

Po stronie przewodów tłocznych w pompowniach ścieków

From the side of pressure mains in sewage pumping stations

WOJCIECH DĄBROWSKI, BARBARA DĄBROWSKA

DOI 10.36119/15.2019.11.7

W artykule zostały rozważone trzy tematy dotyczące pompowania ścieków: zawory zwrotne, wpływ drobnych kamieni oraz grubego żwiru na opory przepływu w pionowym przewodzie oraz tworzenie się odorantów w czasie ciśnieniowego transportu ścieków. Opiszano wielkości prędkości przepływu, które otwierają zawory zwrotne w pompowni i scharakteryzowano niektóre wartości. Następnie przy pomocy równań opisano wpływ drobnych kamieni i grubego żwiru na opory przepływu przez przewody ciśnieniowe. Na końcu podano wskazówki co do metod ograniczania uciążliwości zapachowej transportowanych ścieków.

Słowa kluczowe: ścieki, pompowanie, osady, odory

Three subjects belonging to pumping of sewage have been considered: non-return valves, the impact of small stones and coarse gravel on the flow resistance in a vertical pipe and the formation of odorants during pressure sewage transport. The flow velocities that open the non-return valves in the pumping station are described and some values are characterized. Then, the equations describe the effect of small stones and coarse gravel on the flow resistance through pressure lines. Finally, instructions on how to reduce the odour nuisance of transported sewage are given.

Keywords: wastewater, pumping, sediment, odours

Wstęp

Eksploatacja pompowni kanalizacyjnych jest często uciążliwa. Z uwagi na niebezpieczeństwo wystąpienia kawitacji [13], zasysania powietrza [1], [2] i opłatania wirników włókninami [10], [11] oraz gromadzenia się osadów w komorze czerpalnej szczególnej wagi nabierają rozwiązania po stronie ssawnej pomp. Jednak po stronie tłocznej również spotykamy utrudnienia eksploatacyjne, których zmniejszenie wymaga starannego rozważenia parametrów projektowych przewodów tłocznych. Należą do tych utrudnień między innymi: niebezpieczeństwo uszkodzenia przewodów w czasie uderzenia hydraulicznego [4], zmniejszenie przepustowości przewodów przez osady (często tłuszcze oblepiające sklepienie przewodów ciśnieniowych [3]) oraz wytwarzanie odorantów i powodowanie korozji siarczanowej położonych dalej grawitacyjnych kanałów betonowych [5], [6].

Opory przepływu

W terenie o zabudowie rozproszonej w Polsce najczęściej stosowane są systemy pompowe oparte na pompach wirowych o stosunkowo łagodnie opadającej charakterystyce $H(Q)$. Jednakże zdarzają się również inne rozwiązania i tak przykładowo w gminie Kobylnica zbudowano sieć obsługiwana przez 730 pomp Presskan o stromych charakterystykach [4]. Dla pojedynczych gospodarstw domowych stosuje się uproszczone systemy pompowe EPS-P, EPS-PS. Powszechnie stosowane są pompy Wilo, Grundfos, Flygt i inne. Jednym z podstawowych problemów kanalizacji ciśnieniowej w terenie o zabudowie rozproszonej są duże opory przepływu i związana z tym konieczność

powtórzonego przepompowywania ścieków na dłuższej trasie. W równaniu Darcy Weisbecha (1) na stratę wysokości ciśnienia Δh_{str} na długości przewodu, wewnętrzna średnica przewodu d znajduje się w mianowniku. Nie oznacza to, że przy stałej prędkości opory przepływu są dokładnie odwrotnie proporcjonalne do tej średnicy, gdyż w przeciętnych warunkach mamy do czynienia z ruchem przejściowym i współczynnik oporów λ zależy od liczby Reynoldsa, a przy tej samej zastępczej chropowatości piaskowej, chropowatość względna od średnicy przewodu. Niemniej wpływ średnicy na opory jest znaczący, co powoduje trudności w pompowaniu ścieków na duże odległości.

$$\Delta h_{str} = \lambda \cdot (L/d) \cdot (v^2/2g) \quad (1)$$

W równaniu (1) L jest długością przewodu, v liczoną na całą powierzchnię zwilżoną prędkością przepływu, a g przyspieszeniem ziemskim.

Prędkości ekonomiczne przepływu są tym mniejsze im mniejsze są średnice, ale w przypadku pompowania ścieków zmniejszanie prędkości przepływu natrafia na ograniczenie wynikające z konieczności utrzymania wymaganych wartości naprężenia ścinającego na granicy ściana przewodu – płynące ścieki. Wzór na wartość tego naprężenia τ jest następujący [3],[7]:

$$\tau = (d/4) \cdot S \cdot \rho \cdot g \quad (2)$$

W równaniu (2) S jest spadkiem hydraulicznym w przewodzie poziomym a ρ gęstością ścieków. Według literatury, wartość naprężenia ścinającego τ nie powinna być mniejsza niż $2,5 \text{ N/m}^2$, chociaż niektórzy przyjmują za dolną granicę $1,8 \text{ N/m}^2$ [3].

