryjnego przewodu syfonowego do odprowadzenia dodatkowego strumienia objętości ścieków. W przypadku awarii jednego z dwóch istniejących przewodów, ścieki zostaną przeprowadzone w sposób wymuszony jednym sprawnym przewodem za pomocą odpowiednio dobranej pompy, jak to już opisano w Wariancie 2. Pompa będzie działać jedynie podczas awarii i na czas potrzebny do usunięcia uszkodzenia. Zastosowanie tego wariantu napotyka na pewne ograniczenia wynikające z konieczności zachowania wymaganej minimalnej prędkości przepływu ścieków w przewodzie syfonowym. Rozpatrywany przypadek należy stosować, gdy wprowadzany dodatkowy strumień objętości ścieków do przewodu awaryjnego uzyska minimalną wymaganą prędkość. Gdy warunek na minimalną prędkość nie zostanie spełniony, należy zastosować czwarty wariant, którego schemat działania przedstawiono na rysunku 4.

4.4. Transport dodatkowego strumienia objętości ścieków przewodem awaryjnym z użyciem przelewu i pompy na warunki awaryjne

Wariant ten, podobny do przedstawionego w punkcie 4.3, jest uzasadniony w przypadku, gdy do komory początkowej przejścia syfonowego dopływa dodatkowy strumień objętości ścieków, który nie uzyska minimalnej prędkości w przewodzie syfonowym wymaganej do samooczyszczenia. Nowym elementem jest tutaj zastosowanie specjalnej konstrukcji krawędzi przelewowej, dzięki której nastąpi rozdział ścieków na dwa równe strumienie do obu przewodów syfonowych. Analizując Warianty 3. i 4. można określić warunki, które zadecydują o wyborze jednego z nich. Włączając dodatkowy strumień objętości ścieków należy sprawdzić warunek na minimalną wymaganą prędkość przepływu, która zapewni prawidłowe funkcjonowanie syfonu. Jeżeli ta zostanie zachowana, należy zastosować Wariant 3. Natomiast, gdy prędkość będzie zbyt mała, należy zastosować Wariant 4., w którym cały ustalony w nowym bilansie strumień objętości ścieków zostaje rozdzielony proporcjonalnie na dwa przewody. To rozwiązanie zapewnia prędkość w syfonie mniejszą od prędkości, na którą

syfon był projektowany, jednak jest większa niż wymagana minimalna. Efektem takiego rozdziału będzie uzyskanie prędkości przepływu, która zapewni właściwe działanie syfonu i wpłynie pozytywnie na zmniejszenie ogólnych strat hydraulicznych w syfonie, co doprowadzi do obniżenia poziomu ścieków w komorze początkowej. Rozwiązanie według proponowanego Wariantu 4. przedstawiono na rysunku 4.

5. Obliczenia hydrauliczne przejścia syfonowego

Istniejące przejście syfonowe zaprojektowano i wykonano w oparciu o dane i ustalone w obliczeniach wartości parametrów projektowych i realizacyjnych.

1. Aktualny przepływ ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych przez przejście syfonowe $Q_{SN} = 300 \text{ dm}^3/\text{s}$.
2. Pierwotny przepływ ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych przez przejście syfonowe $Q_S = 200 \text{ dm}^3/\text{s}$.
3. Nadwyżka ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych $Q_N = 100 \text{ dm}^3/\text{s}$.
4. Długość istniejącego przewodu syfonowego $L_S = 100,00 \text{ m}$.
5. Średnica wewnętrzna istniejącego przewodu syfonowego $K_S = 384 \text{ mm}$ (średnica zewnętrzna $450 \times 33,1 \text{ mm}$).
6. Spadki kanałów – dopływowego i odpływowego $I_K = 2,9\text{‰}$.
7. Średnice istniejących kanałów – wlotowego i wylotowego $K = 600 \text{ mm}$.
8. Prędkość przepływu ścieków w kanałach – dopływowym i odpływowym $V_K = 1,59 \text{ m/s}$.
9. Napełnienie w kanałach – dopływowym i odpływowym $h_K = 0,38 \text{ m}$.

Z aktualnego bilansu ścieków wynika, że do przejścia syfonowego dopływa $200 \text{ dm}^3/\text{s}$, i dodatkowo należy przeprowadzić przez istniejący syfon $100 \text{ dm}^3/\text{s}$ ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych.

