



Eksperymentalne badania usuwania zawiesiny mineralnej z syfonów kanalizacji deszczowej

Piotr Wichowski, Kamila Zalewska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa

1. Wstęp

Kanalizacja deszczowa, w przeciwieństwie do kanalizacji sanitarnej, narażona jest na dostawanie się do przewodów zawiesiny mineralnej, najczęściej piasku [4,14]. Zagadnienie usuwania z przewodów nagromadzonej zawiesiny jest istotne z punktu widzenia prawidłowej eksploatacji kanalizacji. Osadzanie się w przewodach części stałych zawartych w ściekach występuje w momencie spadku prędkości przepływu strumienia ścieków poniżej tzw. prędkości hydraulicznego splukiwania zawiesin. Prędkość przepływu ścieków, poniżej której to zjawisko występuje nazywamy prędkością niezamulającą [8]. Zgodnie z obowiązującą normą [11] dotyczącą kanalizacji ciśnieniowej prędkość 0,7 m/s jest prędkością niezamulającą, obowiązującą projektantów. W niniejszej pracy podjęto próbę określenia prędkości, przy której usuwane są zawiesiny mineralne o określonej granulacji z prostoliniowego odcinka poziomego oraz tzw. syfonu.

Z przyczyn ekonomicznych nie jest wskazane projektowanie spadków kanalizacji grawitacyjnej w taki sposób, aby na etapie projektu wyeliminować całkowicie zjawisko sedymentacji osadów gdyż przepływy ścieków w kanalizacji są bardzo zróżnicowane [1, 9]. Zamiast tego projektanci sieci kanalizacyjnych zakładają okresowe usuwanie większości nagromadzonego osadu w czasie przepływów projektowych obliczonych dla natężenia opadu o określonym prawdopodobieństwie jego wystąpienia. W związku z takim działaniem sieci prędkość samooczyszczająca interpretowana jest, jako prędkość rozmywająca nagromadzone osady. Zatem jest to średnia prędkość przepływu fazy ciekłej w przewodzie,

która rozpoczyna zjawisko erozji osadu [5]. Następuje wówczas przemieszczanie cząstek, które może występować w postaci toczenia, saltacji i unoszenia [13]. Autorzy artykułu skupili się na zjawiskach występujących w syfonach. Z tego powodu badania przeprowadzano na dwóch odcinkach rurociągu – w ramionach syfonu nachylonych pod różnym kątem oraz prostym odcinku poziomym. Prosty odcinek miał na swoim celu obrazować zjawiska występujące w przewodach hydraulicznie długich, gdy połączenie syfonowe ma za zadanie pokonanie lokalnej przeszkody (np. kanał, droga). Projekty syfonów zakładają, że powinny być one całkowicie wypełnione cieczą, oraz zaprojektowane w sposób zabezpieczający jego pracę przed zaburzeniem w formie zassania powietrza [2]. Ze względu na całkowite wypełnienie przekroju poprzecznego rurociągu w fragmencie syfonowym zdecydowano wykonać badania ciśnieniowo wymuszając przepływ cieczy.

2. Cel, materiał i metodyka pracy

Celem zrealizowanych badań było ustalenie średnich prędkości przepływu wody, przy których następuje usuwanie nagromadzonej zawiesiny mineralnej o znanej granulacji z przewodu poziomego prostoliniowego oraz przewodu tworzącego tzw. syfon. Po ustaleniu tych prędkości, w etapie drugim, celem badań było określenie czasu potrzebnego do usunięcia zanieczyszczeń z przewodu w zależności od masy nagromadzonej zawiesiny i jej granulacji. Badania zostały wykonane w marcu i kwietniu 2014 roku na terenie Naukowo-Badawczej Stacji Wodociągowej Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Na potrzeby badań wykorzystano piasek wiślany. Piasek rzeczny wybrany został ze względu na małą zawartość frakcji pylastych i drobniejszych, których obecność wpływa na barwę, oraz mętność wody w układzie. Znaczna zawartość tak drobnych frakcji groziłaby znacznym utrudnieniem, lub w skrajnym przypadku nawet uniemożliwieniem prowadzenia obserwacji ruchu zawiesiny mineralnej w układzie. Po przeprowadzeniu analizy sitowej uzyskano 8 frakcji kruszywa, którym na potrzeby opracowania wyników przydzielono liczby od 1 do 8, w kolejności malejących średnic ziaren. Zakres granulacji poszczególnych frakcji zaprezentowano w tabeli 1.

Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie badano charakterystyczne prędkości wpływające na ruch zawiesiny mineralnej wprowadzanej do przewodów.

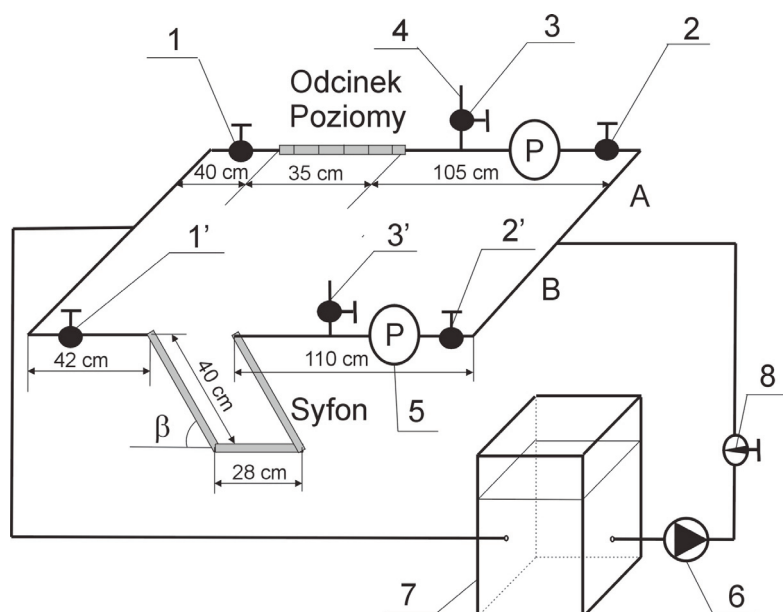
Tabela 1. Zastosowane grubości uziarnienia**Table 1.** Applied granulation