Zawory zwrotne

W większych pompowniach ściekowych pojawia się problem wytrzymałości przewodu na uderzenia hydrauliczne. Pompy chronione są przez zawory zwrotne, najczęściej o konstrukcji kulowej. Zakłada się je na pionowych odcinkach przewodów tłocznych. Kule zamykające i otwierające przewód tłoczny wykonane są zazwyczaj z metalu i wulkanizowane gumą, tak aby nie wywoływały nadmiernego hałasu. W przeciwieństwie do takich zaworów w pompowniach wodociągowych kule są cięższe, tak aby były w stanie zapewnić szczelność zamknięcia, nawet gdy w zaworze zostanie zatrzymany kawałek tekstyliów albo papieru. Ta różnica w ciężarze odbija się na minimalnej prędkości przepływu, którą należy zachować dla utrzymania pełnego otwarcia zaworu. Zawory te dopiero przy pełnym otwarciu utrzymują stałą wartość współczynnika oporów miejscowych ζ . Przy częściowym otwarciu wartości tych współczynników są tym większe im mniejszy jest stopień ich otwarcia, który się zmienia, co powoduje niestabilność oporów przepływu. Wreszcie niemal przy całkowitym zamknięciu współczynnik oporów miejscowych jest bardzo duży. Króciec tłoczny ma mniejszą średnicę niż przewód tłoczny i warto sprawdzić czy jeżeli zainstalowany zostanie dyfuzor przed zaworem zwrotnym to prędkość przepływu zapewni całkowite otwarcie tego zaworu. Należy w tym celu korzystać z aktualnych danych podawanych przez producenta gdyż mogą być wprowadzane zmiany konstrukcyjne lub wystąpić inne powody, dla których dane literaturowe są nieaktualne. Zestawienia takie, jak cytowane w tabeli 1 można traktować jedynie jako dane orientacyjne. Jeżeli konieczne to rozszerzenie

przewodu tłocznego powinno nastąpić dopiero za zaworem zwrotnym. Według zestawionych w pracy [14] danych zawory kulowe stosowane przez różnych producentów wymagają dla pełnego otwarcia wartości najmniejszych natężeń przepływu Q_{\min} i przy tym najmniejszym natężeniu wytwarzają lokalny spadek wysokości ciśnienia Δh_{strmin} podany w tabeli 1. Dane te odnoszą się do średnicy nominalnej 200mm. W zestawieniu tym [14] największe miejscowe straty wysokości ciśnienia odpowiadające górnemu zakresowi przepływu wynoszą od 2 do 10m H_2O , zależnie od producenta.

Pompowanie w pionie

Równanie (2) pozwala na taki dobór prędkości przepływu w przewodzie, aby przekroczyć wartość naprężeń ścinających na granicy ściana przewodu – ścieki, przy której nie dochodzi do nadmiernego gromadzenia się osadu. Podejście to wprowadzono najpierw w krajach skandynawskich [3] i obecnie jest ono szeroko stosowane jako oparte na prawach fizyki. Równanie (2) można wyprowadzić [3] porównując rozproszenie energii potencjalnej, wynikające ze spadku kanału grawitacyjnego, z pracą naprężeń ścinających wzdłuż obwodu zwilżonego. Równanie (2) ma zastosowanie dla kanałów prowadzonych w niedużych spadkach. Oprócz takich przewodów zdarzają się przypadki pompowania mieszaniny cieczy oraz ciał stałych w pionie. Przykładem mogą być pompy zainstalowane w kopalniach węgla, a w kanalizacji tak zwane pompownie przewalowe służące do transportu wód deszczowych, lub ścieków ogólnospławnych, z kanału grawitacyjnego położonego niżej do kanału usytuowanego powyżej. W tym przypadku pompowni pompy nie współpracują ze sobą i nie ma potrzeby zakładania zaworów zwrotnych na przewodzie tłocznym, gdyż cały przepływ wsteczny może dotyczyć jedynie wypływu z kilkumetrowego przewodu tłocznego. Pompy muszą mieć wówczas łożyska pozwalające na przeciwny obrót wirnika. W tym rozwiązaniu pompy pracują jako zatopione w ściekach, a dla uniknięcia gromadzenia się w pompowni zbyt dużej ilości osadów zastosos-