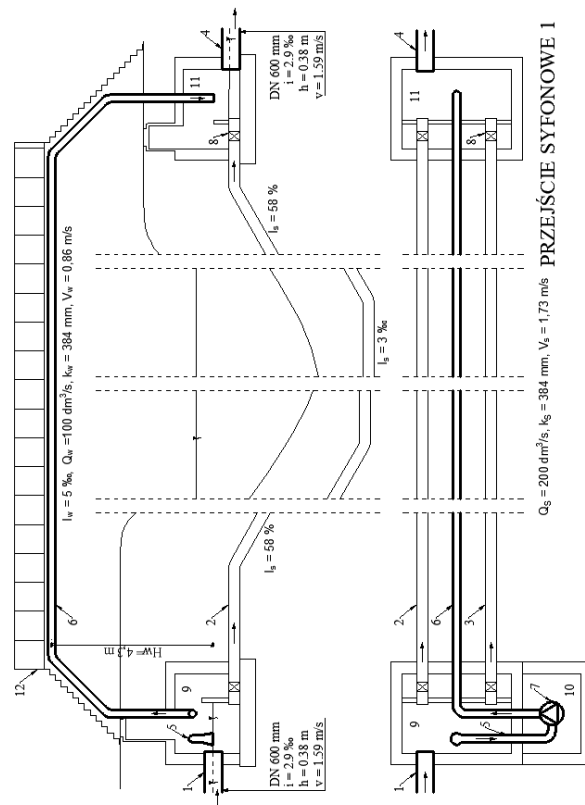
5.1 Transport kanałem uzupełniającym ciśnieniowym

W celu przetransportowania dodatkowego strumienia objętości ścieków, w pierwszym wariantcie przewidziano zastosowanie rurociągu uzupełniającego, który w sposób wymuszony zapewni przepływ ścieków nad rzeką. Wymiary elementów obiektu przedstawiono na rysunku 1. Założenia wyjściowe do zwymiarowania przepompowni ścieków pozostają jak w punkcie 5.

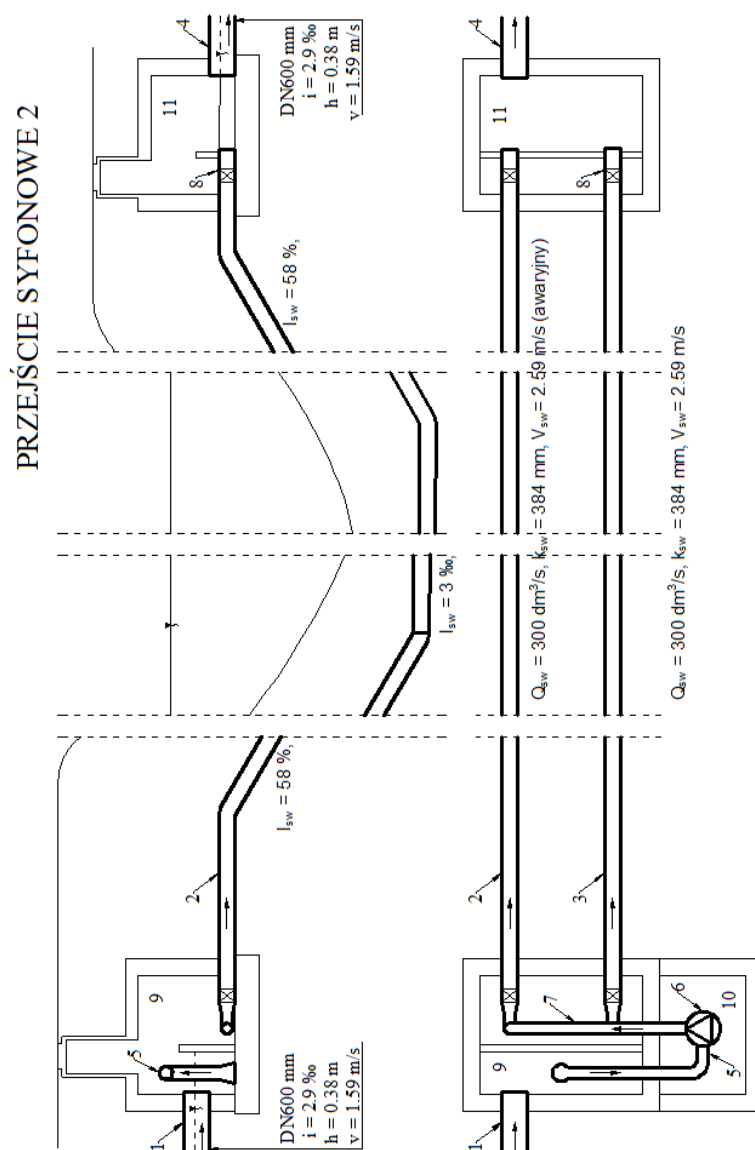
1. Ustalona geometryczna wysokość podnoszenia pompy $H_w = 4,3 \text{ m}$ (rys. 1.).
2. Suma strat hydraulicznych podczas ciśnieniowego przepływu ścieków przez nowy projektowany przewód $\Delta h = 0,30 \text{ m}$ ($L = 91,7 \text{ m}$, $k = 0,1 \text{ mm}$).
3. Wyznaczona suma strat hydraulicznych i wysokości geometrycznej wynosi $H_p = 4,60 \text{ m}$.

