

Jadwiga Królikowska

## **URZĄDZENIA INŻYNIERSKIE Z RUCHEM WIROWYM STOSOWANE NA SIECI KANALIZACYJNEJ DO ZMNIEJSZENIA ŁADUNKU ZAWIESINY W ŚCIEKACH DESZCZOWYCH**

**Streszczenie.** Główne zanieczyszczenie ścieków opadowych stanowi zawiesina, która z reguły jest nośnikiem większości innych substancji występujących w spływach opadowych. Ładunek zawiesiny odprowadzany do środowiska wodnego jest regulowany prawem. W praktyce inżynierskiej do usuwania zawiesiny ze ścieków opadowych z powodzeniem można wykorzystać urządzenia z ruchem wirowym np. osadniki wirowe, przelewy o specjalnej konstrukcji wykazujące przewagę nad tradycyjnymi osadnikami poziomymi.

**Słowa kluczowe:** zawiesina, prędkość opadania, hydroseparator, efektywność sedymentacji.

### **WPROWADZENIE**

W Polsce wzrasta świadomość zagrożenia, jakie stwarza nieuporządkowana gospodarka wodami opadowymi. Produktem transformacji opadu w spływ powierzchniowy są ścieki opadowe. Obecnie obowiązujące przepisy nakładają obowiązek oczyszczania wód opadowych i procesowych, odprowadzanych m.in. z zanieczyszczonych centrów miast, terenów przemysłowych, baz transportowych, parkingów itp. i określają dopuszczalne ilości wód (ścieków) opadowych, odprowadzanych do ich odbiorników.

Znowelizowane w ostatnich latach i dostosowane do prawa Unii Europejskiej (UE) polskie przepisy prawne w zakresie gospodarki wodnej i ochrony środowiska wyraźnie wymagają, aby wody opadowe traktować jako element zrównoważonego rozwoju miasta przy wykorzystaniu metod maksymalnie naśladowujących spływ i retencję deszczu w warunkach zbliżonych do naturalnych i odnosić do rozbudowy, rehabilitacji i modernizacji istniejących systemów kanalizacyjnych jak też budowy nowych. Zrównoważony rozwój jest podstawą przepisów UE. Obszar prawa UE dotyczący ochrony środowiska obejmuje około 70 dyrektyw, zamienianych i uzupełnianych kilkakrotnie dyrektywami „siostrami” oraz 21 rozporządzeń. Takie podejście ma zahamować negatywny wpływ tradycyjnych metod postępowania z wodami opadowymi na środowisko oraz zrehabilitować go na tyle na ile jest to możliwe. Wśród podstawowych zasad takiego podejścia można wymienić:

---

Jadwiga KRÓLIKOWSKA – Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska

- zasadę stosowania najlepszych dostępnych technologii,
- zasadę dostępności do informacji o stanie środowiska,
- zasadę zapobiegania zanieczyszczeniom lub unieszkodliwiania ich u źródła,
- zasadę odpowiedzialności zanieczyszczającego za szkodę „zanieczyszczający płaci”,

Warunki, jakie należy spełnić przy wprowadzeniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego reguluje rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. Do najistotniejszych regulacji należą §19 ust. 1, określający rodzaj terenów zanieczyszczonych, na których mogą znajdować się powierzchnie szczelne wymagające określenia norm jakościowych dla odprowadzanych z nich wód opadowych lub roztopowych. Według przepisów następujące powierzchnie wymagają takich działań: tereny przemysłowe, składowe, bazy transportowe, porty, lotniska, tereny miast, budowli kolejowych, drogi zaliczane do kategorii krajowych i wojewódzkich oraz powiatowych klasy G, parkingi o powierzchni powyżej 0,1 ha. Wody opadowe lub roztopowe odprowadzane z tych powierzchni powinny być oczyszczone w ilości jaka powstaje z opadów o natężeniu co najmniej 15 l/s na 1 ha w taki sposób, aby na odpływie do odbiornika zawartość zawiesin była mniejsza niż 100 mg/l, substancji ropopochodnych nie większa niż 15 mg/l. Przyjęcie normatywnej wartości 15 l/s ha powierzchni szczelnej jest wynikiem wieloletnich badań na zlewniach zurbanizowanych, które wykazały, że ok. 90 % czasu trwania opadów spływ z nich nie przekracza tej wartości. Jest to zatem wartość natężenia, przy której najczęściej występuje zjawisko „pierwszego spływu”, czyli wartość przyjęta jako zalecana w niektórych krajach naszej strefy klimatycznej.

Dla wód opadowych i roztopowych odprowadzanych z powierzchni szczelnej obiektów magazynowania i dystrybucji paliw rozporządzenie przyjmuje wartość natężenia, jakie powstaje z opadów o częstotliwości występowania jeden raz w roku i w czasie trwania 15 minut, lecz w ilości nie mniejszej niż powstająca z opadów o natężeniu 77 l/s na 1 ha.

Celem artykułu jest przegląd rozwiązań do usuwania zawiesiny ze ścieków opadowych, które mogą być zastosowane bezpośrednio na sieci kanalizacyjnej obszarów zabudowanych.

## **OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA JAKOŚCIOWA ŚCIEKÓW OPADOWYCH**

W ściekach opadowych mogą znajdować się różnego rodzaju zanieczyszczenia, ponieważ opady zanieczyszczają się już w przyziemnych warstwach atmosfery, wychytując z powietrza pyły, cząstki niespalonego paliwa, aerozole, różne substancje stałe i gazowe usuwane do atmosfery przez zakłady przemysłowe, urządzenia grzewcze, środki transportu itp. Jednakże większa część zanieczyszczeń dostaje się do ścieków opadowych w czasie ich spływu po powierzchni kanalizowanego terenu.