Tabela 1. Wymagania co do najmniejszego przepływu Q_{\min} powodującego otwarcie zaworów kulowych do ścieków przy średnicy 200mm, według zestawienia wykonanego w pracy [14] i miejscowa strata wysokości ciśnienia, która tym przepływom odpowiada [14]

Producent	Model zaworu	Q_{\min} [m ³ /h]	Δh_{strmin} [m H_2O]
Jafar	6516-6526	355	0,4
Fergo	RB108	255	0,16
Talis	BV-05-38	260	0,17
Eko Wodrol	ESK 11	Brak danych	
Socla	typ 418	105	0,25
Danfoss	typ 408	80	0,25
Fergo	RB105	360	0,4
Hawle	9841	345	0,38
Fergo	RB102	250	0,14
Zetkama	401	450	0,5
AVK	53/35	180	0,4
Tehaco	ZKZ	220	0,16

Tabela 2 Przedziały granicznych wartości liczb Reynoldsa Re_o i Archimedesesa

Opadanie w warunkach ruchu laminarnego	Opadanie w warunkach ruchu przejściowego	Opadanie w warunkach ruchu turbulentnego
$10^{-4} < Re_o < 2$	$2 < Re_o < 500$	$500 < Re_o < 2 \cdot 10^5$
$1,8 \cdot 10^{-3} < Ar < 36$	$36 < Ar < 8,3 \cdot 10^4$	$8,3 \cdot 10^4 < Ar < 1,3 \cdot 10^{10}$
$\zeta = 24 / Re_{os}$	$\zeta = 18,5 / Re_{os}^{0,6}$	$\zeta = 0,44$
$Re_{os} = 0,056 Ar$	$Re_{os} = 0,152 Ar^{0,715}$	$Re_{os} = 1,74 Ar^{0,5}$
$v_s = (0,056 Ar) \cdot v / d$	$v_s = (0,152 Ar^{0,715}) \cdot v / d$	$v_s = (1,74 Ar^{0,5}) \cdot v / d$
$v_s = 0,056 \cdot (g \cdot d^2 / \nu) \cdot (\rho_z / \rho_w - 1)$	$v_s = 0,152 \cdot [d^{1,145} / \nu^{0,430}] \cdot [g \cdot (\rho_z / \rho_w - 1)]^{0,715}$	$v_s = 1,74 \cdot d^{0,5} \cdot [g \cdot (\rho_z / \rho_w - 1)]^{0,5}$

wać można mechaniczne urządzenia dodatkowe, jak przykładowo mieszacze.

W pompowniach przewalowych nie ma potrzeby zakładania zaworów zwrotnych, ale ponieważ przepływ odbywa się niemal pionowo, a transportowane są ścieki z zanieczyszczeniami, więc niezbędne jest aby w przewodzie tłocznym możliwe było przetransportowanie ziaren piasku i żwiru, których obecność w kanalizacji ogólnospławnej i deszczowej jest nieuchronna, co w mniejszym stopniu dotyczy też kanalizacji sanitarnej. Ta zawsze charakteryzuje się większymi przepływami w czasie i zaraz po opadach deszczu. Oznacza to, że przyjmuje wody przypadkowe i infiltracyjne. Możliwość transportu piasku i drobnego żwiru w pompowni o pionowym przewodzie tłocznym będzie zapewniona gdy prędkość przepływu ścieków przekroczy swobodną prędkość opadania największych ziaren pobieranych krótcem ssawnym pompy. Tak więc konieczne jest określenie prędkości swobodnej sedymentacji ziaren, to znaczy takiej, którą ziarno osiąga bez oddziaływania z innymi, a więc na początku pracy pompy, gdy w przewodzie tłocznym nie zgromadzi się zawieszona chmura ziaren, których pompa nie będzie w stanie przetransportować do położonego nad pompownią kanału grawitacyjnego. Potrzebne jest więc określenie najmniejszej dopuszczalnej prędkości przepływu w przewodzie pionowym, a do tego potrzebna jest znajomość swobodnej prędkości sedymentacji ziaren.

Prędkość sedymentacji

W książce C. Grabarczyka [12] podane zostały równania na prędkość swobodną sedymentacji ziaren, które zestawiono w tabeli 2. W tabeli tej wprowadzono następujące oznaczenia:

Ar – liczba Archimedesesa,
 d – średnica zastępcza ziarna,
 Re_o – liczba Reynoldsa określona w odniesieniu do swobodnie sedymentującego ziarna w osadniku,
 v_s – prędkość swobodnej sedymentacji ziarna,

Liczba Reynoldsa została w tabeli 2 zdefiniowana równaniem (3), a liczba Archimedesesa równaniem (4).

$$Re_o = \frac{d \cdot v_s}{\nu} \quad (3)$$

$$Ar = \frac{gd^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_z - \rho_w}{\rho_w} \quad (4)$$

Jak wszystkie liczby kryterialne zarówno liczba Reynoldsa, jak i Archimedesesa są bezwymiarowe.

