

Barbara KOZAK¹, Marcin K. WIDOMSKI¹ i Grzegorz ŁAGÓD¹

BADANIA MODELOWE EFEKTYWNOŚCI FUNKCJONOWANIA SEPARATORA FAZY STAŁEJ ŚCIEKÓW DESZCZOWYCH

MODELING THE EFFICIENCY OF STORM WATER SOLID PHASE SEPARATOR

Abstrakt: Odprowadzanie ścieków deszczowych z terenów zurbanizowanych związane jest z koniecznością przeciwdziałania zrzutowi znacznych ładunków zanieczyszczeń, w tym zawiesiny łatwo opadającej i ropopochodnych oraz tłuszczów, do odbiorników ścieków. W tym celu, przed skierowaniem ścieków do kanalizacji deszczowej, stosowane są różnego rodzaju separatory mające za zadanie oddzielić i zatrzymać fazy rozproszone - ciekłą i stałą. Efektywność ich pracy jest zatem miarą ochrony wód odbiorników ścieków deszczowych. Praca niniejsza przedstawia wyniki trójwymiarowych badań modelowych efektywności pracy prostego separatora fazy stałej oczyszczającego ścieki deszczowe. Badania modelowe zostały przeprowadzone w komercyjnym programie CFD Fluent Ansys Inc. Zaprezentowane obliczenia symulacyjne objęły przepływ ścieków deszczowych zawierających trzy frakcje fazy rozproszonej. Zastosowano trzy zróżnicowane prędkości przepływu ścieków deszczowych oraz trzy średnice ziaren fazy rozproszonej charakterystyczne dla frakcji piaskowej, pylastej i ilastej. Czas trwania odwzorowywanego zjawiska przepływu ścieków przez separator oraz zawartość procentową danej frakcji oparto o wartości charakterystyczne dla warunków lubelskich. Wyniki zaprezentowanych obliczeń numerycznych obejmowały rozkład prędkości przepływu wody i poszczególnych badanych frakcji przez separator, a także masę oraz rozkład przestrzenny zatrzymanych osadów w objętości zbiornika. Przeprowadzone badania umożliwiły ocenę skuteczności zatrzymywania poszczególnych frakcji oraz kształt objętości czynnej zbiornika separatora w funkcji prędkości przepływu. Ze względu na brak walidacji modelu otrzymane wyniki należy traktować jako wyniki badań wstępnych.

Słowa kluczowe: separator fazy stałej, ścieki deszczowe, modelowanie numeryczne

Wstęp

Ścieki deszczowe, zwłaszcza z terenów zurbanizowanych, zawierają znaczne ilości zanieczyszczeń [1-3]. Do najważniejszych zanieczyszczeń wód deszczowych można zaliczyć substancje ropopochodne i oleiste, zawiesinę mineralną i substancje organiczne oraz metale ciężkie [2-7]. Wprowadzanie ścieków deszczowych bez podczyszczania bezpośrednio do odbiornika może stanowić zagrożenie dla środowiska wodnego [8-10]. Ponadto, obecnie coraz częściej stosuje się układy odzyskujące wodę deszczową. Wykorzystanie podczyszczonej wody deszczowej w budynkach użyteczności publicznej pozwala na zredukowanie poboru wody wodociągowej nawet do 60% [11]. Istnieje wiele rodzajów urządzeń stosowanych do podczyszczania ścieków deszczowych. Ze względu na to, że zwykle największy udział we wszystkich zanieczyszczeniach ma zawiesina mineralna [12], najpopularniejszym urządzeniem w układzie z wodą deszczową jest separator tego typu zawieszin. Separator w najprostszej postaci to zbiornik przepływowy z ukierunkowanym przepływem. Poprzez zwiększenie średnicy przepływu we wnętrzu osadnika następuje redukcja prędkości przepływu, dzięki czemu cząstki frakcji mineralnej sedymentują. Ponieważ w ściekach deszczowych mogą występować bardzo zróżnicowane