Ładunek zanieczyszczeń niesiony z wodami deszczowymi jest porównywalny z ładunkiem zanieczyszczeń pochodzącym ze ścieków komunalnych. Stosunek rocznych ładunków zanieczyszczeń w ściekach opadowych do ładunków zanieczyszczeń w surowych ściekach komunalnych waha się od kilku do kilkudziesięciu procent, w zależności od wskaźnika zanieczyszczenia (Królikowski A i inni, 2005, Zawilski M, 1997). Stężenie zanieczyszczeń w ściekach opadowych ulega znacznym wahaniom w czasie trwania odpływu, zależnie od natężenia deszczu, wielkości i sposobu ukształtowania zlewni oraz zdolności retencyjnej sieci. Z przeprowadzonych dotychczas badań (Babelski Z, 1982, Bartkowska I, 2000, Garbarczyk K, 2005, Garbarczyk K, 1997, Królikowski A i inni, 2005, Królikowski A i inni, 2003, Królikowski A, 2008) wynika, że najbardziej zanieczyszczona jest pierwsza fala opadu, a stężenie występujących w niej zanieczyszczeń osiąga wartości maksymalne w ciągu pierwszych 15-60 minut trwania opadu. Dotyczy to głównie zlewni o niewielkiej powierzchni do 50 ha. Gdy system kanalizacyjny obsługuje rozległy obszar, czyli gdy występuje długi czas koncentracji terenowej, faza podwyższonego zanieczyszczenia obejmuje większą część odpływu.

Na jakość i właściwości ścieków opadowych wpływa szereg czynników, spośród których należy wymienić:

- sposób zagospodarowania i ukształtowanie zlewni,
- rodzaju nawierzchni dróg, placów,
- rodzaj i natężenie ruchu,
- sposobu utrzymania i eksploatacji nawierzchni utwardzanych (sposób i częstotliwość czyszczenia powierzchni utwardzonych, sposobu zimowego utrzymania dróg i zwalczania gołoledzi, sposoby i częstotliwości prowadzenia robót budowlanych i remontowych),
- zanieczyszczenia atmosfery,
- charakterystyka opadu (rodzaj opadu: deszcz, śnieg, grad, długość przerwy od opadu poprzedniego, natężenie opadu, czas trwania opadu).

Ścieki opadowe można charakteryzować następującymi grupami zanieczyszczeń (Heidrich Z, Witkowski A, 2005, Osmólska-Mróż, 1992, Osuch-Paździńska E, 2004, Praca zbiorowa, 2002):

- zawiesiny opadające i nie opadające oraz ciała stałe rozpuszczone,
- substancje nieorganiczne,
- materia organiczna,
- drobnoustroje, zwłaszcza chorobotwórcze, bakterie, wirusy,

Główne zanieczyszczenie ścieków opadowych stanowi zawiesina, która z reguły jest nośnikiem większości innych substancji występujących w spływach opadowych. Drobne frakcje zawiesin (o dobrze rozwiniętej powierzchni adsorpcji) agregują takie zanieczyszczenia jak związki organiczne, metale ciężkie, bakterie, znaczna

część zanieczyszczeń olejowych. Na jakość zawiesiny mają wpływ również zjawiska zachodzące na powierzchniach zawiesin np. wymiana jonowa, proces katalizy z udziałem enzymów i katalizatorów mineralnych. Zawiesiny w ściekach opadowych to pyły, aerozole znajdujące się w powietrzu, zanieczyszczenia spłukiwane z powierzchni zlewni, produkty ścierania nawierzchni i opon, zmiotki uliczne i pozostałości niespalonych paliw oraz erozja gruntu, środki stosowane w walce z gołoledzią, środki wspomagające uprawę itp. W ściekach deszczowych przeważa zdecydowanie zawiesina mineralna; zawiesina organiczna pojawia się w przypadku takich zlewni jak place targowe, tereny zielone, a także jesienią na skutek opadania liści. Rozkład wielkości cząstek występujących w wodach opadowych z terenów zurbanizowanych charakteryzuje się dużą zmiennością i jest cechą indywidualną każdej zlewni. Są zlewnie zdominowane przez zawiesiny gruboziarniste, są i takie, w których dominują zawiesiny drobnoziarniste.

Stężenie zawiesin waha się w znacznym zakresie i zwykle przekracza dopuszczalną przepisami wartość. Wysokie stężenie – rzędu kilku czy kilkunastu tysięcy mg/l obserwuje się w spływach ze zlewni nieuporządkowanych, na których występuje erozja podłoża z nieuszczelnionych powierzchni. Znaczne stężenie zawiesiny występuje również w spływach roztopowych, często przewyższające jej stężenie w ściekach deszczowych. Zawiesina ma wtedy charakter mineralny, szczególnie gdy do zapobiegania gołoledzi stosuje się piasek lub inne kruszywa mineralne.

Za źródłem naukowym (Królikowski A i inni, 2005, Królikowski A 2008), można przyjąć, że z 1 ha nieprzepuszczalnej powierzchni spływa rocznie 655 kg zawiesiny, a przeciętnie ciężar właściwy zawiesin kształtuje się w granicach 2,2 – 2,6 g/ml. Rozkład zawartości wybranych zanieczyszczeń ścieków deszczowych w zawieszynie ogólnej wynosi odpowiednio: ChZT 83-92%, BZT5 90-95%, NTK 65-80%, Węglowodory 82-99%, Ołów 97-99%. W tabeli 1 przedstawiono stężenie zanieczyszczeń w zależności od fazy spływu; oczywiście w kanale stężenie jest najwyższe.