Dla ustalonego przepływu $Q = 100 \text{ dm}^3/\text{s}$ oraz wymaganej wysokości podnoszenia pompy $H_p = 4,60 \text{ m}$, dobrano pompę z montażem na sucho o parametrach eksploatacyjnych:

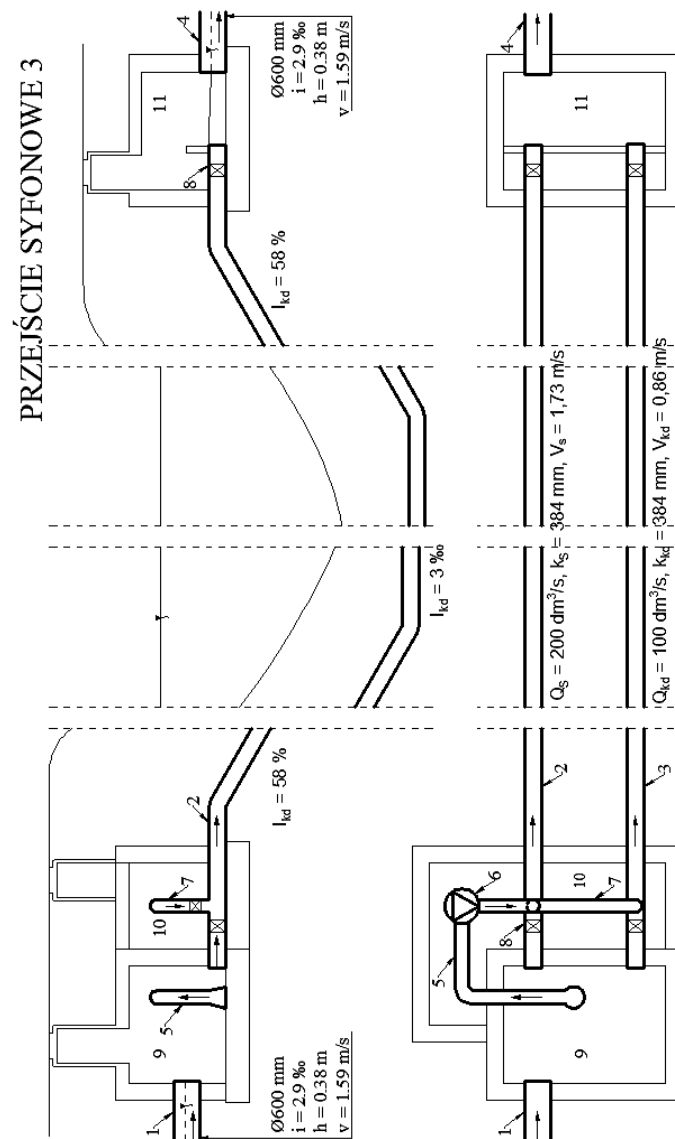
- przepływ $Q = 120 \text{ dm}^3/\text{s}$,
- wysokość podnoszenia $H = 4,71 \text{ m}$.



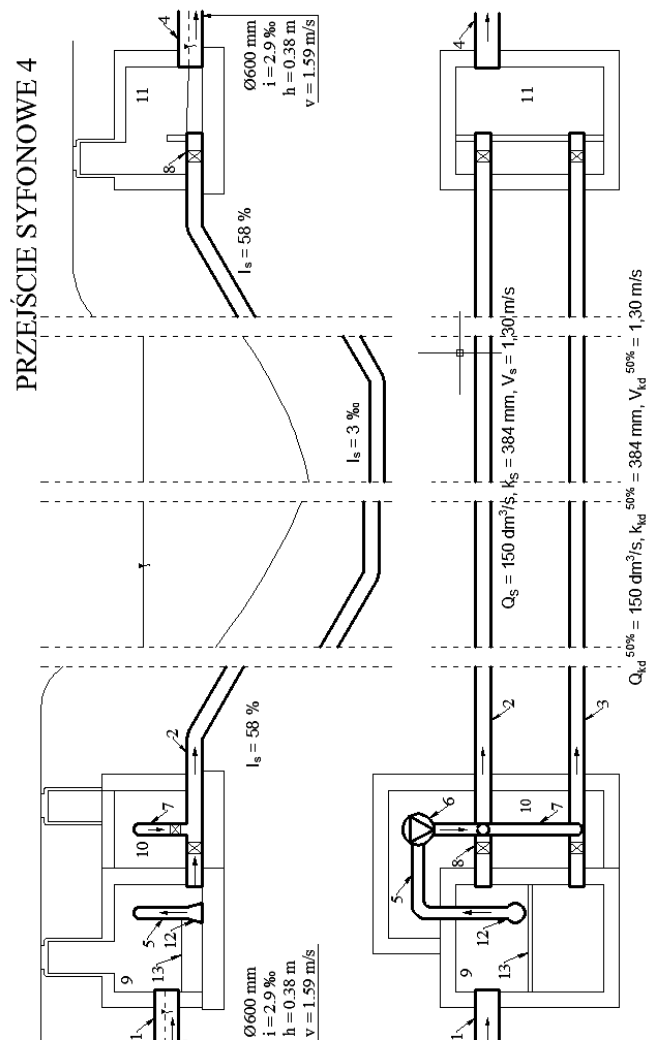
Rys. 1. Rzut z góry i przekrój rozwiązania w Wariancie 1 (1 – kanał wlotowy, 2 – przewód syfonowy, 3 – przewód syfonowy awaryjny, 4 – kanał wylotowy, 5 – przewód ssawny, 6 – przewód ciśnieniowy tłoczny, 7 – pompa, 8 – zasuwy, 9 – komora początkowa, 10 – komora dodatkowa, 11 – komora końcowa, 12 – istniejące przejście dla pieszych nad przeszkodą, I_w – spadek przewodu z wymuszonym przepływem, Q_w – przepływ ścieków w przewodzie z wymuszonym przepływem, K_w – średnica przewodu kołowego o wymuszonym przepływie, V_w – prędkość w przewodzie o wymuszonym przepływie, I_s – spadek hydrauliczny przewodu syfonowego, Q_s – przepływ w przewodzie syfonowym, K_s – średnica kołowego przewodu syfonowego, V_s – prędkość w przewodzie syfonowym, H_w – geometryczna wysokość podnoszenia pompy)