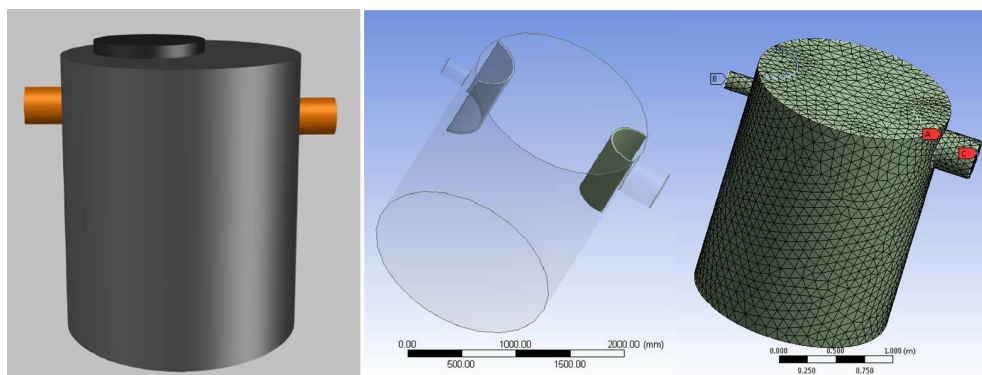
¹ Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel. 81 538 44 13, email: M.Widomski@wis.pol.lublin.pl

^{*}Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'14, Jarnottówek, 15-17.10.2014

zanieczyszczenia zarówno pod względem składu, jak i ilości, niemożliwe jest dokładne przewidzenie efektywności separatora tak w warunkach laboratoryjnych, jak i analizie komputerowej. Jednakże przeprowadzenie analizy w programie służącym do modelowania przepływu płynów pozwala na skorygowanie kształtów oraz wstępne określenie warunków pracy urządzenia. Program Ansys Fluent pozwala na wykonanie symulacji dowolnego płynu przy zdefiniowanym modelu fizycznym. Dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych możliwe jest rozwiązywanie układów równań różniczkowych niemożliwych do rozwiązania bez metod komputerowych. To natomiast umożliwia wykonanie wielu symulacji danego urządzenia w dość krótkim czasie. Otrzymane symulacje pozwalają przeprowadzić kompletną analizę wybranego urządzenia, zbadać kierunek przepływu, określić prędkości, ciśnienia, zawartości zawiesiny oraz wielu innych parametrów charakterystycznych dla rozpatrywanego przypadku. Wykonywanie symulacji jest przydatnym narzędziem przy projektowaniu nowych urządzeń, które umożliwia wprowadzanie niezbędnych zmian już na etapie projektowania. Praca niniejsza przedstawia próbę oceny efektywności zatrzymywania fazy rozproszonej przez osadnik przepływowy. Badania oparto na obliczeniach numerycznych wykonanych za pomocą komercyjnego programu Fluent, Ansys Inc.

Materiał i metody

Badania modelowe zostały przeprowadzone w komercyjnym programie obliczeniowej mechaniki płynów (computational fluid dynamics) CFD Fluent Ansys 12.1, Ansys Inc., USA [13]. Program umożliwia wykonanie analizy przepływu dowolnego płynu przez zaprojektowany model fizyczny. Do przeprowadzenia analizy wybrano separator zanieczyszczeń mineralnych o kształcie walcowym zaprezentowany na rysunku 1. Separator dobrano na założony przepływ wg PN-EN 858-2:2005 [14].



Rys. 1. Osadnik zawiesiny mineralnej, model geometryczny oraz siatka elementów skończonych

Fig. 1. Storm water solid phase separator, geometry and finite elements mesh

Przyjęta średnica urządzenia wynosi 1740 mm, zaś jego wysokość to 2230 mm. Osadnik posiada wlot o średnicy 100 mm oraz wylot o średnicy 400 mm, które zlokalizowane są naprzeciwko siebie w górnej części urządzenia. Dodatkowo, aby

ukierunkować przepływ ścieków przez separator, przy wlocie oraz wylocie pionowo umieszczone są deflektory o półkolistym kształcie i długości 700 mm.

W badaniach uwzględniono przepływ przez osadnik ścieków w postaci wody deszczowej zanieczyszczonej trzema rodzajami frakcji mineralnej tj. il, pył oraz piasek. Założono zróżnicowane parametry fizyczne dla każdej z frakcji. Zestawione parametry prezentuje tabela 1. Dodatkowo, dobrano również zawartość procentową poszczególnych frakcji jak dla gruntu ilastego wg normy ISO 14 688-1 [15].

