

Andrzej Kotowski, Henryk Szewczyk, Andrzej Wartalski

Optymalizacja parametrów eksploatacyjnych separatorów substancji ropopochodnych typu TBF

Separatory typu TBF przeznaczone są do podczyszczania ścieków opadowych spływających z powierzchni parkingów, jezdni, lotnisk itp. Maksymalną wartość strumienia dopływających ścieków deszczowych do tego urządzenia (Q_{maks}) określa się na podstawie normy PN-EN 752-4. Wielkość urządzenia dobiera się na tę wartość, jednocześnie przyjmując, że ok. 20% strumienia dopływających ścieków podlega ciągłemu podczyszczaniu z substancji ropopochodnych i osadów, obejmując tzw. pierwszą falę – silnie zanieczyszczonych ścieków deszczowych, splukiwanych z powierzchni zlewni w okresie tzw. suchej pogody. Strumień ten nosi nazwę nominalnego (Q_n). Pozostały strumień dopływających ścieków – tj. ok. $0,8Q_{maks}$ – po podczyszczeniu z osadów kierowany jest bezpośrednio do kanału omijającego komorę koalescencyjną i trafia do kanału odpływowego.

Przedmiotem niniejszej pracy są separatory substancji ropopochodnych, zintegrowane z osadnikiem, firmy Technau Polska [1]. Separatory typu TBF – z kanałem obejściowym filtru koalescencyjnego wewnątrz urządzenia – przeznaczone są głównie do podczyszczania ścieków opadowych. Zasada działania takich urządzeń opiera się na separacji grawitacyjnej substancji stałych oraz flotacji substancji ropopochodnych. Separatory te składają się z trzech zasadniczych elementów, znajdujących się w poziomym stalowym zbiorniku o przekroju kołowym:

- komory osadnika, przeznaczonej do separacji i gromadzenia substancji stałych (o gęstości $>1,1 \text{ kg/dm}^3$),
- komory koalescencyjnej, przeznaczonej do wychwytywania i gromadzenia substancji ropopochodnych (o gęstości $<0,95 \text{ kg/dm}^3$), wyposażonej w system automatycznego zamknięcia, zabezpieczającego przed wydostaniem się już zgromadzonej substancji na zewnątrz,
- kanału obejściowego (by-pass) wewnątrz urządzenia, służącego do odciążania komory koalescencyjnej podczas ulewnych deszczów.

Separatory o nominalnym strumieniu przepływu ścieków do $80 \text{ dm}^3/\text{s}$ mają automatyczne zamknięcia komór koalescencyjnych w systemie ramieniowym, natomiast separatory o strumieniu ścieków powyżej $80 \text{ dm}^3/\text{s}$ mają automatyczne zamknięcia w systemie bezwładnościowym. Sterujące zamknięciami pływaki wytarowane są standardowo na gęstość substancji ropopochodnych równą $0,85 \text{ kg/dm}^3$.

Zakres pracy

W pracy przeprowadzono obliczenia hydrauliczne dotyczące rozdziału przepływów ścieków wewnątrz separatora typu TBF, tj. dopływu ścieków do komory koalescencyjnej oraz do kanału obejściowego, z propozycjami zmian optymalizacyjnych konstrukcji pod względem hydraulicznym – umożliwiających precyzyjniejszy podział tych strumieni – zgodnie z zaleceniami aprobacyjnymi Instytutu Ochrony Środowiska w Warszawie [2]. Zgodnie z tymi zaleceniami przyjęto, że podczas dopływu do separatora strumienia ścieków większego od nominalnego (Q_n), włącznie z maksymalnym (Q_{maks}), rzeczywisty strumień ścieków (Q_{rz}) przepływający przez komorę koalescencyjną nie może być mniejszy od Q_n (tak, aby $Q_{maks}/Q_{rz} \leq 5$) i większy od $Q_{rz} = 1,15Q_n$ ($Q_{do} \in (Q_n; Q_{maks})$).

Przeprowadzone obliczenia dotyczą dwóch typoszeregów separatorów TBF, tj:

- 12 separatorów z bocznym kanałem obejściowym, z typoszeregu $Q_n \leq 80 \text{ dm}^3/\text{s}$, o średnicach 1250/1500/1900 mm (z przedstawicielem typowości dla $Q_n = 55 \text{ dm}^3/\text{s}$),
- 10 separatorów z centralnym kanałem obejściowym, z typoszeregu $Q_n > 80 \text{ dm}^3/\text{s}$, o średnicach 2400/3000 mm (z przedstawicielem typowości dla $Q_n = 160 \text{ dm}^3/\text{s}$).