**Tabela 1.** Stężenie zanieczyszczeń wód deszczowych, spływów z dachów, odpływów do kanalizacji deszczowej (Heidrich Z, Witkowski A, 2005)

**Table 1.** Concentration of sediments in stormwater, rain water flow from rooftops, stormwater drain content (Heidrich Z, Witkowski A, 2005)

Rodzaj próby	BZT <sub>5</sub> [mgO <sub>2</sub> /l]	Zawiesina [mg/l]
Wody deszczowe – opad atmosferyczny	2,4–31	0–58
Spływ z dachów	19–74	0–440
Odpływ do sieci kanalizacyjnej deszczowej	20–500	5–40 000

W praktyce głównymi źródłami zanieczyszczenia wód odbiornika zawiesiną są przelewy burzowe. W Polsce, choć w ostatnich latach przeważała tendencja do budowy kanalizacji rozdzielczej, centra dużych miast są niemal wyłącznie obsługiwane

przez kanalizację ogólnospławną. Od 30% do 40% obszarów miejskich Polski jest zdominowanych przez ten system kanalizacji. W innych krajach Europy udział ten jest porównywalny albo większy; większy bo kanalizacja budowana była tam wcześniej niż w Polsce (Błaszczuk P, 1999, Dąbrowski W, 2007).

Negatywny wpływ przelewów burzowych na jakość wód odbiorników potęguje przeciążenie kanalizacji ogólnospławnej, które wynika ze wzrostu gęstości zaludnienia oraz podłączenia kanałów ściekowych rozdzielczej kanalizacji przedmieść do istniejącej kanalizacji ogólnospławnej śródmieścia.

Podstawą przy projektowaniu przelewów burzowych jest kryterium jakościowe ochrony wód odbiornika wyrażone najczęściej dopuszczalnym stężeniem zanieczyszczeń w ściekach odprowadzanych przelewem do odbiornika. Obowiązujące w tym zakresie Rozporządzenie Ministra Środowiska z 24 lipca 2006 roku ustala krotność działania przelewów. Podstawą do określenia tej krotności mają być obserwacje działania istniejących przelewów lub zweryfikowane modele symulacyjne. Okres obserwacji opadów, na podstawie których powinno się określać krotność działania przelewów określono na 10 lat. W Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 29 listopada 2002 roku postawiono wymaganie, aby przelew nie działał zanim odpływ z hektara szczelnej powierzchni nie przekroczy 6 l/s zakładając, iż powyżej tej wartości parametry jakościowe zrzucanych ścieków będą już lepsze (natężenie spłukujące).

### **Sposoby ograniczenia zrzutu ładunku zanieczyszczeń do odbiornika**

Wśród metod i technologii stosowanych w celu ograniczenia ilości zanieczyszczeń odprowadzanych do środowiska wodnego można wyróżnić:

- metody i technologie ograniczające przedostawanie się zanieczyszczeń do wód opadowych,
- metody i technologie podczyszczania wód opadowych,
- metody i technologie wspomagające te procesy.

Do najprostszych działań w ramach metod i technologii ograniczających przedostawanie się zanieczyszczeń do wód opadowy będzie zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do atmosfery, sprzątanie powierzchni zlewni, optymalizacja zużycia i rodzaju stosowanych środków przeciw oblodzeniowych, dbałość o stan techniczny nawierzchni drogowych, sieci kanalizacyjnych i urządzeń sieciowych.

Urządzenia inżynierskie stosowane na sieci kanalizacyjnej do podczyszczania ścieków deszczowych wykorzystują proces sedymentacji oraz flotacji. Są to piaskowniki, osadniki oraz separatory substancji ropopochodnych. Dobór rozwiązania technicznego do podczyszczania ścieków deszczowych uzależniony jest od rodzaju odbiornika oraz stopnia wrażliwości i warunków przestrzennych zlewni. Poważną trudność w doborze sposobu oczyszczania ścieków deszczowych stanowi to, iż nie można mówić o typowym składzie ścieków deszczowych.

Wśród metod i technologii wspomagających ograniczenie przedostawania się zanieczyszczeń do wód opadowych oraz proces podczyszczania wód opadowych wymienia się:

- rozwiązania zgodne z naturalnym obiegiem wody w przyrodzie, pozostawiające wodę w miejscu opadu deszczu i wsiąkanie w grunt (skrzynki, komory drenażowe),
- budowanie zbiorników retencyjnych zmniejszających krotność działania przelewów,
- projektowanie przelewów burzowych o specjalnej konstrukcji, czyli zapewniających ograniczenie częstości i poprawę jakości zrzutu ścieków przelewających się do odbiornika,
- projektowanie właściwych spadków dna przelewów burzowych w celu zapobieganiu odkładaniu się w nich osadów w czasie pogody bezdeszczowej,
- zapobieganie podtopieniom kanałów w miejscach połączeń dla uniknięcia lokalnego nagromadzenia osadów kanalizacyjnych,
- zapewne minimalnego spadku kanału, celem zabezpieczenia przed nadmiernym gromadzeniem się osadów w kanale,
- lokalizowanie tam gdzie jest to możliwe, ostatniego przelewu za osadnikami wstępnymi w oczyszczalni ścieków,
- łączenie przelewów ze zbiornikami retencyjnymi w taki sposób, aby ścieki przelewały się przez pierwszy przelew z kanału do zbiornika, a dopiero po wypełnieniu zbiornika – przez umieszczony w nim przelew do rzeki.

### **Urządzenia inżynierskie stosowane na sieci kanalizacyjnej do zmniejszenia ładunku zawiesiny w ściekach deszczowych**

Podczyszczanie ścieków opadowych powinno się zaczynać w miejscu wprowadzenia ich do kanalizacji. Główne zanieczyszczenie ścieków opadowych czyli zawiesina ogólna usuwana jest w osadnikach, piaskownikach, zbiornikach retencyjno-sedymentacyjnych oraz przy zastosowaniu przelewów burzowych o specjalnej konstrukcji, tj. hydroseparatorów.