Rys. 2. Rzut z góry i przekrój pionowy rozwiązania w Wariancie 2 (1 – kanał wlotowy, 2 – przewód syfonowy, 3 – przewód syfonowy awaryjny, 4 – kanał wylotowy, 5 – przewód ssawny, 6 – pompa, 7 – przewód tłoczny, 8 – zasuwy, 9 – komora początkowa, 10 – komora dodatkowa, 11 – komora końcowa), I_{sw} – spadek hydrauliczny przewodu syfonowego z wymuszonym przepływem, Q_{sw} – przepływ ścieków w przewodzie syfonowym o wymuszonym przepływie, K_{sw} – średnica syfonowego przewodu kołowego o wymuszonym przepływie, V_{sw} – prędkość w przewodzie syfonowym o wymuszonym przepływie)



Rys. 3. Rzut z góry i przekrój pionowy rozwiązania w Wariantie 3 (1 – kanał wlotowy, 2 – przewód syfonowy, 3 – przewód syfonowy awaryjny, 4 – kanał wylotowy, 5 – przewód ssawny, 6 – pompa, 7 – przewód tłoczny, 8 – zasuwy, 9 – komora początkowa, 10 – komora dodatkowa, 11 – komora końcowa, l_{kd} – spadek hydrauliczny wykorzystanego awaryjnego przewodu, Q_{kd} – przepływ ścieków w wykorzystanym przewodzie awaryjnym, K_{kd} – średnica wykorzystanego awaryjnego przewodu kołowego, V_{kd} – prędkość w wykorzystanym awaryjnym przewodzie, l_s – spadek hydrauliczny przewodu syfonowego, Q_s – przepływ w przewodzie syfonowym, K_s – średnica kołowego przewodu syfonowego, V_s – prędkość w przewodzie syfonowym)



Rys. 4. Rzut z góry i przekrój pionowy rozwiązania w Wariantie 4 (1 – kanał wlotowy, 2 – przewód syfonowy, 3 – przewód syfonowy awaryjny, 4 – kanał wylotowy, 5 – przewód ssawny, 6 – pompa, 7 – przewód tłoczny, 8 – zasuwa, 9 – komora początkowa, 10 – komora dodatkowa, 11 – komora końcowa, 12 – kosz ssawny, 13 – krawędź przelewowa, $l_{kd}^{50\%}$ – spadek wykorzystanego awaryjnego przewodu na przepływ 50% strumienia objętości ścieków, $Q_{kd}^{50\%}$ – przepływ ścieków w wykorzystanym awaryjnym przewodzie na przepływ 50% strumienia objętości ścieków, $K_{kd}^{50\%}$ – średnica wykorzystanego awaryjnego przewodu kołowego na przepływ 50% strumienia objętości ścieków, $V_{kd}^{50\%}$ – prędkość w wykorzystanym awaryjnym przewodzie na przepływ 50% strumienia objętości ścieków, i_s – spadek hydrauliczny przewodu syfonowego, Q_s – przepływ w przewodzie syfonowym, K_s – średnica kołowego przewodu syfonowego, V_s – prędkość w przewodzie syfonowym)

W tabeli 1. zamieszczono ustalone parametry hydrauliczne działania przejścia syfonowego w Wariancie 1. podczas eksploatacji jednego (z dwóch) istniejącego przewodu syfonowego i projektowanego przewodu ciśnieniowego

Tabela 1. Parametry hydrauliczne w przewodzie syfonowym w Wariancie 1

Przewód	Średnica D , mm	Przepływ Q , dm^3/s	Prędkość V , m/s
Syfonowy (istniejący)	384	200	1,73
Ciśnieniowy (projektowany)	239	100	2,23

Rozwiązanie to jest tanie w wykonaniu i zarazem drogie w eksploatacji. Konieczny jest zakup i montaż pompy, przewodów ciśnieniowych oraz budowa dodatkowej komory przepompowni ścieków.

5.2 Transport wymuszony jednym z istniejących przewodów syfonowych

W rozpatrywanym Wariancie 2. przewidziano transport ścieków w sposób wymuszony istniejącym przewodem o średnicy $Ks = 384$ mm. Dla tej średnicy i przepływu ścieków $Q_{SN} = 300 \text{ dm}^3/\text{s}$ wyznaczono średnią prędkość przepływu strumienia ścieków $V_{SN} = 2,59 \text{ m/s}$. Łączną wysokość miejscowych strat hydraulicznych ustalono korzystając ze znanych w hydraulice wzorów (5.1) ÷ (5.4), które wyszczególniono wraz z opisem parametrów [6,7].