Działanie separatorów dotychczasowej konstrukcji

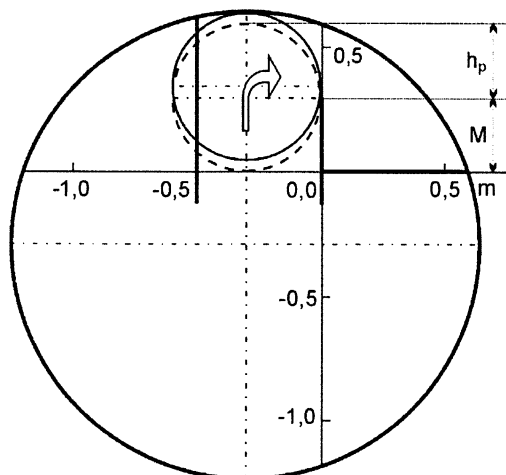
Przykładowy separator z bocznym kanałem obejściowym jest stalowym zbiornikiem w kształcie walca o średnicy 1900 mm, przewidzianym na nominalny strumień ścieków $Q_n = 55 \text{ dm}^3/\text{s}$ oraz maksymalny strumień ścieków $Q_{maks} = 5Q_n = 275 \text{ dm}^3/\text{s}$. Średnica wewnętrzna kanału dopływowego i odpływowego wynosi $D_n = 500 \text{ mm}$, przy różnicy rzędnych ich den $H_0 = 5 \text{ cm}$. Kanał obejściowy zlokalizowany jest przy bocznej ścianie zbiornika (rys. 1). Kształt przekroju poprzecznego tego kanału jest złożony (zbliżony do trójkąta). Spadek podłużny dna kanału obejściowego jest równy zeru. Działanie tego urządzenia jest następujące:

- podczas dopływu ścieków w ilości nie przekraczającej wartości strumienia nominalnego ($Q_n = 55 \text{ dm}^3/\text{s}$), ścieki opadowe przepływają przez komorę osadnika, a następnie przez komorę koalescencyjną, uzyskując pełne podczyszczenie (do założonego stopnia),
- podczas dopływu ścieków w ilości równej wartości strumienia nominalnego (Q_n), ścieki w komorze osadnika spierają się co najwyżej do poziomu rzędnej bocznego progu przelewowego na kanale obejściowym, tj. do wysokości M ponad dnem tego kanału, zlokalizowanego na poziomie dna kanału odpływowego; odpływ strumienia nominalnego

Dr hab. inż. A. Kotowski, prof. nadzw., dr inż. A. Wartalski: Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław

andrzej.kotowski@pwr.wroc.pl, andrzej.wartalski@pwr.wroc.pl

Dr inż. H. Szewczyk: Politechnika Wrocławska, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50–370 Wrocław
henryk.szewczyk@pwr.wroc.pl



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przez syfon wlotowy, przelew i boczny kanał obejściowy separatora o $Q_n=55 \text{ dm}^3/\text{s}$, przy strumieniu ścieków $Q_{\text{maks}}=5Q_n$ ($D_n=500 \text{ mm}$)

ścieków z komory koalescencyjnej odbywa się dwoma zasyfonowanymi kolanami (o średnicy d) do kanału odpływowego, gwarantując jeszcze zakładany stopień podczyszczenia tego strumienia ścieków,

– podczas dopływu ścieków w ilości równej wartości strumienia maksymalnego ($Q_{\text{maks}}=275 \text{ dm}^3/\text{s}$), ścieki w komorze osadnika spiętrzają się ponad wysokość bocznego progu przelewowego na kanale obejściowym i odpływają w ilości $Q_{\text{rz}}=58 \text{ dm}^3/\text{s}$ ($>Q_n$) poprzez komorę koalescencyjną oraz w ilości $Q_{\text{maks}}-Q_{\text{rz}}=217 \text{ dm}^3/\text{s}$ bezpośrednio kanałem obejściowym do odbiornika (wówczas $Q_{\text{maks}}/Q_{\text{rz}}=4,7$).