Uważa się za celowe poświęcenie dalszej części tej pracy szczególnie osadnikom jako urządzeniom stosowanym najczęściej oraz innowacyjnemu rozwiązaniu przelewu burzowego tj. hydroseparatorowi.

Osadniki do podczyszczania ścieków deszczowych pozwalają wydzielić zawieszoną łatwo opadającą o gęstości większej od  $1 \text{ kg/dm}^3$ . Osadniki te mogą być stosowane:

- do podczyszczania ścieków deszczowych przed wprowadzeniem do odbiornika,
- w ciągu technologicznym przed innymi urządzeniami, które wymagają zabezpieczenia przed nadmierną ilością dopływających do nich zawiesin np. przed separatorami.

Według literatury spotyka się następujący podział osadników (Heidrich Z, Witkowski A, 2005):

- osadniki konwencjonalne (tzw. sedimentacja głęboka, klasyczna),
- poziome podłużne,
- poziome radialne,
- pionowe,
- osadniki wielostrumieniowe (tzw. sedimentacja płytka),
- osadniki wirowe.

Największym problemem z punktu widzenia stosowania technologii oczyszczania wód opadowych jest silna zmienność stężeń zawiesiny w czasie opadów, a także fakt, że stężenia te są zwykle stosunkowo niewielkie przy bardzo dużych natężeniach dopływu. Ustalenie typowego (uniwersalnego) składu granulometrycznego zawiesin opadowych jest mało prawdopodobne. Jednak nawet sam skład granulometryczny transportowanych zawiesin nie jest rozwiązaniem idealnym, gdyż zgodnie ze wzorami Stokesa oraz Newtona wpływ na prędkość sedimentacji ma także gęstość cząstek. Zwykle przyjmowana jako stała i równa  $2650 \text{ kg/m}^3$  (kwarc) jest w rzeczywistości zmienna i zmniejsza się wraz ze zmniejszaniem średnicy cząstek. Zmniejszenie gęstości z  $2650$  do  $2000 \text{ kg/m}^3$  powoduje spadek prędkości opadania o połowę. Tymczasem średnia gęstość osadu pobranego z wpustów deszczowych w Białymstoku (Królikowski A i inni, 200) wyniosła ok.  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Jeżeli do powyższych uwag doda się, że:

- teoretyczne prędkości sedimentacji obliczane są dla ziaren idealnie kulistych, podczas gdy w rzeczywistości są to cząstki izometryczne (konieczne jest wprowadzenie parametru sferyczności cząstek);
- przy dużych stężeniach zawiesiny będzie występować sedimentacja skrępowana;
- na właściwości sedimentacyjne ma wpływ temperatura ścieków (wpływ lepkości, m.in. wzory Lane'a),

to jedyną racjonalną metodą do ustalenia właściwości sedimentacyjnych zawiesin z danej zlewni jest wykonanie testów kolumnowych i wyznaczenie charakterystyki sedimentacyjnej.

Skład frakcyjny zawiesin deszczowych może być zarówno z dominacją zawiesin gruboziarnistych (frakcje piaskowe i żwirowe), jak i drobnoziarnistych o konsystencji „kisielu” (frakcje pyłaste, ilaste i zawiesiny organiczne). Norma drogowa PN-S-02204 zakłada, iż zawiesiny w spływach deszczowych z dróg są uziarnione bardzo drobno i zaleca przyjmować skład frakcyjny zawiesin w następujący sposób:

- średnica ziaren stanowiących wraz z mniejszymi 10% suchej masy  $d_{10}=0,007 \text{ mm}$ ,
- średnica ziaren stanowiących wraz z mniejszymi 50% suchej masy  $d_{50}=0,03 \text{ mm}$ ,
- średnica ziaren stanowiących wraz z mniejszymi 90% suchej masy  $d_{90}=0,4 \text{ mm}$ ,

natomiast prędkość sedimentacji, która pozwala na usunięcie zawiesin o określonych średnicach ziaren, należy przyjmować wg tabeli 2.



**Tabela 2.** Wartości prędkości sedimentacji dla drogowych ścieków deszczowych [PN-S-02204]  
**Table 2.** Values of sedimentation rates for stormwater on roads [PN-S-02204]

Frakcja osadu	Prędkość $V_{10\%}$	Prędkość $V_{50\%}$	Prędkość $V_{90\%}$	Proporcje wagowe
[mm]	[m/h]	[m/h]	[m/h]	[%]
< 0,05	0,13	4,1	11,43	68
> 0,05	13	50	326	32
razem	0,37	7,2	89	100

Prawidłowo zaprojektowany osadnik powinien posiadać odpowiednią powierzchnię czynną, zapewniającą uzyskanie zakładanej stałej sprawności instalacji.

Maksymalne powierzchniowe obciążenie hydrauliczne, jakie powinna posiadać oczyszczalnia ścieków deszczowych np. z dróg, aby usunąć, zgodnie z cytowaną normą drogową, min. 50% zawiesiny drobnej, wynosi 4,1 m/h. Od strony pracy osadnika oznacza to, że zatrzymane w niej muszą być wszystkie zawiesiny o prędkości sedimentacji większej niż 4,1 m/h. Od strony technologicznej oznacza to natomiast, że na każdy 1 m<sup>3</sup>/h przepływających ścieków deszczowych potrzebne jest przynajmniej 0,24 m<sup>2</sup> powierzchni aktywnej, aby utrzymać zakładaną 50%-ową sprawność. Chcąc osiągnąć sedimentację danej frakcji zawiesin należy zastosować osadnik o obciążeniu hydraulicznym odpowiednim dla sedimentacji tej frakcji, wyliczony każdorazowo dla danej zlewni. Na „intensyfikację” sedimentacji można wpływać np. poprzez zastosowanie różnego typu deflektorów, wkładów wielostrumieniowych, bądź specyficzne konstrukcje osadników wymuszających przepływ wirowy, jednak nie zmienia to podstawowego warunku poprawnego funkcjonowania i projektowania osadników ścieków deszczowych.