Założone parametry poszczególnych frakcji mineralnych

Tabela 1

Established parameters for each mineral fraction

Table 1

Frakcja	il	pył	piasek
Srednica ziarna [mm]	0,002	0,01	0,2
Gęstość [kg/m ³]	2720	2670	2650
Masa ziarna [kg]	$1,1 \cdot 10^{-14}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$
Zawartość procentowa [%]	40	35	25
Udział masowy w ściekach [-]	0,00044	0,000385	0,000275
Udział objętościowy w ściekach [-]	0,00016	0,00014	0,0001

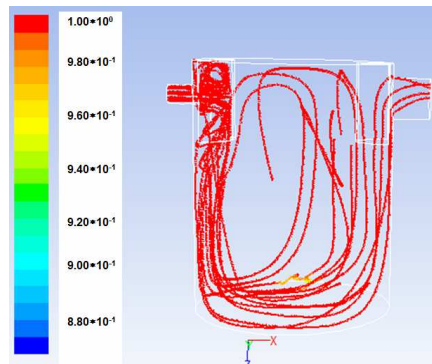
Ogólną zawartość zanieczyszczeń mineralnych w ściekach ustalono na poziomie 1100 mg/dm³. Jest to wartość należąca do górnego zakresu stężeń dla terenów o średnim natężeniu ruchu kołowego, charakterystyczna dla splywu powierzchniowego w czasie trwania opadu atmosferycznego [2, 12, 16-18]. Po przeliczeniu na wskaźnik masowy wartość ta wynosi 0,0011 (kg zawiesiny mineralnej/kg ścieków). Dobrano czas symulacji równy 12 minut, pozwalający na ustabilizowanie przepływu przez urządzenie.

W obliczeniach zastosowano model przepływu mieszaniny eulerowskiej, dwurównaniowy k-epsilon z uwzględnieniem działania siły grawitacji [19-22]. Przyjęto 4 fazy uczestniczące w przepływie, tj. woda, il, pył oraz piasek. Jako warunki brzegowe zastosowano model oparty o wartości prędkości, intensywności turbulencji i średnicę dopływu. Ustalono prędkość nadawy o wartości 1,1 m/s oraz intensywność turbulencji równą 7%. Dla założonego podziału procentowego poszczególnych frakcji mineralnych, na podstawie wartości średniej zawiesiny w ściekach równej 1100 mg/dm³, obliczono udziały masowe w objętości ścieków, zaprezentowane w tabeli 1. Przyjęto długość kroku czasowego równą 1 sekundzie, czas trwania symulacji ustalono na 12 minut.

Wyniki badań modelowych

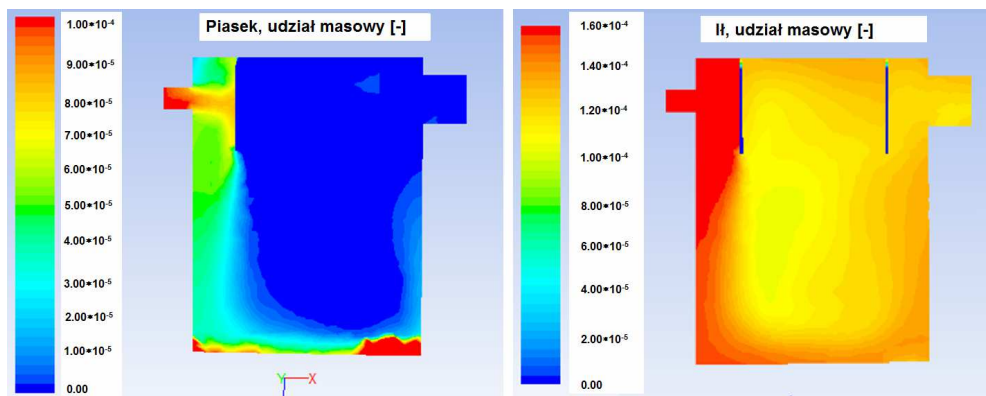
Rezultaty obliczeń numerycznych efektywności funkcjonowania separatora fazy stałej obejmowały hydraulikę zbiornika, tzn. układ linii prądu przepływu wody, układ przestrzenny ułamka masowego danej, rozpatrywanej fazy gruntu oraz masę danej fazy zatrzymanej wewnątrz zbiornika w dowolnym kroku czasowym. Rysunek 2 przedstawia układ linii prądu przepływu wody przez zbiornik separatora. Widoczny jest charakterystyczny, U-kształtny, układ linii prądu wywołany przez dwa deflektory - napływowy i odpływowy. Zastosowanie kierownic wymusza pionowy kierunek przepływu

zawiesiny po wejściu do zbiornika, co ma w założeniu sprzyjać osadzaniu ziaren zanieczyszczeń mineralnych w dennej części zbiornika.