Strata hydrauliczna przy zmianie prędkości przepływu na dopływie do syfonu

$$\Delta h_1 = (V_s^2 - V_k^2)/2g \quad (5.1)$$

gdzie: V_s – prędkość przepływu ścieków w przewodzie syfonowym, m/s;
 V_k – prędkość przepływu ścieków w kanale dopływowym, m/s;
 g – przyspieszenie ziemskie, m/s^2 .

Straty na wlocie do syfonu

$$\Delta h_2 = \xi_l V_s^2/2g \quad (5.2)$$

gdzie ξ_l jest współczynnikiem strat miejscowych na wlocie do syfonu i dla wlotów łagodnych przyjmuje wartość $\xi_l = 0,1$ [1].

Straty na zmianie kierunku przepływu (załamania, łuki)

$$\Delta h_3 = \xi_\alpha V_s^2/2g \quad (5.3)$$

gdzie ξ_α jest współczynnikiem strat i dla $\alpha = 45^\circ \Rightarrow \xi = 0,2$ na podstawie [7]. Ponieważ przewidziano cztery załamania o kącie 45° , zatem wynik pomnożono przez 4.

Straty na wybiciu ścieków z syfonu do kanału odpływowego

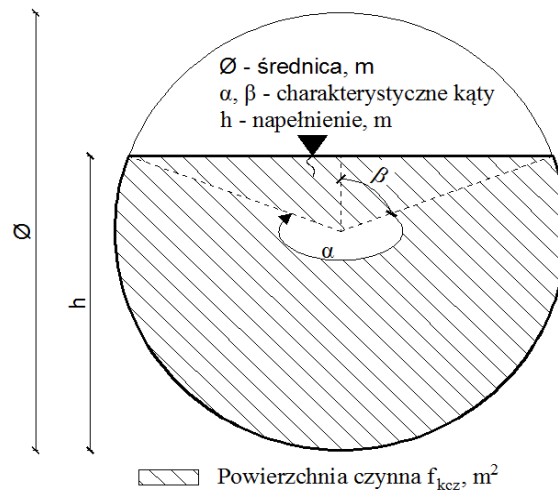
$$\Delta h_4 = (1 - f_s / f_{kcz})^2 V_s^2 / 2g \quad (5.4)$$

gdzie: f_s – powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu syfonowego, która wynosi:

$$f_s = \pi \cdot D_s^2 / 4 = \pi \cdot 0,384^2 / 4 = 0,116 \text{ m}^2;$$

f_{kcz} – powierzchnia przekroju czynnego kanału odpływowego z syfonu, ustalona jak na rysunku 5.

$$f_{kcz} = 0,144 \text{ m}^2.$$



Rys. 5. Powierzchnia czynna kanału odpływowego

Straty liniowe obliczone na podstawie [1]

$$\Delta h_L = \lambda \cdot L/D \cdot V_s^2 / 2g \quad (5.5)$$

gdzie: λ – współczynnik strat liniowych;
 L – długość przewodu syfonowego, m.

Zgodnie z publikacją [1] współczynnik strat liniowych należy obliczyć ze wzoru (5.6):

$$\lambda = (8 \cdot g) / c^2 \quad (5.6)$$

$$c = 1/n \cdot R^{1/6} \quad (5.7)$$

gdzie: c – współczynnik prędkości ze wzoru Chezy;
 n – współczynnik oporu Manninga (współczynnik szorstkości) i przyjęto $n = 0,013$.

Przekształcając wzory (5.5) ÷ (5.7) otrzymano ostateczny wzór na starty liniowe w przewodzie syfonowym w postaci:

$$\Delta h_L = (4 \cdot L \cdot V_s^2) / (c^2 \cdot D) \quad (5.8)$$

Wyznaczono też wysokość liniowych strat hydraulicznych na trasie transportowanych ścieków przewodem syfonowym o średnicy $D_s = 384$ mm i długości $L_s = 100$ m. Z zależności (5.8) ustalono straty równe 2,2 m.

Obliczenia strat hydraulicznych miejscowych (wzory (5.1) ÷ (5.4)) i liniowych (wzór (5.8)).

$$\Delta h_1 = (2,59^2 - 1,59^2) / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,213 \text{ m}}$$

$$\Delta h_2 = 0,1 \cdot 2,59^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,034 \text{ m}}$$

$$\Delta h_3 = 0,044 \cdot 2,59^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,015 \cdot 4 = \mathbf{0,060 \text{ m}}$$

$$\Delta h_4 = (1 - 0,116/0,144)^2 \cdot 2,59^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,013 \text{ m}}$$

$$\Delta h_M = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 = \mathbf{0,32 \text{ m}}$$

$$\Delta h_L = (4 \cdot 100 \cdot 2,59^2) / (56,39^2 \cdot 0,384) = \mathbf{2,2 \text{ m}}$$

Uwzględniając wszystkie opory ruchu ścieków na trasie ich przepływu pomiędzy wlotem i wylotem przewodu syfonowego, ustalono całkowitą wysokość strat hydraulicznych równą:

$$\Delta h_S = \Delta h_M + \Delta h_L = 0,32 + 2,2 = \mathbf{2,52 \text{ m}}$$

Realizację Wariantu 2. można przeprowadzić przy małych kosztach inwestycyjnych, które są związane z zakupem pompy oraz jej podłączeniem do kanału syfonowego. Minimalna jest też inwazyjność w obiekt istniejący poddany ciągłej eksploatacji. Jednak wysokie będą koszty eksploatacyjne, które są związane z koniecznością rezerwowania i dostawy energii elektrycznej potrzebnej do zasilenia pomp.