Miarą skuteczności działania osadników jest stopień usunięcia zawiesin określony wzorem:

$$E = \frac{c_o - c}{c_o} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

- skuteczność działania osadnika [%],
- stężenie zawiesin w wodach dopływających do osadnika [kg/m<sup>3</sup>],
- stężenie zawiesin w wodach odpływających z osadnika [kg/m<sup>3</sup>].

Efektywność sedimentacji zależy od różnych czynników, między innymi od wymiaru, struktury i gęstości cząstek, ich stężenia, temperatury wody oraz warunków hydraulicznych w osadniku.

Parametrami obliczeniowymi osadnika są:

- przepływ obliczeniowy  $Q_{ob}$  [m<sup>3</sup>/h],
- czas osadzania  $t_s$  [h],



- prędkość osadzania  $v_s$  [m/s],
- obciążenie hydrauliczne powierzchni osadnika  $T$  [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.h],
- prędkość przepływu  $v_p$  [m/s]

Charakter przepływu w osadniku określa się za pomocą liczby Reynoldsa  $Re$

$$Re = \frac{v_p \cdot R_h}{\gamma} \quad (2)$$

gdzie:

- prędkość przepływu ścieków w osadniku [m/s],
- promień hydrauliczny [m],
- lepkość kinematyczna [m<sup>2</sup>/s].

W osadnikach występują [28]:

- przepływ laminarny, gdy ,
- strefa przejściowa, gdy ,
- przepływ burzliwy, gdy

Przepływ o charakterze laminarnym występuje zazwyczaj tylko w osadnikach wielostrumieniowych. Wymagane jest, aby prędkość przepływu w klasycznym osadniku nie przekraczała wartości powodującej powstanie ruchu burzliwego w osadniku tj.  $\leq 0,01$  m/s.

O stabilności przepływu (zachowanie jednakowej postaci przepływu pomimo występujących zaburzeń) świadczy liczba Froude'a  $Fr$ .

$$Fr = \frac{v_p^2}{g \cdot R_h} \quad (3)$$

gdzie:

- prędkość przepływu ścieków w osadniku [m/s],
- promień hydrauliczny [m],
- przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>].

Im przepływ jest bardziej stabilny, tym bardziej równomierny jest rozkład prędkości w przekroju osadnika. Prędkość przepływu powinna być tak dobrana, aby liczba Reynoldsa nie przekraczała 12 500, a liczba Froude'a nie była mniejsza od 10<sup>-6</sup>.

Obniżka zawiesiny w osadnikach poziomych wynosi od 60% do 80% w zależności od obciążenia hydraulicznego i średnicy zatrzymywanych ziaren.

Zwiększenie efektu sedymentacji można uzyskać powiększając powierzchnię sedymentacji, jak to ma miejsce w osadnikach wielostrumieniowych, stosując np. układ równoległych płyt. Osadniki wielostrumieniowe należą do grupy osadników przepływowych. Charakter ich pracy polega na podziale głębokiego strumienia cie-

czy (ścieków poddanych procesowi sedymentacji) na wiele płytkich strumieni, płynących równolegle w oddzielnych przewodach sedymentacyjnych.

Osadniki oparte na formule wirowej poprzez wydłużenie drogi przepływu, przy zachowaniu równocześnie niewielkiej powierzchni, pozwalają uzyskać porównywalne efekty zmniejszenia zawiesin przy 2÷5 krotnie większych obciążeniach hydraulicznych.

Zastępując ruch prostoliniowy w konwencjonalnych przelewach burzowych ruchem wirowym pozwala połączyć funkcję regulatora natężenia przepływu z funkcją podczyszczania ścieków deszczowych tj. usuwania ze ścieków deszczowych zawiesiny, głównie mineralnej. Istnienie warunków wirowych przepływu powoduje efekt oddzielania ciał stałych, w których osiadające cząstki są przechwytywane przez wtórny przepływ dolnych prądów, a siła odśrodkowa przesuwawia zawieszone części stałe do strefy przyściennej. W strefie tej zachodzi proces sedymentacji oraz flotacji. W wyniku rozdziału faz powstają dwie strugi: jedna o mniejszym stężeniu fazy stałej, odprowadzana do odbiornika i druga odprowadzana do kolejnego kanału lub do oczyszczalni ścieków (Brombach H, 1987, WeiB G.J, 1997, Dąbrowski W, 2004, Królikowska J, 2006, Królikowska J, 2008).

Pierwszy przelew burzowy typu VORTEX zaprojektowany został w roku 1960 przez Bernarda Smissona, następnie w latach siedemdziesiątych skonstruowany został przelew typu SWIRL. Kolejne badania dotyczące przelewów burzowych prowadzone były w Wielkiej Brytanii w latach osiemdziesiątych i doprowadziły do stworzenia hydroseparatora o nazwie STROM KING czyli KRÓL BURZ.

Badania pilotowe i laboratoryjne prowadzone przez Halliwell i Saul (1980), Luyckx i Berlamont (2002) potwierdziły, że skuteczność oddzielania ciał stałych w przelewach wirowych  $\eta$  jest funkcją następujących zmiennych:

$$\eta = f(Q_{wej}, q, v_s, D, d, h, v) \quad (4)$$

gdzie:

- $Q_{wej}$  – dopływ do hydroseparatora,
- $g$  – jednostkowe obciążenie,
- $v_s$  – krytyczna prędkość cząstek (prędkość opadania),
- $D$  – średnica komory wirowej,
- $d$  – średnica rury wlotowej,
- $h$  – wysokość korony przelewowej,
- $v$  – kinematyczna lepkość.