Rys. 2. Hydraulika zbiornika separatora, linie prądu przepływu fazy ciągłej (wody) w objętości zbiornika
Fig. 2. Hydraulics of separator tank, pathlines of water flow through water body of tank

Rysunek 3 przedstawia układ przestrzenny udziałów objętościowych dwóch wybranych, skrajnych, frakcji rozproszonych iłu i piasku o największej różnicy mas cząstek w wybranym kroku czasowym trwania symulacji.



Rys. 3. Układ przestrzenny zawartości frakcji piaskowej i ilastej wewnątrz zbiornika separatora
Fig. 3. Spatial distribution of sand and clay fraction inside the water body of separator

Wyraźnie widoczne jest zróżnicowanie przestrzenne zawartości poszczególnych frakcji w objętości zbiornika. Ziarna piasku, jako cięższe od ziaren iłu o kilka rzędów wartości, 10^{-8} wobec 10^{-14} kg, wyraźnie gromadzą się w rejonach dominujących stref przepływu w czynnej objętości zbiornika, pokazanych na rysunku 2. Zawartość frakcji piaskowej w tych obszarach jest wyraźnie wyższa niż w pozostałej części objętości zbiornika. Nieco odmienną sytuację można zaobserwować w przypadku lżejszych ziaren frakcji ilastej,

których udział objętościowy w środkowej, nieaktywnej części zbiornika jest zdecydowanie wyższy niż frakcji piaskowej.

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie obliczonych mas zawartości poszczególnych frakcji dopływających oraz zatrzymywanych w zbiorniku umożliwiające określenie efektywności jego pracy. Analiza danych wskazuje, iż w czasie trwania symulowanego opadu efektywność pracy była stosunkowo niska, sięgając 51% dla frakcji piaskowej oraz zaledwie 11% dla łu i pyłu.

Tabela 2

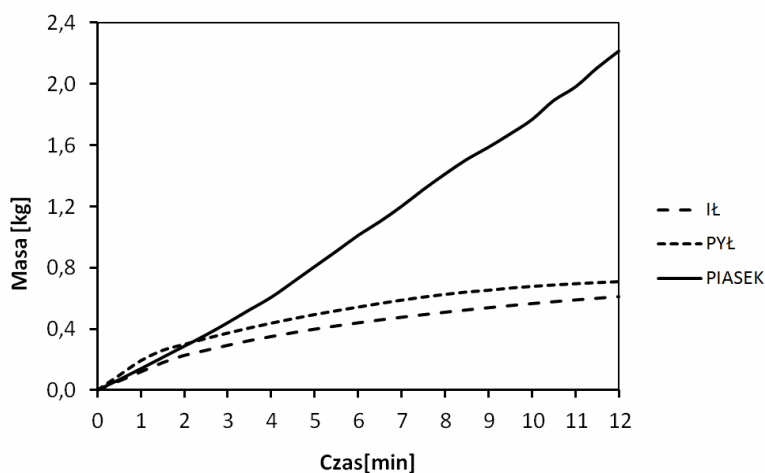
Zestawienie mas zatrzymywanych cząstek frakcji ilastej, pylastej i piaskowej

Table 2

Masses of retained particle fractions of clay, silt and sand

Parametr	Frakcja		
	Il	Pył	Piasek
Udział masowy w ściekach deszczowych	0,00044	0,000385	0,000275
Masa ziaren doprowadzonych do osadnika	7,44	6,39	4,35
Masa ziaren zatrzymanych	0,81	0,71	2,21
Efektywność zatrzymywania [%]	10,9	11,1	50,8