W tabeli 2 podano graniczne wartości liczb Reynoldsa i Archimedesesa, dla których panuje w czasie sedymentacji przepływ laminarny, przejściowy oraz turbulentny. W poszczególnych zakresach ruchu (przepływu) zastosowanie mają różne równania na prędkość swobodnej sedymentacji ziaren. Jest ona również uzależniona od ich kształtu [19] i należy pamiętać, że tabela 1 dotyczy kształtów kulistych, a medium, w którym znajdują się ziarna jest czysta woda, a nie ścieki. O ile gęstość ścieków bez zawieszonych ziaren drobnego żwiru i piasku nieznacznie różni się od gęstości wody, o tyle wartości współczynnika kinematycznej lepkości mogą być znacznie różne nie tylko pomiędzy wodą i ściekami ale również pomiędzy poszczególnymi rodzajami ścieków płynących kanalizacją sanitarną lub ogólnospławną. Dlatego przeprowadzone tutaj obliczenia minimalnej prędkości sedymentacji ziaren mają wyłącznie charakter szacunkowy.

Prędkość sedymentacji piasku

W przypadku piasku ($d \leq 4$ mm) dysponujemy informacjami dotyczącymi nie tylko prędkości sedymentacji kulek w wodzie (równania z tabeli 2), ale również wartościami swobodnej prędkości sedymentacji w tym zakresie ziaren naturalnych z różnych minerałów. Dysponujemy tymi informacjami gdyż prędkość tej sedymentacji jest intensywnie badana z uwagi na dobór parametrów płukania filtrów pospiesznych wody oraz dobór uziarnienia w filtrach wielowarstwowych. Rozróżnia się nawet prędkości sedymentacji piasku łamanego i wybiieranego ze złóż, a więc o obtoczonych krawędziach [8], [20], [21]. Na rysunku 1 przedstawiono graficznie wyniki pomiarów sedymentacji swobodnej ziaren piasku w temperaturze 12°C. Temperatura ma wpływ na swobodną prędkość sedymentacji mniejszych ziaren piasku a przy większych jej wpływ jest trudny do zauważenia.

Na rysunku 1 przez „piasek” oznaczono piasek kwarcowy.

W pionowych przewodach tłocznym według zaleceń podawanych przez pracownika Uniwersytetu w Berlinie [18], [22] powinno się przyjmować prędkości przepływu nie mniejsze od 1,1 m/s.

Z rysunku 1 jednoznacznie wynika, że przy stosowaniu przyjmowanych powszechnie prędkości przepływu w pionowych przewodach tłocznym nie ma obawy aby gromadził się w nich piasek o nawet najgrubszych ziarnach. Jest to istotne gdyż ich nagromadzenie w pionowym przewodzie tłocznym mogłoby znacznie obniżyć wydajność pompy, a piasek jest po-

wszechnie spotykanym składnikiem ścieków i transportowanych kanalizacją wód deszczowych, szczególnie gdy piasek jest w ziemie używany do posypywania jezdni. Skład granulometryczny piasku usuwanego w piaskownikach oczyszczalni ze ścieków ogólnospławnych dopływających z terenu miejskiego był według pomiarów raportowanych w internecie [http://www.instsani.pl/711/piaskowniki] następujący:

- * ziarna o średnicy >1 mm – 5,4% masy.
- * ziarna o średnicy 0,5-1 mm – 11,8% masy,
- * ziarna o średnicy 0,25-0,5 mm – 34,4% masy.
- * ziarna o średnicy <0,25 mm – 48,4% masy.

Można przyjąć przeciętnie, że na 1000m³ ścieków bytowo gospodarczych w kanalizacji sanitarnej przypada 35 dm³ piasku i żwiru, przy czym w kanalizacji ogólnospławnej przeciętnie do oczyszczalni dopływa dwa razy więcej piasku [0,04 dm³ / (M·d)], niż w kanalizacji bytowo – gospodarczej 0,02 dm³ / (M·d). Tak więc piasek jest wszechobecny w ściekach ale we frakcjach, które z łatwością są transportowane przez pompy pompowni przewalowych.