Przykładowy separator z centralnym kanałem obejściowym (z typoszeregu $Q_n > 80 \text{ dm}^3/\text{s}$) jest stalowym zbiornikiem w kształcie walca o średnicy 2400 mm, przewidzianym na nominalny strumień ścieków $Q_n=160 \text{ dm}^3/\text{s}$ oraz maksymalny strumień ścieków $Q_{\text{maks}}=5Q_n=800 \text{ dm}^3/\text{s}$. Średnica wewnętrzna zarówno kanału dopływowego jak i odpływowego wynosi $D_n=800 \text{ mm}$, przy różnicy rzędnych ich den $H_0=5 \text{ cm}$. Kanał obejściowy zlokalizowany jest centralnie (w osi zbiornika). Kształt przekroju poprzecznego tego kanału jest prostokątny. Spadek podłużny dna jest równy zero. Działanie tego urządzenia jest następujące:

– podczas dopływu ścieków w ilości mniejszej lub równej strumieniowi nominalnemu ($Q_n=160 \text{ dm}^3/\text{s}$), ścieki przepływają przez komorę osadnika, gdzie mogą być spiętrzone maksymalnie do rzędnej M bocznej krawędzi przelewowej na kanale obejściowym; spiętrzenie to umożliwia przepływ nominalnego strumienia ścieków przez kalibrowany otwór (pomiędzy komorą osadnika i komorą koalescencyjną), a następnie przez pionowy króciec-syfon (o średnicy d) do kanału odpływowego; ścieki są wówczas w pełni podczyszczone do założonego stopnia,

– podczas dopływu ścieków w ilości równej wartości strumienia maksymalnego ($Q_{\text{maks}}=800 \text{ dm}^3/\text{s}$), ścieki spiętrzają się w komorze osadnika do wysokości sklepienia zbiornika, przelewają się przez boczny próg przelewowy do kanału obejściowego i odpływają w ilości $Q_{\text{maks}}-Q_{\text{rz}}=674 \text{ dm}^3/\text{s}$ do odbiornika (z pominięciem komory koalescencyjnej); pozostały strumień ścieków ($Q_{\text{rz}}=126 \text{ dm}^3/\text{s} < Q_n$) przepływa przez komorę koalescencyjną, podlegając ciągłemu podczyszczaniu z substancji ropopochodnych (wówczas $Q_{\text{maks}}/Q_{\text{rz}}=6,3$).

Producent separatorów typu TBF [1] nie podaje proporcji rozdziału strumienia ścieków dla $Q_{\text{do}} \in (Q_n; Q_{\text{maks}})$.

Modelowanie przepływu ścieków w separatorach typu TBF

Kanały dopływowe i odpływowe

Strumień objętości przepływu ścieków (q_v) w kanałach dopływowym i odpływowym obliczono ze wzoru de Chezy'ego:

$$q_v = CA\sqrt{IR_h} \quad (1)$$

w którym współczynnik prędkości C wyznaczono ze wzoru Manninga-Stricklera:

$$C = \frac{1}{n} \sqrt[6]{R_h} \quad (2)$$

w których:

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego strumienia, m^2

I – spadek dna kanału, –

R_h – promień hydrauliczny ($R_h=A/U$), m

U – obwód zwilżony, m

n – współczynnik szorstkości kanału ($n=0,013 \text{ s/m}^{1/3}$)

Dla danego strumienia ścieków i napełnienia kanału, wymagany spadek jego dna obliczono ze wzoru:

$$I = \frac{n^2 q_v^2}{A^2 \sqrt[3]{R_h^4}} \quad (3)$$

Przykładowo, dla separatora z bocznym kanałem obejściowym ($Q_n=55 \text{ dm}^3/\text{s}$), przyjmując całkowite wypełnienie kanału dopływowego ($h=D_n=0,5 \text{ m}$), przy maksymalnym strumieniu ścieków deszczowych ($q_v=Q_{\text{maks}}=5Q_n=0,275 \text{ m}^3/\text{s}$), wymagany spadek dna kanału dopływowego wynosi $I_{\text{do}}=0,0055$. Jest to bardzo wysoka wartość, świadcząca o niedowymiarowaniu średnicy tego kanału. Odpowiednia dla tego strumienia ścieków byłaby średnica $D_n=0,6 \text{ m}$, gdyż wówczas spadek dna kanału wyniósłby $I_{\text{do}}=0,0020$ – czyli 2,7-krotnie mniej.