Przyjęto hipotezę, że skuteczność oddzielania jest funkcją wtórnych prądów napędzanych przez wpływy warstwy granicznej, które są zależne od lepkości cieczy, natomiast powierzchnia swobodna (wpływ ciężkości) ma tylko nieznaczny

wpływ na skuteczność oddzielania i można ją pominąć. Ostatecznie skuteczność oddzielania ciał stałych dla wirowych separatorów jest pochodną następujących grup bezwymiarowych:

$$\eta = f\left(\frac{v_s}{v_i}, \frac{h}{D}, \frac{D}{d}, \frac{q}{Q}\right) \quad (5)$$

gdzie:

$v_i$  – prędkość przepływu ścieków

pozostałe parametry j.w.

Luyckx i Berlamont (2002) sformułowali równanie, które opisuje skuteczność retencji osadów przy optymalnych rozmiarach hydroseparatora w postaci:

$$\eta = 1 - \left(1 - \frac{q}{Q_{wej}}\right) \cdot \exp\left[-30 \cdot f_1\left(\frac{v_s}{v_i}\right) \cdot f_2\left(\frac{h}{D}\right) \cdot f_3\left(\frac{D}{d}\right) \cdot f_4(Re)\right] \quad (6)$$

gdzie:

Re – liczba Reynoldsa

Pozostałe parametry j.w.

Formuły matematyczne dla poszczególnych funkcji są następujące:

$$f_1\left(\frac{v_s}{v_i}\right) = \max\left\{\frac{v_s}{v_i} \cdot \left[1 - 2,5 \cdot \exp\left(-250 \cdot \frac{v_s}{v_i}\right)\right], 0\right\} \quad (7)$$

$$f_2\left(\frac{h}{D}\right) = 1 - \exp\left(-1,4 \cdot \frac{h}{D}\right) \quad (8)$$

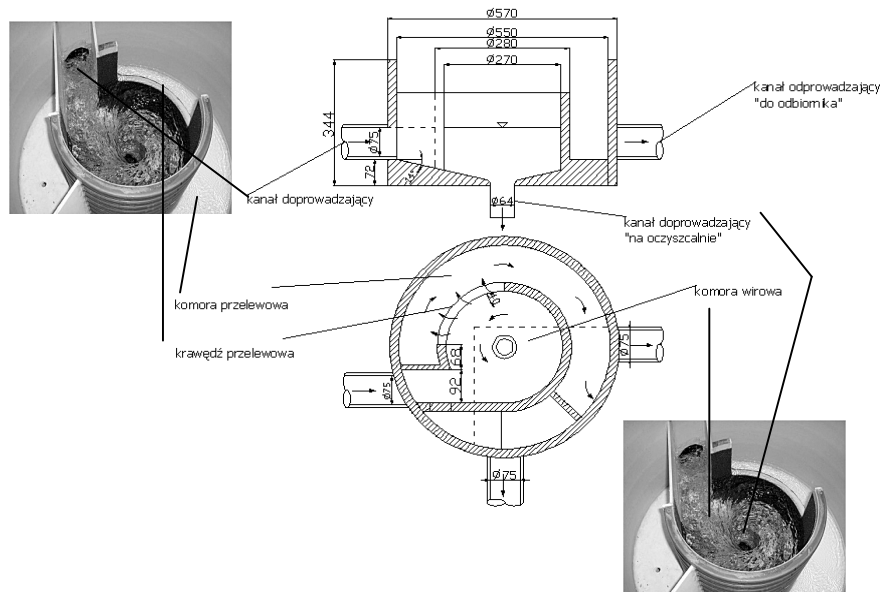
$$f_3\left(\frac{D}{d}\right) = \max\left[1, 0,05 \cdot \left(\frac{F_h}{F_{wl}}\right)\right] \quad (9)$$

$$f_4(Re) = 1 \quad Re \leq 200000 \quad (10)$$

$$f_4(Re) = 1 - \exp\left(-\frac{220000}{Re-200000}\right) \quad Re > 200000 \quad (11)$$

W Laboratorium Hydraulicznym Podstaw Urządzeń Wodociągowych i Kanałizacyjnych Instytutu Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska Politechniki Krakowskiej przeprowadzono badania skuteczności hydroseparatora typu VOR-TEX. Model hydroseparatora stanowiący centralną część stanowiska badawczego wykonany został zgodnie z dokumentacją udostępnioną przez Water Research Centre, GB. Badania prowadzono na dwóch modelach w skali półtechnicznej określanych umownie „małym” oraz „dużym” modelem. Pierwszy był przeznaczony

do odbioru ścieków deszczowych z powierzchni małej stacji benzynowej, drugi dla małej zlewni osiedlowej. Widok na mały model hydroseparatora typu Vortex przedstawia rysunek 1.