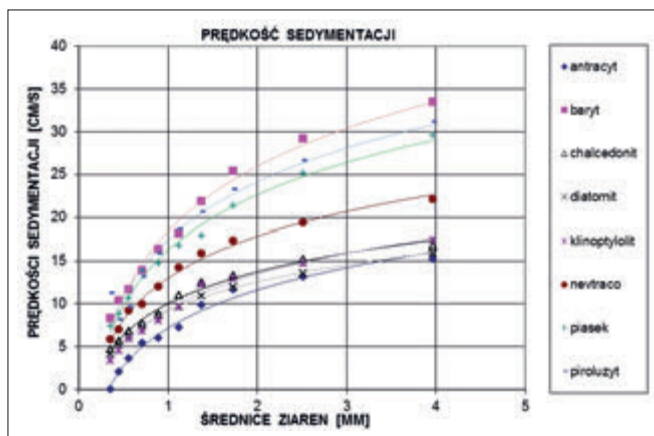
Żwir i drobne kamienie

Średnice pionowych przewodów tłocznych są dobierane na tak duże wartości prędkości przepływu, że wartości prędkości swobodnej sedymentacji ziaren, które mogą ułknąć w przewodzie tłoczonym odpowiadają wielkości drobnych kamieni, dla których wartości Re_0 przekraczają, albo co najmniej bardzo zbliżają się do górnej wartości $2 \cdot 10^5$ podanej w tabeli 2 dla zakresu stosowności zestawionych tam dla przepływów burzliwych.

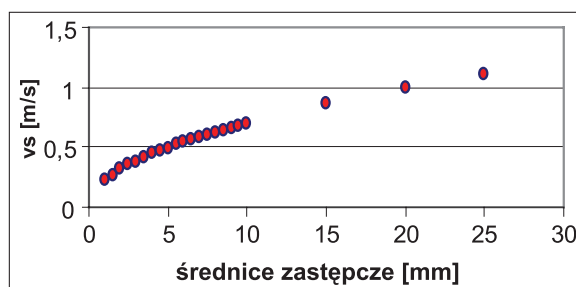
Najcięższym minerałem, z którego zbudowany jest piasek jest kwarc o gęstości właściwej 2,65 g/cm³. Dla tego minerału przeprowadzono obliczenia prędkości swobodnej sedymentacji v_s według równań podanych w tabeli 1 dla ruchu burzliwego. Wynik obliczeń pokazano na rysunku 2. W obliczeniach przyjęto wartość współczynnika kinematycznej lepkości dla temperatury 20°C w wysokości $\nu=0,000001006$ [m² / s]. Dla większych ziaren wartość tej lepkości miała znaczenie jedynie dla określenia wielkości liczb kryterialnych Ar oraz Re_0 , natomiast prędkość swobodnej sedymentacji w warunkach ruchu burzliwego nie zależy od lepkości wody.

Żwir występujący w kanalizacji nigdy nie jest ani dokładnie kulisty ani w pełni kwarcowy i na swojej powierzchni gromadzi zanieczyszczenia o znacznie mniejszej gęstości. Tak więc przedstawione na rysunku 2 prędkości należy traktować jako górną granicę dla przypadków rzeczywistych. W wyniku niewłaściwych działań użytkowników, remontów przewodów kanalizacyjnych oraz dużych rozszczelnień przewodów kanalizacyjnych zawsze może się do kanałów dostać pewna masa dużych zanieczyszczeń stałych. W kanałach o dużych średnicach na ogół panują warunki do ich dalszego transportu w kierunku przepompowni [7]. Niemniej rysunek 2 pokazuje, że nawet przyjmując kształt kuli i gęstość kwarcu dopiero kamienie powyżej 2 cm średnicy

Rys.1 Prędkości swobodnej sedymentacji frakcji piaszczystych zbudowanych z różnych minerałów w zakresie uziarnienia stosowanym do budowy filtrów pospiesznych wody. Rysunek powstał na podstawie pomiarów wykonanych przez T.Siwca [21] przy temperaturze wody 12°C



Rys.2 Prędkości opadania ziaren piasku i żwiru obliczone dla ruchu turbulentnego zgodnie z tabelą 1 dla czystego kwarcu oraz kulistych kształtów ziaren



mogłyby ułknąć w pionowym przewodzie ciśnieniowym, którym do góry płyną ścieki z prędkością zaledwie 1 m/s. O ile pompownia nie jest wyposażona w czyszczące urządzenia mechaniczne to takie kamyczki zapewne z dużym prawdopodobieństwem będą zatrzymane w komorze czerpalnej i nie dostaną się do pompy.