Przy tak określonym spadku dna kanału dopływowego, wypełnienie normalne ($h_{(n)}$), przy nominalnym strumieniu ścieków ($q_v=Q_n=0,055 \text{ m}^3/\text{s}$), może być wyznaczone z rozwiązania równania:

$$\frac{nq_v}{\sqrt{I}} = A(h)R_h^{2/3}(h) \quad (4)$$

w którym:

$A(h)$ i $R_h(h)$ – funkcje głębokości (h) w kanałach dopływowym i odpływowym, –

Po rozwiązaniu równania (4) otrzymano $h_{(n)}=0,15 \text{ m}$.

Przyjmując wypełnienie kanału odpływowego $h=0,9D_n=0,45 \text{ m}$ (największa sprawność hydrauliczna kanału), dla $Q_{\text{maks}}=0,275 \text{ m}^3/\text{s}$, otrzymany ze wzoru (3) spadek dna kanału wynosi $I_{\text{od}}=0,0049$. Dla większej średnicy ($D_n=0,60 \text{ m}$) $I_{\text{od}}=0,0018$ – czyli również 2,7-krotnie mniej. Wypełnienie normalne przy $Q_n=0,055 \text{ m}^3/\text{s}$ wynosi $h_{(n)}=0,16 \text{ m}$.

Dla separatora z centralnym kanałem obejściowym (dla $Q_n=160 \text{ dm}^3/\text{s}$), przy całkowitym wypełnieniu kanału dopływowego ($h=D_n=0,8 \text{ m}$) i maksymalnym strumieniu dopływających ścieków deszczowych ($Q_{\text{maks}}=0,800 \text{ m}^3/\text{s}$), spadek dna kanału dopływowego wyniesie $I_{\text{do}}=0,0039$. Odpowiedniejsza hydraulicznie byłaby średnica kanału $D_n=1,0 \text{ m}$, gdyż wówczas $I_{\text{do}}=0,0011$, czyli 3,5-krotnie mniej. Przyjmując wypełnienie kanału odpływowego $h=0,9D_n=0,71 \text{ m}$, dla strumienia Q_{maks} otrzymuje się $I_{\text{od}}=0,0034$. Dla średnicy $D_n=1,0 \text{ m}$ można otrzymać spadek $I_{\text{od}}=0,0010$, tj. równy spadkowi minimalnemu, stosowanemu w kanalizacji dla tej średnicy kanału.

Separatory z bocznym kanałem obejściowym

Ze względu na usytuowanie kanałów obejściowych, modelowanie hydrauliczne przepływów ścieków wewnątrz separatorów typu TBF przeprowadzono oddzielnie dla dwóch typów szeregów:

- z bocznym kanałem obejściowym (np. $Q_n=55 \text{ dm}^3/\text{s}$),
- z centralnym kanałem obejściowym (np. $Q_n=160 \text{ dm}^3/\text{s}$).

Strumień ścieków (q_v) przepływających przez komorę koalescencyjną separatora z bocznym kanałem obejściowym, w warunkach pracy nominalnej, obliczono ze wzoru:

$$q_v = n_s \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{2g\Delta h}{\zeta + \frac{\lambda l_r}{d}} \right)^{1/2} \quad (5)$$

w którym:

- n_s – liczba syfonów odpływowych w komorze koalescencyjnej,–
- d – średnica syfonu, m
- Δh – różnica między poziomami ścieków w komorze osadnika i w kanale odpływowym, m
- ζ – współczynnik miejscowych oporów przepływu w syfonie (wlot do rury, załamanie 90° i wylot z rury – $\zeta=2,5$),–
- λ – współczynnik oporu liniowego rury syfonu o długości l_r ,–
- g – przyspieszenie ziemskie ($g=9,81 \text{ m/s}^2$)

Wartość wysokości Δh ustalono przyjmując, że ścieki mogą być spiętrzone co najwyżej do wysokości M krawędzi przelewowej po stronie dopływu do separatora, natomiast po stronie odpływu ich poziom określa wysokość wypełnienia normalnego ($h_{(n)}$) w kanale odpływowym, podczas przepływu z co najwyżej nominalnym strumieniem ścieków ($q_v \leq Q_n$). We wzorze (5) pominięto straty występujące podczas przepływu ścieków przez wkłady koalescencyjne, uznając je za małe wobec pozostałych strat, gdyż prędkości przepływu są tam również małe.

Strumień ścieków (q_v) przepływających przez komorę koalescencyjną przy $Q_{maks}=5Q_n$ obliczono również ze wzoru (5). Wówczas wartość wysokości Δh wyznaczono przyjmując, że kanał dopływowy może wypełnić się całkowicie (pozostając jednak w sensie hydraulicznym korytem otwartym), a kanał odpływowy może napełnić się co najwyżej do wysokości $0,9D_n$. Wobec tego, że w analizowanych separatorach kanał odpływowy leży głębiej niż kanał dopływowy o wartość $H_o=5 \text{ cm}$, wysokość Δh osiągnie co najwyżej wartość $H_o+0,1D_n$.