Lp.	Granulacja [mm]	Lp.	Granulacja [mm]
1	3,15–5,00	5	1,00–1,25
2	2,00–3,15	6	0,71–1,00
3	1,50–2,00	7	0,50–0,630
4	1,25–1,50	8	≤ 0,40

W ramach etapu pierwszego na stanowisku pomiarowym (Rys. 1) wprowadzano określone dawki masowe substancji mineralnej o zmiennej granulacji poprzez króciec 4 (otwarty zawór 3) do gałęzi A. Dawki masowe substancji mineralnej dobrane były do konkretnych granulacji (Tab. 5 i Tab. 6). Podczas wprowadzania zawiesiny zamknięte były zawory odcinające 1 i 2 na danej gałęzi, a przepływ cieczy odbywał się gałęzią równoległą. Po zaaplikowaniu zawiesiny zamykano zawór 3, całkowicie otwierano zawór 1, a następnie stopniowo otwierano zawór 2, zwiększając przepływ strumienia cieczy w gałęzi dla odcinka prostego poziomego, jednocześnie obserwując ruch zawiesiny. Tok postępowania powtarzano w gałęzi B podczas ustalania prędkości powodującej usuwanie zawiesiny z syfonu, analogicznie korzystając z zaworów 1'–3'.

Obserwowane odcinki rurociągu miały średnicę 50×3 mm i były wykonane z materiału przezroczystego (plexi), dzięki czemu można było obserwować ruch zawiesiny. Długości odcinków podano na rysunku 1. Wielkość przepływu wody mierzona była przy wykorzystaniu elektromagnetycznego przepływomierza 5 Promag 53 firmy Endress+Hauser [10]. Przepływ cieczy w układzie wymuszony była działaniem pompy 6 Meprozet 65 PSM 3,0/S4B. Aby ograniczyć pulsację strumienia cieczy oraz przyrost temperatury w obiegu zamontowano zbiornik wyrównawczy w postaci beczki 7 z tworzywa sztucznego o pojemności 200 dm^3 . Przez cały czas prowadzenia badań utrzymywano temperaturę wody na poziomie $14^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$, zbliżonym do średniej rocznej temperatury ścieków [3]. Znając wydatek oraz pole przekroju poprzecznego rurociągu obliczono średnią prędkość przepływu wody w rurociągu. W przypadku syfonu badania podzielono na cztery podgrupy, zależne od nachylenia osi ramion syfonu względem podłoża. Wykonano serie badań przy kątach nachylenia $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ oraz 90° (rys. 2.) oraz przy ośmiu zakresach

uziarnienia. W toku badań wykonywano pięć powtórzeń każdego badania, których uśrednione wyniki przedstawiono w dalszej części pracy.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego; 1, 2, 3, (1', 2', 3') – kulowe zawory odcinające, 4 – króciec do dozowania kruszywa mineralnego, 5 – przepływomierz elektromagnetyczny, 6 – pompa obiegowa, 7 – zbiornik wyrównawczy, 8 – zawór iglicowy

Fig. 1. Diagram of the test bench; 1, 2, 3, (1', 2', 3') – shut-off ball valves, 4 – outlet for dosage of mineral aggregate, 5 – electromagnetic flowmeter, 6 – circular pump, 7 – expansion tank, 8 – needle valve

Ze względu na obserwowane formy ruchu w odcinku prostym poziomym wyróżniono dwie charakterystyczne prędkości.

Prędkość minimalna wymywania pojedynczych ziaren (M). Jest to prędkość przy której inicjowany jest ruch zawiesiny dennej występującej zazwyczaj w postaci przemieszczania się pojedynczych ziaren. Prędkość ta jest graniczną, określającą warunki przepływu wody w poziomym rurociągu jako wystarczające, aby nie następowała sedimentacja pojedynczych ziaren zawiesiny przemieszczających się w rurociągu wraz z cieczą.

Prędkość samospłukiwania zawieszin (O.). Prędkość strumienia wody, uznana za wystarczającą do wleczenia w przewodzie nagromadzonej zawiesziny. Ruch zawiesziny po dnie rurociągu jest zauważalny.

W syfonie przy kącie 0° zaobserwowane formy ruchu były tożsame z formami zaobserwowanymi dla odcinka prostego, co związane jest z poziomym ułożeniem osi przewodów w obu przypadkach.

W odniesieniu do pozostałych kątów nachylenia ramion syfonu wyszczególniono trzy charakterystyczne prędkości.