Wpływ na wydajność pompy

W szczególnych przypadkach pompowni o długim pionowym przewodzie tłoczonym (pompownie przewalowe, systemy usuwania wód dołowych w kopalniach), do których dostały się drobne kamienie i są w stanie fluidyzacji w przewodzie tłoczonym, mogą znacznie zmniejszyć wydajność pomp. Jeżeli pozostają zawieszony w ściekach to całkowity układ działających na nie sił (ciężaru, wyporu Archimedesasa oraz siły hydrodynamicznej) jest lekko niestabilny, ale w długim okresie siły te równoważą się. Ziarna te muszą być podtrzymane przez strumień płynących przewodem tłoczonym ścieków, a więc z bilansu sił otrzymuje się równanie (5) pozwalające na obliczenie dodatkowych oporów przepływu.

$$\Delta h_{str}^* = L_{fl}(1 - \varepsilon) \cdot (\rho_z / \rho_w - 1) \quad (5)$$

W równaniu tym wprowadzono następujące oznaczenia:

Δh_{str}^* – dodatkowa strata wysokości ciśnienia wynikająca z utrzymania drobnych kamieni w przewodzie tłoczonym,

L_{fl} – wysokość sfluidyzowanej warstwy ziaren w przewodzie tłoczonym,

ε – porowatość sfluidyzowanej warstwy ziaren,

ρ_z – gęstość ziaren,

ρ_w – gęstość wody.

Przy pompowaniu w pionie dodatkowe opory przepływu wynikające z fluidyzacji za-

ren byłyby jeszcze większe gdyż przepływ w przewodzie tłoczonym nawet przy pompach wirowych nie jest na tyle ustalony w czasie, aby kamienie nie wykonywały znacznie gwałtowniejszych ruchów niż ziarna piasku w złożu podczas płukania, gdy trzeba im się uważnie przyglądać aby zauważyć jakikolwiek ruch w czasie fluidyzacji przy ekspansji złoża 20% do 30%. Przy pompowaniu wody/ścieków w pionie są to wartości, które mogą wyraźnie obniżyć wydajność pompy wirowej. Temat ten nie jest dalej rozwijany gdyż przy pompowaniu ścieków ogólnospławnych, deszczowych, czy bytowo – gospodarczych w pionie prawdopodobieństwo nagromadzenia się kamieni w przewodzie tłoczonym jest małe, a zjawisko to ma znaczenie w specyficznych zastosowaniach pompowni pionowych w przemyśle.

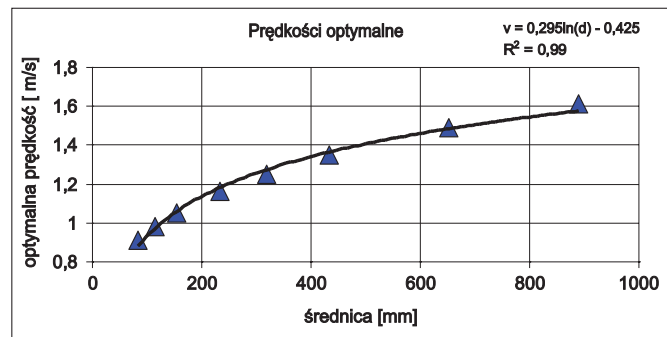
Dobór średnicy przewodu

W pompowni dopuszcza się duże prędkości przepływu [15] z uwagi na koszt kubatury budynku, aczkolwiek przy obecnych cenach energii duże znaczenie przykładają się do zmniejszenia oporów przepływu w pompowni [13]. W zdecydowanej większości ściekowych systemów pompowych koszt inwestycyjny i eksploatacyjny dotyczy głównie przewodów na zewnątrz pompowni. Wybór średnicy takiego przewodu powinien wynikać z zadania optymalizacyjnego na taką średnicę przewodu, dla której całkowite koszty budowy i eksploatacji przewodu są jak najmniejsze. W przypadku przewodów wodociągowych porównuje się koszty energetyczne z kosztami budowy, pomijając zazwyczaj różnicę w kosztach napraw wynikającą z różnic w wielkościach średnicy przewodu [16],[17]. Trudno o prostsze zadanie optymalizacyjne, ale w rzeczywistości projektanci posługują się starymi wytycznymi, gdyż ceny energii, a później robocizny i materiałów

zmieniają się w czasie, a ponieważ infrastrukturę podziemną projektuje się co najmniej na 50 lat, więc przewidywanie zmian cen przez ten okres jest mało realne. Ponadto koszt budowy zależy od uźbrojenia terenu i rodzaju gruntu. Pocięszającą informacją stanowi fakt, że przedstawione na rysunku 3 i stosunkowo nowo obliczone prędkości ekonomiczne dla przewodów stalowych [9] (niestety dla przeciętnych warunków występujących w przemyśle chemicznym, a nie w zaopatrzeniu w wodę) niewiele odbiegają od stosowanych od dawna wytycznych [15]. Prędkości te przedstawiono na rysunku 3.