Na rysunku 4, przedstawiającym zmienną w czasie zawartość poszczególnych frakcji wewnątrz zbiornika, można zauważyć, iż przebieg funkcji charakteryzującej osadzanie piasku ma odmienny charakter niż w przypadku łów i pyłów. Krzywa odzwierciedlająca kumulatywną masę zatrzymanej frakcji piaskowej ma charakter zbliżony do rosnącej funkcji liniowej. Piasek osadzany jest w zbiorniku ze stałym w przybliżeniu przyrostem. Natomiast osadzanie łów i pyłów na rysunku 4 opisane jest przez krzywą o kształcie zbliżonym do wykresu funkcji logarytmicznej. Widać, iż wraz z przyrostem czasu trwania obliczeń zmniejszała się prędkość przyrostu zatrzymanej masy frakcji rozproszonych.



Rys. 4. Kumulatywna masa osadzanych ziaren poszczególnych frakcji fazy rozproszonej

Fig. 4. Cumulated mass of settled particles of dispersed phase's various fraction

Należy zauważyć, że po osiągnięciu pewnej, zbliżonej do 0,4 kg, wartości zawartości łu i pyłu w zbiorniku modelowe osadzanie omawianych frakcji zostało znacznie spowolnione, a nawet wstrzymane.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiony osadnik zawiesiny mineralnej przy prędkości nadawy 1,1 m/s spełnia swoją funkcję tylko częściowo. Zatrzymywanie ziaren piasku zachodzi prawidłowo, aczkolwiek i z tak ograniczoną do ok. 50% skutecznością, natomiast dla pyłu i łu, które stanowią większą część założonej zawiesiny mineralnej, proces zachodzi w bardzo niewielkim stopniu (efektywność rzędu 10%).

Wykonanie analizy w programie Ansys Fluent umożliwiło przeprowadzenie obliczeń niezbędnych do określenia efektywności pracy osadnika w stosunkowo krótkim czasie. Dzięki temu można korygować model fizyczny danego urządzenia już na etapie projektowania, a nie zaś dopiero podczas badań laboratoryjnych prototypów urządzeń. Wykorzystanie przekrojów przez osadnik umożliwia wskazanie punktów, w których gromadzi się zawiesina, jak również stwierdzenie, czy proces sedymentacji zachodzi dla danej frakcji oraz określenie intensywności tego procesu. Wyniki przedstawionej symulacji CFD mają charakter orientacyjny i mogą służyć głównie jako pomoc w projektowaniu urządzeń.

Literatura

- [1] Bertrand-Krajewski JL, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon. *Water Res.* 1998;32(8):2341-2356. DOI: 10.1016/S0043-1354(97)00420-X.
- [2] Gnecco I, Berretta C, Lanza LG, La Barbera P. Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy. *Atmos Res.* 2005;77(1-4):60-73. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.10.017.
- [3] Göbel P, Dierkes C, Coldewey WG. Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *J Contam Hydrol.* 2007;91(1-2):26-42. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.08.008.
- [4] Królikowska J, Królikowski A. Wody opadowe, odprowadzanie, zagospodarowanie, podczyszczanie i wykorzystanie. Warszawa: Wyd. Seidel-Przywecki; 2012.
- [5] Jaromin-Gleń KM, Widomski MK, Łągód G. Stężenia zanieczyszczeń w ściekach deszczowych dla wybranej zlewni miasta Lublin. *Proc ECOPE.* 2012;6(2):725-730. DOI: 10.2429/proc.2012.6(2)099.
- [6] Luo HB, Luo L, Huang G, Liu P, Li J, Hu S, et al. Total pollution effect of urban surface runoff. *J Environ Sci-China.* 2009;21(9):1186-1193. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62402-X.
- [7] Lee JH, Bang KW. Characterization of urban stormwater runoff. *Water Res.* 2000;34(6): 1773-1780. DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00325-5.
- [8] Ellis JB, Hvitved-Jacobsen T. Urban drainage impacts on receiving waters. *J Hydraulic Res.* 1996;34(6):771-783. DOI: 10.1080/00221689609498449.
- [9] Ellis JB. Risk assessment approaches for ecosystem responses to transient pollution events in urban receiving waters. *Chemosphere.* 2000;41(1-2):85-91. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00393-8.
- [10] Kominkova D, Stransky D, St'astna G, Caletkova J, Nabelkova J, Handova Z. Identification of ecological status of stream impacted by urban drainage. *Water Sci Technol.* 2005;51(2):249-256. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15790250>.
- [11] Słyś D. Zrównoważone systemy odwodnienia miast. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne; 2013.
- [12] Ellis JB. The characterization of particulate solids and quality of water discharged from an urban catchment. *UNESDOC-UNESCO.* 1977;283-291.
- [13] ANSYS FLUENT 12.0. User's guide. ANSYS Inc; 2009.
- [14] PN-EN 858-2:2005. Instalacje oddzielaczy cieczy lekkich (np. olej i benzyna) - Część 2: Dobór wielkości nominalnych, instalowanie, użytkowanie i eksploatacja.