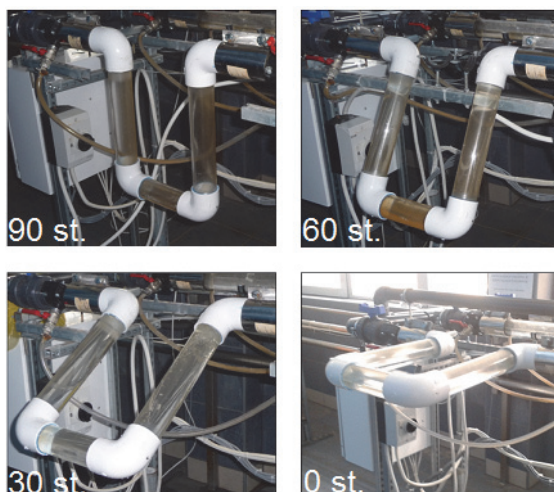
Prędkość minimalna wymywania pojedynczych ziaren (M.). Podobnie jak dla minimalnej prędkości strumienia wody w odcinku prostym strumień cieczy był w stanie unieść z prądem pojedyncze ziarna. Najczęściej były to ziarna, które pokonały cały odcinek z syfonem, sporadycznie zaś ziarna porwane z kolana lub poziomego odcinka syfonu. Oznacza to, że prędkość ta nie jest wystarczająca do unoszenia zawiesziny mineralnej w miejscach sprzyjających osadzaniu ziaren, a jedynie prędkość zapewniająca usunięcie pojedynczych ziaren, które płyną wraz z cieczą.

Prędkość wynoszenia ziaren (Wyn.). Przy tej prędkości obserwowany jest przepływ znacznej części ziaren kruszywa przez cały odcinek syfonu. Ze względu na nieprzezroczystość kolana można było odnieść wrażenie, iż kruszywo, które znajduje się w poziomej części syfonu jest po pewnym czasie doprowadzone do końca odcinka poziomego, a następnie unoszone wraz wodą. Niestety, jest to wrażenie błędne. Po każdej próbie w badaniach następowało całkowite otwarcie zaworu i zwiększenie w nim kilkukrotnie przepływu wody, celem przygotowania do następnej próby i weryfikacji dokładności wymywania. W wyniku zwiększenia prędkości zauważano wydostające się z kolana kruszywo, które nie zostało wcześniej poderwane.

Prędkość samospłukiwania syfonu (O.). Jest to minimalna prędkość, przy której operator miał pewność, że doszło do poderwania wszystkich nagromadzonych w syfonie ziaren.

W etapie drugim mierzono czas przemieszczania się czoła zawiesziny na długości odcinków pomiarowych przy ustalonej masie wprowadzonego kruszywa. Podczas badań zaobserwowano migrację zawiesziny po dnie przewodu poziomego. Zawieszina denna przybierała różne kształty i czas jej przemieszczania się zmieniał. W związku z tym poziomy odcinek pomiarowy podzielono na cztery krótsze odcinki o długości 5 cm każdy i mierzono czas przemieszczania się czoła zawiesziny dennej

w poszczególnych odcinkach. Odcinki były tak krótkie ze względu na małą długość przezroczystej wkładki plexi (35 cm), pomiar możliwy był dzięki zastosowaniu podziałki metrycznej. W przewodach syfonowych mierzono czas całkowitego opróżnienia syfonu z zawiesiny mineralnej przy dwóch dawkach masowych oraz stałej prędkości (ustalonej w pierwszym etapie). Badania wykonano przy czterech zakresach granulacji kruszywa, których wyniki zestawiono w tabeli 2. Gęstość kruszywa określono zgodnie z normą [12].



Rys. 2. Nachylenia ramion syfonu na trasie przepływu strumienia cieczy
Fig. 2. Positions of siphon

Tabela 2. Przedziały granulacji kruszywa stosowane w drugiej serii badań i ich gęstości

Table 2. The ranges used in the second series of tests and their density

Lp.	Granulacja [mm]	Gęstość [g/cm ³]
A	2,00–3,15	2,61
B	1,50–2,00	2,61
C	0,63–1,00	2,65
D	≤ 0,40	2,68

3. Omówienie i dyskusja wyników

3.1. Etap I

W przypadku odcinka prostego, poziomego (P), oraz syfonu o kącie nachylenia ramion 0° (S-0) ze względu na poziomy układ wyróżniono takie same charakterystyczne prędkości. Poniżej zestawiono je razem w tabeli 3.

Tabela 3. Prędkości minimalne wymywania pojedynczych ziaren (M.) oraz prędkości oczyszczania (O.) dla syfonu o kącie nachylenia ramion 0° (S-0) i odcinka poziomego (P)

Table 3. Speed of minimal leaching of individual grains (M.), and speed of cleaning (O.) for siphon arrangement 0 degrees. (S-0) and horizontal section (P)

S-0	Gran. [mm]	Wart. średnie		Liczba Reynoldsa	
		M.	O.	M.	O.
		[m/s]	[m/s]	[-]	[-]
1	3,15–5,00	0,37	0,47	1,38E+04	1,75E+04
2	2,00–3,15	0,39	0,46	1,45E+04	1,72E+04
3	1,50–2,00	0,34	0,4	1,27E+04	1,49E+04
4	1,25–1,50	0,32	0,4	1,19E+04	1,49E+04
5	1,00–1,25	0,27	0,37	1,01E+04	1,38E+04
6	0,71–1,00	0,26	0,35	9,69E+03	1,31E+04
7	0,50–0,63	0,25	0,34	9,32E+03	1,27E+04
8	$\leq 0,40$	0,25	0,33	9,32E+03	1,23E+04
P	Gran. [mm]	Wartości średnie		Liczba Reynoldsa	
		M.	O.	M.	O.
		[m/s]	[m/s]	[-]	[-]
1	3,15–5,00	0,4	0,53	1,49E+04	1,98E+04
2	2,00–3,15	0,38	0,46	1,42E+04	1,72E+04
3	1,50–2,00	0,35	0,39	1,31E+04	1,45E+04
4	1,25–1,50	0,33	0,35	1,23E+04	1,31E+04
5	1,00–1,25	0,31	0,33	1,16E+04	1,23E+04
6	0,71–1,00	0,31	0,33	1,16E+04	1,23E+04
7	0,50–0,63	0,3	0,32	1,12E+04	1,19E+04
8	$\leq 0,40$	0,23	0,3	8,58E+03	1,12E+04

W przypadku pozostałych trzech pozycji syfonu wyniki prezentuje tabela 4.