**Rys. 1.** Schemat małego modelu hydroseparatora typu VORTEX

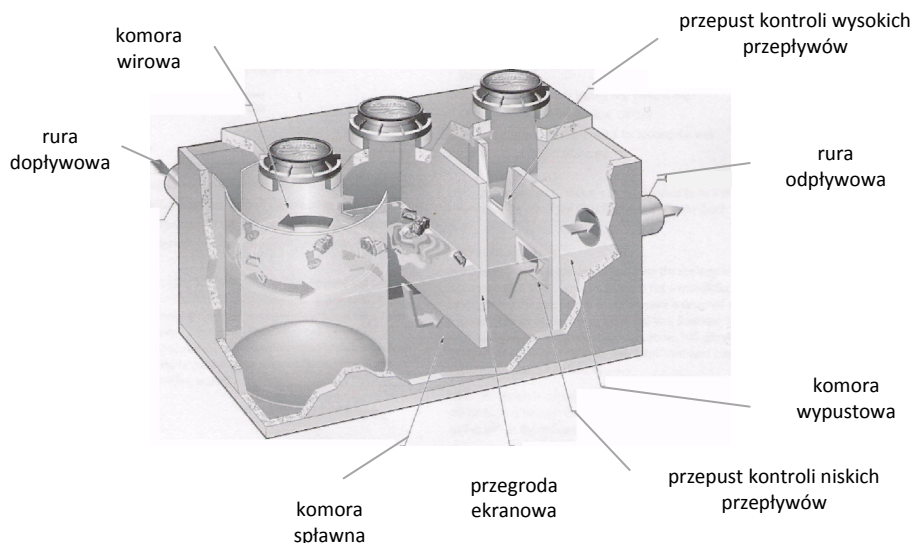
**Fig. 1.** Scheme of a small VORTEX hydroseparator model

Określenie efektywności usuwania zawiesiny w hydroseparatorze wiązało się z przeprowadzeniem szeregu doświadczeń. Poszczególne doświadczenia wykonywano w określonych warunkach tworząc tzw. serie badań. Na serię składało się od kilku do kilkunastu eksperymentów. Warunki te dyktowały m.in. zastosowany model hydroseparatora w układzie oraz parametry badań, w tym czas trwania doświadczenia.

Otrzymane wyniki badań potwierdziły wysoką skuteczność działania hydroseparatorów w stosunku do innych urządzeń wykorzystujących proces sedymentacji, w zależności od przyjętych parametrów – składu granulometrycznego próbki, długości korony przelewowej, obciążenia hydraulicznego urządzenia, średnicy odpływu w kierunku „oczyszczalni” oraz chropowatości ścianek komory wirowej. Usuwanie zawiesiny gruboziarnistej przebiegało bardzo sprawnie, było w przedziale 90 – 100% w eksperymencie 33, przy  $L = 5$  cm i  $d = 60$  mm, natomiast najlepszy efekt usuwania zawiesiny drobnoziarnistej – 80%

Biorąc pod uwagę węglowodory zawarte w ściekach deszczowych zasadne jest łączenie funkcji procesu sedymentacji z procesem flotacji. System Vortechs to wysokowydajny separator hydrodynamiczny skutecznie usuwający drobniejsze osady (np. cząstki o średnicy 50-mikronów), oleje oraz zarówno unoszące się na wodzie jak i tonące zanieczyszczenia (Materiały promocyjne firmy CONTECH CONSTRUCTION PRODUCTS

INC.). Działanie polegające na koncentracji wiru i kontroli przepływów składa się na zminimalizowane burzliwość przepływu i gwarancję bezpiecznego zatrzymywania wychwyconych zanieczyszczeń.



**Rys. 2.** System Vortechs® (Materiały promocyjne firmy CONTECH CONSTRUCTION PRODUCTS INC.)

**Fig. 2.** Vortechs® System (CONTECH CONSTRUCTION PRODUCTS INC promotion materials)

Woda opadowa dostaje się do komory wirowej, wprawiana jest w lekki ruch wirowy wzmacniający separację grawitacyjną. Zanieczyszczenia opadające pozostają w komorze wirowej, podczas gdy frakcja splanowa zatrzymuje się na przegrodzie ekranowej. Systemy Vortechs konstruowane są rozmiarowo tak, aby skutecznie uzdatniać często występujące zdarzenia odpływu i są kontrolowane przede wszystkim dzięki otworowi kontroli niskiego przepływu. Otwór ten skutecznie zmniejsza prędkość wpływu i turbulencję, wpuszczając lekką cofkę, odpowiednią dla danej lokalizacji.

W przypadku znaczniejszych opadów, poziom wody wznosi się powyżej otworu kontroli niskiego przepływu i woda zaczyna przelewać się przez przepust kontroli wysokiego przepływu. Frakcja splanowa zanieczyszczeń unosi się ponad poziom dna przegrody ekranowej, co zapobiega ich uwalnianiu się. Ruch wirowy staje się silniejszy w związku z intensywnością opadów, lecz osad nadal pozostaje stabilny. W czasie maksymalnego wykorzystania przepustowości przewodu kanalizacji deszczowej, powierzchnia wody w systemie dochodzi do szczytu przepustu kontroli wysokiego przepływu. System Vortechs dzięki swoim rozmiarom będzie w stanie zatrzymać wcześniej wyłapanie zanieczyszczenia, nawet w przypadku tych rzadkich zdarzeń.

Po ustaniu opadów, oczyszczająca woda odpływowa zostaje wypuszczona z systemu Vortechs w kontrolowanych ilościach, a poziom w systemie powróci do ekwi-

walentnego dla pogody bezdeszczowej, na wysokości dna rury doprowadzającej. Ten niski poziom wody ułatwia przegląd i czyszczenie systemu oraz znacznie zmniejsza koszty utrzymania, dzięki zmniejszeniu objętości wypompowywanej wody.

Badania wydajności systemu Vortechs do usuwania zawiesiny i innych zanieczyszczeń przenoszonych przez wody opadowe do jeziora George, Lake George Village, stan Nowy Jork wykazały blisko 90% stopień obniżenia zawiesiny.