5.3 Transport dwoma przewodami syfonowymi

W trzecim wariantcie projektowym przewidziano udział dwóch przewodów syfonowych, w tym kanału rezerwowego, którym będzie transportowana nadwyżka ścieków $Q_n = 100 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Wykorzystując istniejący układ hydrauliczny przejścia syfonowego, wyznaczono wysokość strat hydraulicznych, oddzielnie w przewodzie syfonowym i przy działaniu przewodu syfonowego awaryjnego.

Dla przepływu ścieków $Q_s = 200 \text{ dm}^3/\text{s}$ w przewodzie syfonowym o średnicy $D_s = 384$ mm prędkość przepływu ścieków wynosi $V_s = 1,73 \text{ m/s}$.

Obliczenia strat hydraulicznych miejscowych (wzory (5.1) ÷ (5.4)) i liniowych (wzór (5.8)).

$$\Delta h_1 = (1,73^2 - 1,59^2) / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,024 \text{ m}}$$

$$\Delta h_2 = 0,1 \cdot 1,73^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,015 \text{ m}}$$

$$\Delta h_3 = 0,044 \cdot 1,73^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,00669 \cdot 4 = \mathbf{0,027 \text{ m}}$$

$$\Delta h_4 = (1 - 0,116/0,144)^2 \cdot 1,73^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,006 \text{ m}}$$

$$\Delta h_M = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 = \mathbf{0,072 \text{ m}}$$

$$\Delta h_L = (4 \cdot 100 \cdot 1,73^2) / (56,39^2 \cdot 0,384) = \mathbf{0,98 \text{ m}}$$

Uwzględniając wszystkie opory ruchu ścieków podczas ich transportu przewodem $D_S = 384 \text{ mm}$ przy $Q_S = 200 \text{ dm}^3/\text{s}$, całkowita wysokość strat hydraulicznych wynosi:

$$\Delta h_S = \Delta h_M + \Delta h_L = 0,072 + 0,98 = \mathbf{1,05 \text{ m}}$$

Dla przewodu syfonowego awaryjnego o średnicy $D_S = 384 \text{ mm}$ i objętości ścieków $Q_N = 100 \text{ dm}^3/\text{s}$ obliczono prędkość przepływu ścieków $V_N = 0,86 \text{ m/s}$ $> V_{min} = 0,8 \text{ m/s}$.

Wykorzystując metodykę ustalania oporów ruchu ścieków, wyznaczono wysokość strat hydraulicznych podczas transportu ścieków przewodem awaryjnym przy $Q_N = 100 \text{ dm}^3/\text{s}$ i $V_N = 0,86 \text{ m/s}$ korzystając ze wzorów (5.1) ÷ (5.8).

$$\Delta h_1 = (0,86^2 - 1,59^2) / (2 \cdot 9,81) - \text{nie uwzględniono, gdyż } V_N < V_K$$

$$\Delta h_2 = 0,1 \cdot 0,86^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,004 \text{ m}}$$

$$\Delta h_3 = 0,044 \cdot 0,86^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,00167 \cdot 4 = \mathbf{0,007 \text{ m}}$$

$$\Delta h_4 = (1 - 0,116/0,144)^2 \cdot 0,86^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,001 \text{ m}}$$

$$\Delta h_M = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 = \mathbf{0,012 \text{ m}}$$

$$\Delta h_L = (4 \cdot 100 \cdot 0,86^2) / (56,39^2 \cdot 0,384) = \mathbf{0,24 \text{ m}}$$

Przy dokonanych założeniach ustalono sumaryczną wysokość strat hydraulicznych w przewodzie awaryjnym przy transporcie $100 \text{ dm}^3/\text{s}$ ścieków, która wynosi:

$$\Delta h_S = \Delta h_M + \Delta h_L = 0,012 + 0,24 = \mathbf{0,25 \text{ m}}$$

W tabeli 2. zestawiono obliczone wartości parametrów hydraulicznych dla przewodów syfonowych w Wariancie 3.