Widać wyraźną tendencję, że wraz ze zmniejszeniem granulacji ziaren obserwujemy niższe prędkości przepływu wody potrzebne do ich usunięcia. W większości przypadków, szczególnie przy drobniejszych frakcjach, różnica między prędkością minimalną, a prędkością gwarantującą usunięcie zawiesiny mineralnej jest mniejsza w odcinku prostym. Wymagane prędkości przepływu wody mające na celu wypłukanie zawiesiny mineralnej z syfonu o kącie nachylenia 0° i odcinka poziomego są porównywalne, aczkolwiek średnio przy wszystkich badanych granulacjach ziaren prędkości strumienia cieczy wymagane do usunięcia zawiesiny mineralnej z syfonu są o około 3% wyższe.

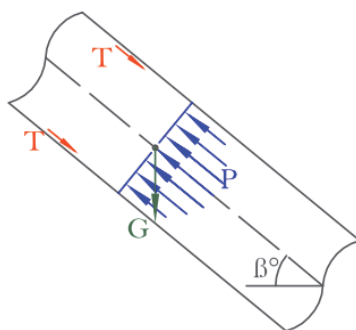
Przyjmując jako odniesienie średnią prędkość splukiwania ziaren przewodu poziomego uwzględniając wszystkie granulacje (0,32 m/s), widzimy, że jest niższa niż w przypadku przewodu pod kątem. W przewodzie ułożonym pod kątem 30° prędkość przepływu wody musi być o około 16% wyższa. W przypadku kąta 60° prędkość ta musi być większa o około 8%, oraz dla kąta 90° o około 33% większa. Z powyższego porównania widać pewien „paradoks”, że syfon o kącie nachylenia 60° w celu samooczyszczenia z zawiesin mineralnych wymaga średnio mniejszej prędkości przepływu wody niż kąt 30° .

Siły działające na ziarna zawiesiny w nachylonych pod kątem ramionach syfonu przedstawiono na rysunku 3. Ziarna, przepływając przez syfon, popychane są przez parcie strumienia wody P, skierowane zgodnie z kierunkiem przepływu. Największe parcie występuje w geometrycznym środku przekroju poprzecznego przewodu, czyli jego osi, dalej od niej, koncentrycznie układają się linie spadku prędkości przepływu, aż do minimalnych przy ściankach przewodu. Siła grawitacji G skierowana jest pionowo w dół. Istotna jest również siła T, przedstawiająca opory ruchu na ściankach przewodu, związane z jego szorstkością i lepkością wody [6,7].

Tabela 4. Prędkości minimalne wymywania pojedynczych ziaren (M.), prędkości wynoszenia ziaren (Wyn.) oraz prędkości oczyszczania (O.) w przewodzie syfonowym ułożonym w powierzchni o kątach 90°(S-90), 60° (S-60) i 30°(S-30).

Table 4. Speed of minimal outflow for single grains (M.), the speed of outflow of the granules (Wyn.) and speed of purify (O.) for siphon of the orientations of 90° (S-90), 60° (S-60) and 30° (S-30).

S-90	Gran. [mm]	Wartości średnie			Liczba Reynoldsa		
		M.	Wyn.	O.	M.	Wyn.	O.
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[-]
1	3,15–5,00	0,37	0,5	0,64	1,38E+04	1,86E+04	2,39E+04
2	2,00–3,15	0,36	0,5	0,63	1,34E+04	1,86E+04	2,35E+04
3	1,50–2,00	0,37	0,44	0,59	1,38E+04	1,64E+04	2,20E+04
4	1,25–1,50	0,34	0,42	0,49	1,27E+04	1,57E+04	1,83E+04
5	1,00–1,25	0,34	0,38	0,49	1,27E+04	1,42E+04	1,83E+04
6	0,71–1,00	0,3	0,33	0,43	1,12E+04	1,23E+04	1,60E+04
7	0,50–0,63	0,27	0,31	0,4	1,01E+04	1,16E+04	1,49E+04
8	<= 0,40	0,16	0,23	0,36	5,97E+03	8,58E+03	1,34E+04
S-60	Gran. [mm]	Wartości średnie			Liczba Reynoldsa		
		M.	Wyn.	O.	M.	Wyn.	O.
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[-]
1	3,15–5,00	0,38	0,49	0,54	1,42E+04	1,83E+04	2,01E+04
2	2,00–3,15	0,37	0,43	0,5	1,38E+04	1,60E+04	1,86E+04
3	1,50–2,00	0,34	0,36	0,44	1,27E+04	1,34E+04	1,64E+04
4	1,25–1,50	0,32	0,33	0,39	1,19E+04	1,23E+04	1,45E+04
5	1,00–1,25	0,24	0,29	0,4	8,95E+03	1,08E+04	1,49E+04
6	0,71–1,00	0,24	0,27	0,35	8,95E+03	1,01E+04	1,31E+04
7	0,50–0,63	0,28	0,29	0,31	1,04E+04	1,08E+04	1,16E+04
8	<= 0,40	0,22	0,24	0,33	8,20E+03	8,95E+03	1,23E+04
S-30	Gran. [mm]	Wartości średnie			Liczba Reynoldsa		
		M.	Wyn.	O.	M.	Wyn.	O.
		[m/s]	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]	[-]
1	3,15–5,00	0,38	0,4	0,48	1,42E+04	1,49E+04	1,79E+04
2	2,00–3,15	0,38	0,38	0,48	1,42E+04	1,42E+04	1,79E+04
3	1,50–2,00	0,34	0,35	0,47	1,27E+04	1,31E+04	1,75E+04
4	1,25–1,50	0,32	0,33	0,44	1,19E+04	1,23E+04	1,64E+04
5	1,00–1,25	0,26	0,32	0,43	9,69E+03	1,19E+04	1,60E+04
6	0,71–1,00	0,27	0,3	0,41	1,01E+04	1,12E+04	1,53E+04
7	0,50–0,63	0,26	0,27	0,4	9,69E+03	1,01E+04	1,49E+04
8	<= 0,40	0,25	0,24	0,4	9,32E+03	8,95E+03	1,49E+04