W przypadku kanalizacyjnych przewodów ciśnieniowych sytuacja jest bardziej skomplikowana gdyż już po dziesięciu minutach przebywania ścieków w przewodzie tłocznym zanika tlen rozpuszczony, a więc występują warunki anoksyczne, to znaczy dla mikroorganizmów jest on dostępny wyłącznie w postaci azotanów i siarczanów. Dopóki dostępne są azotany mikroorganizmy w pierwszej kolejności redukują azot, a dopiero po wyczerpaniu jego dostępności siarkę z siarczanów. Redukcja zachodzi od stopnia utlenienia +6 do -2 i powstają siarczki. To utlenienie siarki zachodzi niemal wyłącznie w biofilmie pokrywającym powierzchnię wewnętrzną przewodu ciśnieniowego, zazwyczaj żeliwnego z wyprawą cementową. To, że do redukcji siarki niemal wcale nie dochodzi w ściekach [3], [5], [6] wynika z faktu, że co prawda występują w nich warunki anoksyczne, ale brak jest odpowiednio dużej populacji bakterii redukujących siarkę. Te bakterie miały dużo czasu aby się namnożyć w biofilmie. Do biofilmu dyfundują siarczany (siarka w białkach jest mało mobilna z uwagi na ich rozmiary) oraz węglowodory, bez których nie ma życia. W niedostatku do potrzeb są niemal zawsze węglowodory, a więc za wyjątkiem ścieków o bardzo niskich stężeniach siarczanów to takie parametry ścieków jak BZT₅, ChZT, OWO decydują o szybkości redukcji siarki, a nie stężenie siarczanów. Powstałe w ten sposób siarczki dzielą się na słabo rozpuszczalne (np. FeS) oraz rozpuszczalne (HS⁻, H₂S). Proporcje pomiędzy HS⁻ oraz H₂S zależą od pH ścieków. Przy pH około 7,2 stężenia molowe HS⁻ oraz H₂S są jednakowe, przy niższych wartościach pH przeważa H₂S, a przy wyższych HS⁻. Zazwyczaj ścieki bytowo – gospodarcze mają wartości pH, przy których 80%-90% siarczków lotnych jest w postaci HS⁻. Siarkowodor częściowo ulatuje do górnej części kanałów grawitacyjnych gdzie jest częściowo zatrzymywany na powierzchni wewnętrznej kanałów betonowych i tam utleniany, co prowadzi do korozji siarczanowej sklepień kanałów. Początkiem procesów prowadzących do korozji siarczanowej jest redukcja siarki w biofilmie i dlatego w licznych modelach matematycznych korozji siarczanowej oblicza się ilość siarczków wytworzonych z jednostki powierzchni wewnętrznej przewodu tłocznego. Mniejsza średnica zmniejsza zarówno powierzchnię biofilmu, jak i skraca czas przetrzymania ścieków w przewodzie tłocznym. Tak więc o ile w przypadku przewodów wodociągowych średnicę należy ustalać porównując koszty budowy i pompowa-

Rys. 3
Stosunkowo niedawno obliczone prędkości ekonomiczne stałych przewodów sieciowych w warunkach przeciętnych dla przemysłu chemicznego



nia, o tyle w przypadku ciśnieniowego transportu ścieków istotny jest jeszcze dodatkowy koszt w postaci usuwania siarkowodoru, ochrony powierzchni położonej poniżej kanału betonowego, lub zmiana decyzji co do materiału, z którego ma on być wykonany. Te ostatnie działania nie rozwiązują problemu odorów. Zagrożenie korozją siarczanową powinno więc decydować o wyborze, w miarę możliwości, mniejszych średnic przewodów tłocznych i nadmierne zabezpieczanie się projektanta przez przyjmowanie zbyt dużych średnic może go narazić na kłopoty w przyszłości, a nawet pozwy sądowe [5,6]. Niemniej zmniejszanie średnic powinno być ostrożne gdyż koszty całkowite wolniej rosną wraz ze średnicą przewodu przy zwiększaniu jej powyżej wartości optymalnej niż przy zmniejszaniu. Tak więc straty poczynione przy przyjęciu średnicy o jedną dymensję mniejszej od optymalnej są znacznie większe od tych, które poniesie się przy przyjęciu średnicy o jedną dymensję większej.

Wnioski

- Konieczne jest przyjmowanie takich średnic kulowych zaworów zwrotnych w pompowniach ścieków aby występujące prędkości przepływu zapewniały pełne otwarcie zaworów. Informacje na ten temat należy uzyskać każdorazowo od producenta.
- Już prędkości około 1m/s w pionowym przewodzie zapewniają z nadwyżką transport najgrubszych ziaren piasku.
- Przy pionowym pompowaniu ścieków i prędkości w przewodzie tłocznym zaledwie 1m/s kamienie o średnicy 20-25mm teoretycznie mogą zostać zatrzymane w przewodzie i tam fluidyzować. Tak zwane pompownie przewałowe mają taką pionową konstrukcję przewodu tłocznego. Zawieszenie kamieni powoduje zwiększenie oporów przepływu, ale zjawisko to zapewne rzadko ma miejsce w przewałowych pompowniach kanalizacyjnych, do których za wyjątkiem sytuacji szczególnych z ziarnistych mineralnych zanieczyszczeń dopływa piasek, a nie kamienie.
- Dobierając mniejsze średnice przewodów tłocznych zmniejszamy ryzyko intensywnej korozji siarczanowej i występowanie odorów. Jednak postępować w tym względzie należy ostrożnie gdyż zmniejszenie średnicy o jeden wymiar poniżej wartości optymalnej przynosi większe straty finansowe niż przewymiarowanie o jedną dymensję.