- [15] PN-EN ISO 14 688-1. Badania geotechniczne. Oznaczenia i klasyfikacja gruntów. Część 1. Polski Komitet Normalizacji, czerwiec 2006.
- [16] Mannina G, Viviani G. An urban drainage stormwater quality model: Model development and uncertainty quantification. *J Hydrol.* 2010;381(3-4):248-265. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.11.047.
- [17] Ociepa E, Kisiel A, Lach J. Zanieczyszczenia wód opadowych spływających do systemów kanalizacyjnych. *Proc ECOpole.* 2010;4(2):465-469. http://tchie.uni.opole.pl/ecoproc10b/OciepaKisielLach_PECO10_2.pdf.
- [18] Bąk Ł, Górski J, Górka K, Szelaż B. Zawartość zawiesin i metali ciężkich w wybranych falach ścieków deszczowych w zlewni miejskiej. *Ochr Środ.* 2012;34(2):49-52. http://www.os.not.pl/docs/czasopismo/2012/2-2012/Bak_2-2012.pdf.
- [19] Bowen RM. Theory of mixtures. In: *Continuum Physics, Vol. III*, Eringen AC, editors. New York: Academic Press; 1976.
- [20] Kołodziejczyk K. Symulacje numeryczne procesu sedymentacji w laboratoryjnym osadniku wielostrumieniowym. *Inż Ap Chem.* 2013;52(3):194-195. http://inzynieria-aparatura-chemiczna.pl/pdf/2013/2013-3/InzApChem_2013_3_194-195.pdf.
- [21] Kołodziejczyk K. Numerical simulations of polydispersed suspension sedimentation in Ansys CFX. *Pol J Environ Stud* 2014;23(3):1003-1008. <http://www.pjoes.com/abstracts/2014/Vol23/No03/39.html>.
- [22] Pollert J, Stransky D. Combination of computational techniques - evaluation of CSO efficiency for suspended solids separation. *Water Sci Technol.* 2003;47(4):157-166. <http://www.iwaponline.com/wst/04704/wst047040157.htm>.

MODELING THE EFFICIENCY OF STORM WATER SOLID PHASE SEPARATOR

Faculty of Environmental Engineering, Lublin University of Technology

Abstract: Storm water management in urbanized areas is directly connected to limiting the significant discharge of pollutants, including TSS, fats and oil derivatives, to the receivers. Thus, the various types of separators allowing to separate and retain the dispersed solid or liquid phase are applied before surface runoff waters enter the storm water system. Therefore, their efficiency is a measure of storm water receiver quality protection. This paper presents the results of three dimensional modeling studies concerning the operation efficiency of simple solid phase separator treating storm water. Our numerical researches were performed in the commercial CFD (computational fluid dynamics) software Fluent Ansys Inc. The presented numerical simulations covered flow of storm water containing three fractions of dispersed fraction through the solid phase separator. Three velocities of flow and three particles' dimensions representative for sand, silt and clay fractions were applied. Time duration of modeled storm water flow as well as percentage distribution of applied solid phases were based on values typical for Lublin region. Results of our numerical calculations covered velocities of flow distribution for storm water and tested solid phases as well as the accumulated masses and spatial development of retained solid phases particles inside the separator's water body. The performed numerical simulations allowed assessment of retaining efficiency for the applied solid phase fraction and shape of separator's active volume as a function of storm water velocity of flow. The lacking validation of our modeling attempt influences the fact that our studies should be treated as preliminary.

Keywords: solid phase separator, storm water, numerical modeling