Rys. 3. Podstawowe siły działające na cząstki zawiesiny w nachylonych pod kątem ramionach syfonu

Fig. 3. The basic forces acting on particles suspended in the angled arms of siphon

Woda w układzie utrzymywana była w stabilnej temperaturze, można więc założyć, że lepkość była stała. W momencie ułożenia przewodu pod kątem wznoszące się pod wpływem siły parcia ziarna przemieszczają się w kierunku dna przewodu na skutek siły grawitacji. Przy ściankach prędkość przepływu cieczy jest niższa, co skutkuje mniejszym parciem strumienia cieczy na ziarna. Powoduje to zsuwanie się osadu po dnie przewodu, prowadząc do powstawania większych wirujących skupisk i wzajemnego oddziaływania cząstek zawiesiny, które następnie są podrywane i unoszone do góry, lub wleczone po dnie przewodu. Zderzając się, wleczone ziarna skupiają się w większe agregaty, które pod wpływem ciężaru ponownie zsuwają się. Dopiero gdy prąd wody porwie kilka lżejszych ziaren ziarna ponownie zaczynają być wleczone. Taka sytuacja powoduje, że cząstki zawiesiny potrafią wielokrotnie pokonać tę samą drogę. Zjawisko to zostało nagrane w formie krótkich filmików, który autorzy udostępniają zainteresowanym, chcącym zobaczyć opisane zjawisko.

Z powyższego opisu widać, że odniesienie zjawiska usuwania zawiesiny tylko do prędkości przepływu wody nie jest wystarczające. Ze względu na aspekt praktyczny – z punktu widzenia eksploatatora sieci – dąży się jednak do ustalenia prędkości, które pozwolą na usunięcie zawiesiny mineralnej z sieci kanalizacyjnej.

3.2. Etap II

Podczas badań realizowanych w etapie I na odcinku poziomym zauważono zmienność prędkości ruchu zawiesiny dennej na długości

przewodu. Z tego powodu odcinek rurociągu podzielono umownie na cztery odcinki, dla których mierzono czas przemieszczania się czoła zawiesiny dennej. Wyniki zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Czas przemieszczania zawiesiny mineralnej przez odcinek prosty
Table 5. Duration of the movement of mineral slurry through by a straight pipe

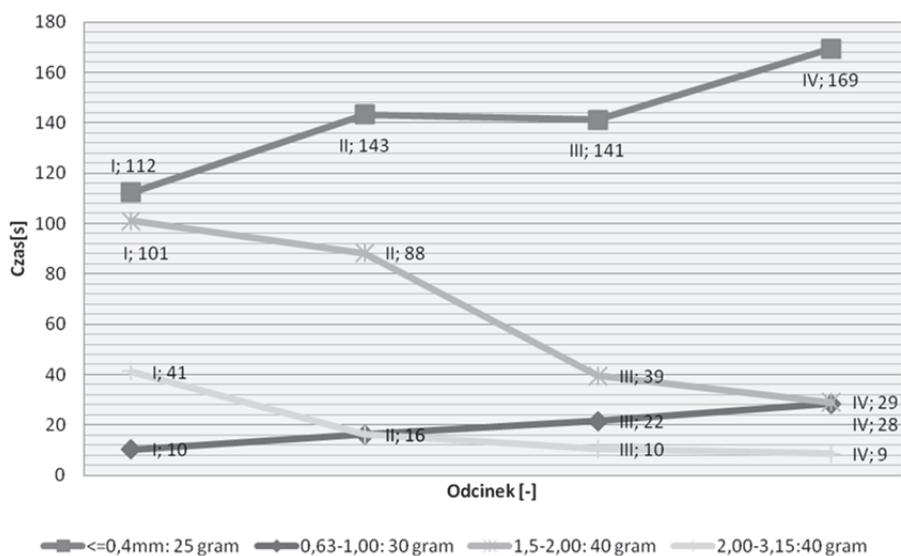
2,0–3,15 mm	V wody = 0,46 m/s $R_e = 1,72E+04$			
	Czas przepływu [s]			
40 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	41	16	10	9
Max	47	26	14	9
Min	28	11	8	8
Max–Min	19	15	6	1
80 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	60	59	34	26
Max	72	88	55	47
Min	46	43	23	18
Max–Min	26	45	32	29

1,5–2,0 mm	V wody = 0,39 m/s $R_e = 1,45E+04$			
	Czas przepływu [s]			
40 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	101	88	39	29
Max	120	143	72	56
Min	77	42	21	15
Max–Min	43	101	51	41
80 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	47	48	52	23
Max	88	84	74	44
Min	33	33	35	15
Max–Min	55	51	39	29