Tabela 2. Parametry hydrauliczne w przewodach syfonowych w Wariancie 3

Przewód o średnicy $D_S = 384 \text{ mm}$	Przepływ Q , dm^3/s	Prędkość V , m/s
Syfonowy	200	1,73
Syfonowy awaryjny	100	0,86

Wybranie tego wariantu pozwala na obniżenie kosztów związanych z eksploatacją i kosztów inwestycyjnych, ponieważ całkowita objętość ścieków przeprowadzona zostaje grawitacyjnie. Zatem koszty eksploatacji będą minimalne i związane jedynie z konserwacją oraz ewentualnie czasowym płukaniem kanału. Wadą tego rozwiązania jest konieczność zakupu pompy, która będzie tłoczyła całość ścieków przez jeden sprawny przewód syfonowy w razie awarii, a także zaprojektowanie i wykonanie przepompowni z odpowiednią instalacją i układem zasuw. Zastosowanie tego wariantu jest uwarunkowane minimalną objętością ścieków, jaka powinna być transportowana, aby prawidłowo działał

istniejący przewód syfonowy. Wynika to z konieczności zachowania odpowiedniej minimalnej prędkości przepływu w tym przewodzie. Zatem wraz z przyrostem strumienia objętości ścieków $Q_N > 100 \text{ dm}^3/\text{s}$ w okresie perspektywnym zastosowanie Wariantu 3. staje się uzasadnione. Ten wariant jest jednak trudny do zrealizowania w praktyce. Po pierwsze, z uwagi na zachowanie założonej proporcji przy rozdziale ścieków. Po drugie, zróżnicowanie wysokości strat hydraulicznych należy zapewnić w komorach wlotowych do obydwu przewodów syfonowych. W komorze przewodu awaryjnego zwierciadło ścieków powinno być niżej o różnicę obliczonych strat, tj. $H_{os} = 0,57 - 0,15 = 0,42 \text{ m}$, aby zachować identyczne warunki na wypływie w komorze końcowej.

5.4 Transport dwoma przewodami syfonowymi po przelewie rozdzielającym

Wariant 4. ma przewagę nad Wariantem 3., która wiąże się z równomiernym rozdziałem dopływających ścieków $Q_{SN} = 300 \text{ dm}^3/\text{s}$ na oba istniejące przewody syfonowe. Umożliwia to nowy przelew boczny lub bezpośrednie włączenie przewodów z jednej wspólnej komory początkowej. Wspólne zwierciadło na wlocie do obydwu przewodów syfonowych zapewnia stabilne warunki hydrauliczne przepływu ścieków w obu przewodach i komorze końcowej.

W wyniku równomiernego rozdziału ścieków $Q_{SN} = 300 \text{ dm}^3/\text{s}$ na dwa przewody syfonowe (eksploatowany i awaryjny), ilość ścieków konieczna do przeprowadzenia jednym wynosi $Q_{S1} = 150 \text{ dm}^3/\text{s}$. Dla strumienia objętości ścieków $Q_{S1} = 150 \text{ dm}^3/\text{s}$ i średnicy $DS = 384 \text{ mm}$ ustalono prędkość przepływu ścieków $V_1 = 1,3 \text{ m/s}$.

Obliczenia strat hydraulicznych miejscowych (wzory (5.1) ÷ (5.4)) i liniowych (wzór (5.8)).

$$\Delta h_1 = (1,3^2 - 1,59^2) / (2 \cdot 9,81) - \text{nie uwzględniono, gdyż } V_s < V_K$$

$$\Delta h_2 = 0,1 \cdot 1,3^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,009 \text{ m}}$$

$$\Delta h_3 = 0,044 \cdot 1,3^2 / (2 \cdot 9,81) = 0,00379 \cdot 4 = \mathbf{0,015 \text{ m}}$$

$$\Delta h_4 = (1 - 0,116/0,144)^2 \cdot 1,3^2 / (2 \cdot 9,81) = \mathbf{0,003 \text{ m}}$$

$$\Delta h_M = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 = \mathbf{0,027 \text{ m}}$$

$$\Delta h_L = (4 \cdot 100 \cdot 1,3) / (56,39^2 \cdot 0,384) = \mathbf{0,551 \text{ m}}$$

W oparciu o przeprowadzone obliczenia wyznaczono sumaryczną wysokość strat hydraulicznych w przewodach syfonowych dla przepływu $150 \text{ dm}^3/\text{s}$, która wynosi $\Delta h_S = \Delta h_M + \Delta h_L = 0,027 + 0,55 = 0,581 \text{ m}$.

Biorąc pod uwagę równy rozdział ścieków przez przelew po $150 \text{ dm}^3/\text{s}$, nastąpi przepływ dwoma przewodami syfonowymi, w wyniku czego suma strat hydraulicznych miejscowych wynosi $\Delta h_M = 0,027 \text{ m}$ i liniowych na długości przewodu $\Delta h_L = 0,55 \text{ m}$, a ich łączna wartość ustali się na identycznym poziomie i $\Delta h_S = 0,581 \text{ m}$.

Zaletą tego wariantu jest zapewnienie identycznych warunków hydraulicznych podczas transportu ścieków jednocześnie dwoma istniejącymi przewodami

syfonowymi. Zaleca się zachowanie jednej otwartej komory początkowej na wpływie ścieków do syfonu.

Natomiast wartość strumienia objętości ścieków zredukowana z 200 dm³/s do 150 dm³/s powoduje zmniejszenie sumy łącznych strat hydraulicznych z $\Delta h_s = 1,05$ m w Wariancie 3. do $\Delta h_s = 0,581$ m w analizowanym Wariancie 4.