LITERATURA

- [1] Ackl R.A., Lykholt-Ustrup F., Swienty A., Thamsen P.U., Avoiding sedimentation and air entrainment in pump sump for wet pit pumping stations, Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, AJK2015-FED, July 26-31, 2015, Seoul, Korea, maszynopis 9stron
- [2] Ackl R.A., Swienty A., Thamsen P.U., Assessing the accuracy of the numerical prediction of air entrainment into pump sump, Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'15), The 16th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, Sept. 1-4, 2015, [Opublikowane z drobnymi zmianami w Czasopiśmie Technicznym 1-5/2016, 3-15]
- [3] Dąbrowski W., Wpływ sieci kanalizacyjnych na środowisko, książka akademicka, Politechnika Krakowska, 2004, 218str.
- [4] Dąbrowski W., Pompownie ścieków – uciążliwości eksploatacyjne, Rynek Instalacyjny, 2013,12,69-71
- [5] Dąbrowski W., Czy stężenie siarczanów ma istotny wpływ na korozję siarczanową, część I – Podstawy prognozowania? Gaz, Woda i Technika Sanitarna 2010,11, 25-28
- [6] Dąbrowski W., Czy stężenie siarczanów ma istotny wpływ na korozję siarczanową, część II – Rzeczywisty przykład obliczeniowy, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2010,12,34-38
- [7] Dąbrowski W., Konstrukcyjna krytyka zasad doboru spadków minimalnych kanałów ogólnospławnych, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 1995,5,149-153,
- [8] Dąbrowski W., Korczak P., Strategia płukania filtrów w ujęciu monograficznym, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, 2008
- [9] Genić S.B., Jaćimović B.M., Genić V.B. (2012) Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence, Energy and Buildings, 45, 335-338
- [10] Gerlach S., Rauwald H., Thamsen P.U., Kroeber W., Waschniewski J., Implementation of a cleaning sequence on a wastewater pump of 455 kW, 3rd International Rotating Equipment Conference (IREC) Pumps, Compressors and Vacuum Technology, VDMA, Düsseldorf, 14-15 Sept. 2016, maszynopis 10 str.
- [11] Gerlach S., Thamsen P.U., Cleaning sequence counters clogging – a quantitative assessment under real operation conditions of a wastewater pump, Proceedings of the ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting, FEDSM2017, July 31 – August 3, 2017, Waikoloa, Hawaii, USA
- [12] Grabarczyk C., Hydromechanika filtrowania wody, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2016, 400str.
- [13] Jędral W., Pompy wirowe, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, wyd. II, 2014, Warszawa, 478 str.
- [14] Kawiak J., Ocena techniczna przepompowni ścieków w Muszynie, praca magisterska, PK, 2013
- [15] Knapik K. Bajaj J., Wodociągi, Wydawnictwo PK, 2010, Kraków, 534 str.
- [16] Niemiec A., Dąbrowski W., Dobór optymalnej średnicy rurociągów przesyłowych, Instal 2014, 351, 5, 52-55
- [17] Peters M.S., Timmerhaus K.D., West R.E. (2003) Plant Design and Economics for Chemical Engineers, McGraw-Hill, NY, pp.501
- [18] Pöhler M., Thamsen P.U., Functional performance of wastewater pumps, Session: Eco Design Challenges, Technical paper, International Rotating Equipment Conference 2016, Düsseldorf, manuskrypt wystąpienia, 12 str.
- [19] Richardson J.F., Zaki W.N., 1954, Sedimentation and fluidization – Part I., Trans. Instn. Chem. Engrs. Vol. 32, 35-53
- [20] Świec T., The sphericity of grains of filtration beds applied for water treatment on example of selected minerals, Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Civil Engineering, vol. 10, issue 1, 2007
- [21] Świec T., Warunki płukania filtrów jednowarstwowych i wielowarstwowych wybranych złożeń filtracyjnych, Wydawnictwo SGGW, 2007
- [22] Thamsen P.U., Pompownie ściekowe, szkolenie dla MPWiK w Krakowie, Politechnika Krakowska, czerwiec 2019