0,63–1,0 mm	V wody = 0,33 m/s $R_e = 1,23E+04$			
	Czas przepływu [s]			
30 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	10	16	22	28
Max	11	19	25	33
Min	9	14	19	26
Max–Min	2	5	6	7
60 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	6	10	20	27
Max	8	12	23	29
Min	5	9	17	25
Max–Min	3	3	6	4

<=0,4 mm	V wody = 0,30 m/s $R_e = 1,12E+04$			
	Czas przepływu [s]			
25 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	112	143	141	169
Max	125	179	172	208
Min	107	125	82	69
Max–Min	18	54	90	139
50 gram				
Nr odcinka	I	II	III	IV
Śr.	82	98	102	94
Max	119	128	121	177
Min	60	78	84	66
Max–Min	59	50	37	111

Mimo, iż dla każdej granulacji wyznaczono inną prędkość przepływu wody pokazano wyniki czasu przemieszczania się czoła zawiesiny dennej na jednym rysunku (rys. 4). Zabieg ten ma na celu ukazanie tendencji zmian prędkości przemieszczania czoła zawiesiny dennej przy różnych granulacjach na kolejnych fragmentach przewodu.



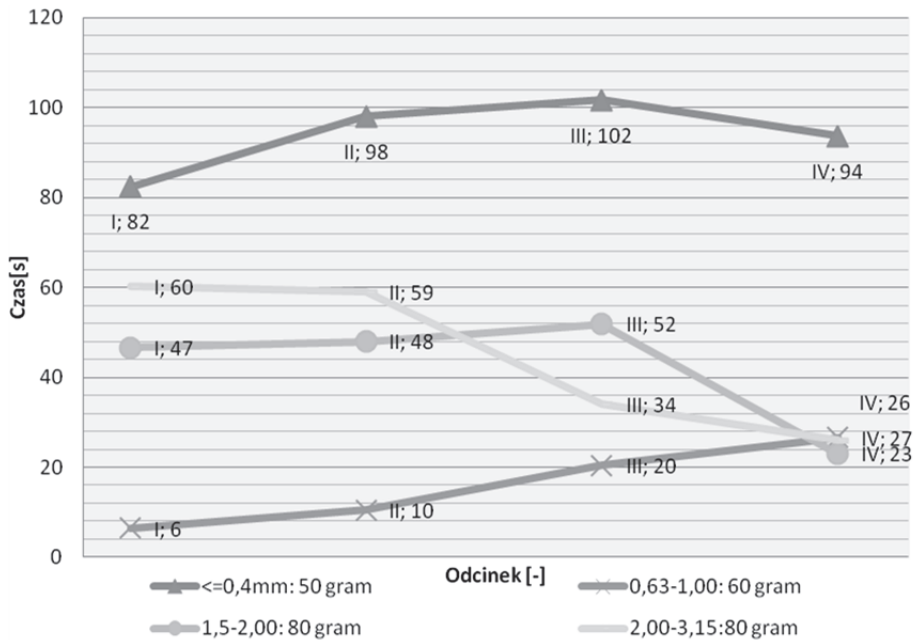
Rys. 4. Czas przemieszczania zawiesiny mineralnej w odcinkach przewodu prostego poziomego przy mniejszych dawkach zawiesiny

Fig. 4. Duration of the movement of mineral slurry measurement in the fragments of straight horizontal pipe at lower doses of suspension

Obserwując zmienność prędkości przemieszczania osadu dennego widać pewne prawidłowości. Zaznaczone ciemniejszymi kolorami granulacje $\leq 0,40$ mm oraz 0,63–1,00 mm, a więc dwie mniejsze, miały największą prędkość przemieszczania w początkowych odcinkach. Pokonanie tego samego dystansu na kolejnych odcinkach przewodu wymagało jednak coraz dłuższego czasu. Odwrotną tendencję zaobserwowano dla dwóch większych granulacji, tam w początkowych odcinkach ruch ziaren jest najwolniejszy.

Prawdopodobnie w przypadku drobniejszych frakcji przepływająca woda „wygładzała” zawiesinę denną ukształtowaną w formę wydmy, nadając jej opływowy kształt i porywając ziarna na jej powierzchni. Ba-

dania prowadzono przy stałej średnicy przewodu 50 x 3 mm. W związku tym średnica przewodu jest niemal 130 krotnie większa od frakcji 0,4 mm, ale już tylko 16 krotnie większa niż ziarna o średnicy 3,15 mm. Małe średnice ziaren oznaczają mniejszą szorstkość powierzchni na granicy fazy stałej i ciekłej niż w przypadku większych frakcji. Można wynioskować, że w przypadku drobniejszych frakcji w początkowych odcinkach pomiarowych prędkość przemieszczania zawiesiny dennej była większa, gdyż wydma nie posiadała jeszcze opływowego kształtu. Po uzyskaniu tego kształtu te same warunki przepływu wody nie oddziaływały już tak efektywnie na prędkość przemieszczania zawiesiny dennej.



Rys. 5. Czas przemieszczania zawiesiny mineralnej w odcinkach przewodu prostego poziomego przy większych dawkach zawiesiny

Fig. 5. Duration of the movement of mineral slurry in the fragments of straight horizontal pipe at much doses of suspension

W przypadku większych frakcji wolne przestrzenie między ziarnami mają większe objętości, niż frakcje mniejsze, co skutkuje większą szorstkością granicy fazy rozproszonej. W związku z tym zmiana kształtu wydmy nie wpływa na znaczące zwolnienie prędkości jej przemiesz-

czania. Wręcz przeciwnie, przy dużych frakcjach każde, pojedyncze ziarno porwane przez prąd wpływało na ciężar wydmy, ułatwiając jej przemieszczanie pod wpływem ciśnienia wody.