Taki układ hydrauliczny (w Wariancie 4.) zapewni najniższy poziom zwierciadła ścieków w komorze początkowej w porównaniu do trzech pozostałych analizowanych koncepcji. Zatem obniżenie zwierciadła ścieków w samej studni wlotowej będzie rzutować korzystnie na prawidłowe funkcjonowanie analizowanego przejścia syfonowego i pozwoli na przyjmowanie jeszcze większych objętości ścieków w zlewni podlegającej rozbudowie.

6. Podsumowanie

Dokonana analiza zaproponowanych rozwiązań inżynierskich i wykonanych obliczeń dla czterech wersji rozbudowy przejścia syfonowego pozwala stwierdzić, że przydatność Wariantów 1. i 2., uwzględniających zaprojektowanie pompy do transportu nadmiaru ścieków będzie miała uzasadnienie jedynie w przypadku, gdy inwestorowi zależy na szybkim i tanim wykonaniu prac, zapewniających prawidłowe działanie systemu kanalizacji po rozbudowie. Uwzględnienie tych wariantów polegających na przystosowaniu obecnego przejścia syfonowego do nowych warunków obciążenia hydraulicznego będzie tanie, jednak jego eksploatacja wiąże się z koniecznością ciągłego rezerwowania mocy zasilania i dużego zużycia energii elektrycznej, co się też wiąże z kosztownymi bieżącymi konserwacjami.

Zastosowanie Wariantów 3. i 4., opartych na grawitacyjnie działających przewodach przejścia syfonowego, czyli obecnie funkcjonującym i rezerwowym, uważa się za najkorzystniejsze i godne polecenia rozwiązania. W tych wariantach przejście syfonowe działa grawitacyjnie, w związku z czym nie korzysta się w sposób ciągły z energii elektrycznej. Rozwiązania w Wariancie 3. i 4. różnią się jedynie budową krawędzi przelewowej lub otwartej komory początkowej, które w równej proporcji będą rozdzielać ścieki dopływające do dwóch eksploatowanych przewodów syfonowych.

W obu przypadkach modernizowane przejście syfonowe zaopatrzone będzie w pompę, włączaną jedynie w okresie uszkodzenia jednego z rurociągów przejścia syfonowego, i to tylko na czas naprawy. Rozwiązania te są zdecydowanie tańsze w eksploatacji, ale droższe w budowie. Jednak biorąc pod uwagę ogół kosztów z perspektywy czasowej oraz przewidując prawdopodobieństwo pojawienia się awarii i stąd wynikającą niezawodność działania całego przejścia syfonowego pod dnem rzeki, za wyborem Wariantu 4. przemawiają jego walory inwestycyjne i eksploatacyjne oraz istniejąca rezerwa (w przepustowości hydraulicznej), z uwagi na małą wartość łącznych strat hydraulicznych, (ocenianych na $\Delta h_s = 0,551$ m).

Podjęmowanie wnikliwych rozważań nad wyborem możliwych rozwiązań inżynierskich w ramach wykonywania zaawansowanych projektów na specjalizacji *Infrastruktura i Ekorozwój*, dotyczących rozbudowy kanalizacji różnych systemów, inspirują zaangażowanych studentów do pracy twórczej. Główną motywacją i celem jest ćwiczenie umiejętności poszukiwania i dokumentowania wyboru racjonalnych rozwiązań inżynierskich. Efektem dyskusowania jest wyrobienie u studentów potrzeby, a nawet konieczności i zasadności poszukiwania wielości możliwych rozwiązań inżynierskich poprawnych technicznie. To pozwala na gruntowne przygotowanie absolwentów do skutecznego rozwiązywania złożonych zagadnień w zakresie gospodarki wodno-ściekowej.

Literatura

- [1] Bednarczyk T.: Syfony. Podstawy projektowania. Kraków 1987.
http://149.156.33.48/~tbednarczyk/tb_pliki/syfony.pdf
- [2] Błaszczyk W., Stamatello H.: Budowa miejskich sieci kanalizacyjnych. Warszawa 1967.
- [3] Kotowski A., Mielcarzewicz E. Wł.: Badania modelowe przelewów burzowych o regulowany odpływie. Wrocław 1986.
- [4] http://www.iwizz26.za.pl/pliki/wodkan/kan_02_uzbroj.pdf
- [5] Pilch K.: Przeprowadzenie ścieków przez rzekę za pomocą przejścia syfonowego. Praca seminaryjna, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2011.
- [6] Mitosek M.: Mechanika płynów w inżynierii środowiska. Warszawa 2007.
- [7] Książczyński K.W., Jeż P., Gręplowska Z.: Tablice do obliczeń hydraulicznych. Kraków 2002.

ANALYSIS HYDRAULIC CAPACITY INCREASE OF SIPHON

Summary

The paper presents the options of technical solutions associated with the modernization of siphon construction under the river bottom. Hydraulic conditions of siphon action before and after development we taken into account. The impact the four investment variants of siphon construction and operation were researched. An important issue is the low invasiveness of the object construction. Presented solution allows to create a hydraulic reserve for the adoption of higher wastewater flow intensity after the future expansion of the sewage system.