## PODSUMOWANIE

Zachowanie wymagań jakościowych dotyczących ścieków deszczowych, wynikających z obowiązujących przepisów i potrzeby spełnienia zasad zrównoważonego rozwoju, narzuca konieczność ich oczyszczania. Pomimo, że głównym zanieczyszczeniem ścieków deszczowych jest zawiesina, w większości mineralna, stosowanie procesu sedymentacji w takich urządzeniach jak osadniki i piaskowniki nie zapewnia odpowiedniego efektu ich oczyszczania. Trwają więc poszukiwanie jeszcze skuteczniejszych rozwiązań, a jednym z nich jak wykazały badania modelowe w warunkach laboratoryjnych może być hydroseparator, którego walorem poza efektywnością działania, może być niewielka zajmowana powierzchnia terenu i wymiary urządzenia.

## BIBLIOGRAFIA

1. Babelski Z.: Metodyka oceny stopnia zanieczyszczenia ścieków deszczowych. Wodociągi i kanalizacja 15. Arkady. Warszawa 1982.
2. Bartkowska I.: Analiza porównawcza jakości spływów deszczowych z terenu miasta Białegostoku, materiały Sympozjum pt.: Podczyszczanie wód opadowych. Wymagania formalnoprawne kanalizacyjnych możliwości technicznej. Gdańsk 2000.
3. Błaszczak P.: Strategia rozwoju miejskich systemów kanalizacyjnych w dostosowaniu do wymagań Dyrektywy Unii Europejskiej 91/27/EEC w sprawie oczyszczania ścieków z terenów urbanizowanych oraz II Konwencji Helsińskiej. IV Zjazd kanalizatorów polskich. Polkan 99. Łódź 1999.
4. Brombach H.: Experience with Vortex Separators for Combined Sewer overflow control.
5. Dąbrowski W.: Strategia postępowania z przelewami burzowymi. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 6/2007.
6. Garbarczyk K. Wpływ składu ścieków deszczowych na zawartość zanieczyszczeń w osadach zatrzymanych w ulicznych wpustach deszczowych. XII Ogólnopolska Konferencja naukowo-techniczna z cyklu: Problemy gospodarki wodno-ściekowej. Białystok 2005.
7. Garbarczyk K.; Zanieczyszczenia w spływach roztopowych odprowadzanych systemem kanalizacji deszczowej do wód powierzchniowych. Materiały IX Ogólnopolskiej Konferencji N-T z cyklu Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych. Rajgród 1997.
8. Heidrich A, Witkowski A.: Urządzenia do oczyszczania ścieków. Projektowanie, przykłady obliczeń. Wydawnictwo „Seidel Przywecki” Sp. z o.o. Warszawa 2005.

9. Królikowska J.: Hydroseparator jako środek ochrony wód powierzchniowych przed zanieczyszczeniami zawartymi w wodach deszczowych. XIX Krajowa Konferencja, VII Międzynarodowa pt. Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód. Zakopane 2006.
10. Królikowska J.: Efektywność podczyszczania ścieków opadowych w hydroseparatorze. I Ogólnopolska Konferencja naukowo-techniczna INFRAEKO 2008. Rzeszów-Paczółtowiec 2008.
11. Królikowska J.: Ocena przydatności hydroseparatora do podczyszczania ścieków opadowych. Monografia, Wydawnictwa PK. Kraków 2010. I.
12. Królikowski A, Garbarczyk K, Tuz P.: Odprowadzanie i oczyszczanie ścieków opadowych z terenów zurbanizowanych. Uwarunkowania techniczne i prawne. I Kongres Inżynierii Środowiska. Monografie Polskiej Akademii Nauk. Komitet Inżynierii Środowiska. Lublin 2003.
13. Królikowski A.: Skład wód opadowych i jego wpływ na sposób ich podczyszczania. I Ogólnopolska Konferencja naukowo-techniczna INFRAEKO 2008. Rzeszów-Paczółtowiec 2008.
14. Królikowski A, Garbarczyk K, Gwoździej-Mazur J, Butarewicz A.: Osady powstające w obiektach systemu kanalizacji deszczowej. Monografia PAN, Białystok 2005.
15. Luyckx G., & Berlamont J. Removal efficiency of swirl/Hortex separators. Submitted for publication in Urban Water. 2002.
16. Materiały promocyjne firmy CONTECH CONSTRUCTION PRODUCTS INC. Vortechs® Guide, Operation, Design, Performance and Maintenance.
17. Praca zbiorowa pod redakcją Z.Heidricha. Gospodarka wodno-ściekowa. Warszawa 2002.
18. Osmólska-Mróz.: Prognozowanie i ochrona jakości wód powierzchniowych na terenach miejskich. Instytut Ochrony Środowiska. Warszawa 1992.
19. Osuch-Pajdzińska E.: Odprowadzenie wód deszczowych z terenów zurbanizowanych. Rozdz. 6.8 w Gospodarka Wodno-Ściekowa. Wyd. Verlang Dashofer Sp. zo.o Warszawa 2004.
20. WeiB G.J.: Vortex separator proposal of a dimensioning method. Water Science and Technology Vol. 36 No. 8-9 1997.
21. Zawilski M.: Prognozowanie wielkości odpływu i ładunków zanieczyszczeń ścieków opadowych odprowadzanych z terenów zurbanizowanych. Zeszyt Naukowy nr 792, Politechnika Łódzka. Łódź 1997.

## **SWIRL CHAMBER EQUIPMENT APPLIED IN SEWAGE NETWORKS FOR DECREASING SUSPENDED PARTICLE LOAD IN STORMWATER SEWAGE**

**Summary.** The main type of pollution in stormwater sewage are suspended particles which tend to carry most of other substances present in stormwater. The suspended particle load transported to the hydrosphere is subject to legal regulations. In engineering practice, suspended particles are successfully removed from sewage with the application of swirl chamber equipment, e.g. whirl sediment traps and specially constructed flow control devices, operating more efficiently than traditional horizontal traps.

**Keywords:** suspended particles, sediment rate, hydroseparator, sedimentation effectiveness.