Tabela 6. Czas usunięcia zawiesiny z przewodu syfonowego

Table 6. Duration of purifying the siphon

S-60 1,5–2,0 [mm]	V wody = 0,44 m/s Re = 1,64E+04	
	Dawka	
	40 gram	80 gram
	Czas [s]	
Śr. (Vs)	278	348
Max	319	363
Min	122	320
Max–Min	197	43

S-30 1,5–2,0 [mm]	V wody = 0,47 m/s Re = 1,75E+04	
	Dawka	
	40 gram	80 gram
	Czas [s]	
Śr. (Vs)	123	178
Max	167	198
Min	99	162
Max–Min	68	36

S-60 0,63–1,0 [mm]	V wody = 0,35 m/s Re = 1,31E+04	
	Dawka	
	30 gram	60 gram
	Czas [s]	
Śr. (Vs)	334	466
Max	496	475
Min	275	444
Max–Min	221	31

S-30 0,63–1,0 [mm]	V wody = 0,41 m/s Re = 1,53E+04	
	Dawka	
	30 gram	60 gram
	Czas [s]	
Śr. (Vs)	114	259
Max	147	289
Min	69	235
Max–Min	78	54

S-60 <=0,4 [mm]	V wody = 0,33 m/s Re = 1,23E+04	
	Dawka	
	25 gram	50 gram
	Czas [s]	
Śr. (Vs)	225	288
Max	235	294
Min	213	280
Max–Min	22	14

S-30 <=0,4 [mm]	V wody = 0,40 m/s Re = 1,49E+04	
	Dawka	
	25 gram	50 gram
	Czas [s]	
Śr. (Vs)	47	88
Max	51	95
Min	44	80
Max–Min	7	15

Czas przemieszczania się czoła zawiesiny dennej na odcinkach poziomego przewodu przy podwójnych dawkach zawiesiny (rys. 5.) przedstawia podobne tendencje.

Kolejne wyniki dotyczą czasu usuwania zawiesiny mineralnej z przewodów syfonowych w pozycjach nachylonych pod kątem 30° i 60° . Zestawiono je w tabeli 6. W obu przypadkach wyniki pomiarów mają wspólną tendencję. Większa dawka kruszywa wymaga dłuższego czasu potrzebnego, aby zawiesina została usunięta z syfonu. W pracy nie zamieszczono wyników czasu usuwania zawiesiny mineralnej z przewodów syfonowych nachylonych pod kątem 0° i 90° . W przypadku kąta 0° wystąpiły porównywalne do odcinka poziomego prędkości przemieszczania się czoła zawiesiny. W przypadku kąta 90° niezależnie od dawki zawiesiny po osiągnięciu prędkości oczyszczania (O.) następowało natychmiastowe usunięcie zawiesiny z przewodu syfonowego.

4. Podsumowanie i wnioski

Modelowanie warunków przepływu samooczyszczającego na prędkości okazało się bardzo trudnym zadaniem. Na odcinku poziomym pojawiło się zróżnicowanie prędkości przepływu zawiesiny w czasie, z kolei dla syfonu ułożonego pod kątem 30° i 60° wyznaczenie jej byłoby pewnym przekłamaniem, ze względu na wielokrotne opadanie ziaren. Poszczególne próby charakteryzowały się znaczną zmiennością. Odnalezione metody opisu matematycznego wymagałyby wprowadzenia dodatkowych zmiennych. Niewątpliwie wpływ na efektywność usuwania zawiesiny z przewodów kanalizacyjnych będzie miał stosunek objętościowy fazy stałej do wody, gęstość ziaren zawiesiny, ich wielkość oraz kształt, średnica i chropowatość przewodu, kierunek przepływu, temperatura wody, a w konsekwencji jej gęstość i lepkość, itd. Naukowe objaśnienie występujących zjawisk jest bardzo skomplikowane, a specjalistyczne badania z nimi związane są kosztowne. Niniejsza praca miała za swój nadrzędny cel użyteczność, zwłaszcza z punktu widzenia eksploataatorów sieci.

Po wykonaniu analizy uzyskanych wyników pomiarów, wyciągnięto wnioski, które zestawiono poniżej.

- 1) Normatywna prędkość samooczyszczania przewodów na poziomie $0,7$ m/s jest uzasadniona. Nawet najgrubsze ziarna przemieszczały się poniżej tej prędkości, więc osiągnięcie jej jest gwarantem usunięcia badanego rodzaju zawiesiny.

- 2) Syfon o kącie nachylenia ramion 60° w celu usunięcia zawiesin mineralnych wymaga średnio mniejszej prędkości przepływu wody niż bliższy poziomowi syfon o kącie nachylenia ramion 30° .
- 3) Zmienność prędkości przemieszczania zawiesiny dennej w przewodzie poziomym jest związana z grubością ziaren. Najdrobniejsze frakcje charakteryzują się spowolnieniem prędkości swojego ruchu. Najprawdopodobniej wynika to z dużo gładziej powierzchni osadu dennego, formowanego przez przepływ wody, niż w przypadku większych średnic ziaren. Z kolei największe frakcje charakteryzują się wzrastającą prędkością przemieszczania się.
- 4) Wielkość dawki zawiesiny ma kluczowe znaczenie w aspekcie formowania się kształtu zawiesiny dennej. Niewielka ilość osadu formuje się w jedną, spłaszczoną i podłużną wydłużoną. Wraz ze wzrostem ilości zawiesiny wydma wydłuża się, aż do momentu, gdy zaczyna odkształcać się i dzielić na mniejsze części.
- 5) Czas usuwania określonych dawek zawiesiny z przewodów syfonowych nachylonych pod kątem 30° i 60° wyraźnie rośnie wraz z dawką zawiesiny.

Literatura

1. **Banasik K., Ngoc P.:** *Modelling of the effects of land use changes on flood hydrograph in a small catchment of the Płaskowicka, southern part of Warsaw, Poland.* Ann. Warsaw Univ. of Life Sci. – SGGW, Land Reclam. 42(2), 229–240 (2010).
2. **Bednarczyk T.:** *Budownictwo wodno-melioracyjne. Syfony. Podstawy projektowania.* Wyd. Akademia Rolnicza im. H. Kołłątaja w Krakowie. Kraków 1987.
3. **Bugajski P.:** *Zmienność temperatury ścieków w tranzytowym kolektorze kanalizacyjnym.* Gaz woda i technika sanitarna. 2/2012, 53–55, (2012).
4. **Chebbo G., Bachoc A., Laplace D. i Le Guennec B.:** *The transfer of solids in combined sewer networks.* Water Sci. Technol. 1995.
5. **Dąbrowski W.:** *Oddziaływanie sieci kanalizacyjnych na środowisko.* Wyd. Polit. Krakowskiej, Kraków 2004.
6. **Dziubiński M., Prywer J.:** *Mechanika płynów dwufazowych.* Wyd. Naukowo-Techniczne. Warszawa 2009.
7. **Gidaspow D.:** *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions.* Academic Press Inc. San Diego 1993.
8. **Kalenik M.:** *Zaopatrzenie w wodę i odprowadzanie ścieków.* Wyd. SGGW. Warszawa 2009.

9. **Kotowski A., Kaźmierczak B., Nowakowska M.:** *Analiza przeciążeń kanalizacji deszczowej na osiedlu Rakowiec we Wrocławiu wywołanych zmianami klimatu.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 16, 608–626 (2014).
10. **Katalog Firmy Endress+Hauser.** 2010. Karta katalogowa urządzenia Promag 53. s.13 (www.pl.endres.com).
11. **PN-EN 1671:2001** – Zewnętrzne systemy kanalizacji ciśnieniowej.
12. **PN-76/B-06714/06** – Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczenie gęstości pozornej w cylindrze pomiarowym.
13. **Rowiński P.M.:** *Constituent transport. Fresh Surface Water. Vol. II. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).* Developed under the Auspices of the UNESCO.
14. **Sansalone J., Koran J., Smithson J., Buchberger S.:** *Physical Characteristics of Urban Roadway Solids Transported during Rain Events.* J. Environ. Eng. 124(5), 427–440 (1998).

Experimental Studies on Removal of Mineral Suspension from Siphons in Rain Water Piplines

Abstract

The article presents a study on purifying rainwater pipes with mineral suspension. The study was divided into two stages. In the first stage determined the flow rate of conducive to self-cleaning rainwater pipes. The study was conducted for eight granulated mineral suspension for the straight line and the siphon positioned at an angle of 0° , 30° , 60° , and 90° . Determined the minimum speed at which there was no sedimentation of the slurry flowing in a stream of water and so-called. purification speed at which followed complete purification the measuring section of the accumulated mineral suspension. On the basis of a clear trend can be seen that with the decrease in grain size of grains we observe lower speed needed to remove them. In most cases, particularly for the finer fractions, the difference between the minimum speed and the speed of purification is less than the straight section. Taking as reference the average speed of straight horizontal purification for all the granulation, the speed for the siphon: arranged at an angle of 0° is about 3% higher, at 30° is about 16% higher, at an angle of 60° by about 8% higher, and to siphon arranged at an angle of 90° by about 33% higher. From the above indicates a paradox that the siphon with an inclination of 60° in order to clean the mineral suspensions requires an average water velocity less than the level of the proximal angle of 30° . The results were discussed and compared with the recommendations of [PN EN 1671: 2001]. Even the grain of the largest granu-

lation moved at speeds below the normative 0.7 m/s, so it is a guarantee to achieve the removal of the tested types of suspension.

At the second stage for specified speed measured self-cleaning wire flush time specified dose of the suspension. On the straight horizontal and horizontal sections of the siphon the suspension moves in the form of migrant suspension. It was observed that the migration speed of the bottom slurry is variable in time. Therefore, straight horizontal section measuring divided into four sections of equal length and the time of migration suspension by the individual sections. This time depends on the granulation suspension. Finer fractions are characterized by a slowdown in the speed of movement in subsequent sections, with larger fractions of the trend is reversed. Analyzing the cleaning duration of straight horizontal depending on the weight accumulated in the benthic suspension have failed to discern clear trends. This involves a much larger number of repetitions. In the case of the siphon with an inclination angle of 0° it was difficult to identify trends as for the horizontal section. When the siphon slope at 30° and 60° results of the measurements clearing time are common pattern. Higher dose of aggregate requires a longer time for cleaning. For the siphon with a slope of 90 degrees, regardless of the number of suspensions at speeds reaching purifying cleansing followed rapid siphon.

Słowa kluczowe:

syfon, kanalizacja deszczowa, zawiesina mineralna, prędkość oczyszczająca

Keywords:

siphon, storm water drainage, mineral suspension, speed purifying