Separatory z centralnym kanałem obejściowym

Z konstrukcji tych separatorów wynika, że strumień ścieków (q_v) przepływający przez komorę koalescencyjną należy obliczać ze wzoru:

$$q_v = \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{2g\Delta h}{\zeta + \frac{\lambda l_r}{d} + \left(\frac{\pi d^2}{4\mu A_o} \right)^2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

w którym (poza wielkościami jak we wzorze (5) przy $n_s=1$ i $\zeta=2$):
 μ – współczynnik przepływu dla kalibrowanego otworu pomiędzy komorą osadnika i komorą koalescencyjną ($\mu=0,6$),–
 A_o – pole powierzchni otworu, m^2

Wartości Δh przyjęto analogicznie jak w poprzednim wypadku. Na podstawie wzorów (5) i (6) można ustalić położenie krawędzi przelewu tak, aby dla strumienia $q_v \leq Q_n$ przepływ ścieków następował tylko przez komorę koalescencyjną separatora. Kiedy strumień ścieków przekroczy wartość nominalną, wówczas część ścieków przepłynie do kanału obejściowego. Należy tutaj uwzględnić także właściwe napełnienie kanału odpływowego, odpowiadające nominalnemu strumieniowi ścieków. Spadek dna kanału odpływowego wynika z wymagania, aby był on wypełniony co najwyżej do wysokości $0,9D_n$ dla maksymalnego strumienia ścieków ($5Q_n$), natomiast kanał dopływowy ma większy spadek, gdyż dopuszcza się jego całkowite wypełnienie dla strumienia $5Q_n$ (pracuje on z mniejszą sprawnością hydrauliczną). Przyjmując $q_v=Q_n$ do wzorów (5) i (6), można wyznaczyć położenie krawędzi przelewu bocznego.

Podczas dopływu maksymalnego strumienia ścieków deszczowych (Q_{maks}) do separatora ustalają się inne poziomy ścieków na dopływie i odpływie do komór koalescencyjnych, niż podczas dopływu strumienia nominalnego (Q_n). Określają je przyjęte (maksymalne) napełnienia kanałów dopływowego i odpływowego, co oznacza, że nie jest możliwe dobranie parametrów tego urządzenia hydraulicznego tak, aby w warunkach dopływu strumienia nominalnego (Q_n), jak i maksymalnego (Q_{maks}), strumień ścieków przepływających przez komorę koalescencyjną separatora był taki sam ($Q_{rz} \neq Q_n$). Udaje się tylko uzyskać zbliżone do siebie wartości tych strumieni (tab. 1 i 2). Uwaga ta odnosi się do wszystkich urządzeń hydraulicznych nie zawierających nastawnych elementów regulacyjnych, takich jak zawory czy kłapy regulacyjne, które mają zmienny opór hydrauliczny. Wartość takiego oporu byłaby nastawiana zależnie od potrzeb, z użyciem zewnętrznej siły mechanicznej. W wypadku analizowanych separatorów takie rozwiązania nie są stosowane.

W wyniku zaproponowanych w pracy zmian wartości niektórych parametrów konstrukcyjnych (średnice kanałów dopływowych i odpływowych, a także spadki dna kanałów odpływowych oraz średnice syfonów), uzyskano zadowalającą dokładność rozdziału strumieni ścieków przepływających wewnątrz wszystkich 22 analizowanych separatorów na wymaganym poziomie [2], tj. $Q_{rz} \in \langle Q_n; 1,15Q_n \rangle$, dla zakładanych dyskretnie strumieni ścieków dopływających do separatorów $Q_{do} = \{1,2,3,4,5\} Q_n$, czyli spełniono przyjęty na wstępie warunek technologiczny ich poprawnego działania, a mianowicie $Q_{maks}/Q_{rz} \leq 5$ (tab. 1 i 2).

Kanały obejściowe

Zagadnienie hydrauliki przepływu ścieków przez kanał obejściowy ($Q_{ob}=Q_{do}-Q_{rz}$) jest dużo bardziej złożone, niż poprzednio omówione. Ścieki dopływają do tego kanału przez przelewy boczne, które są zbadane przede wszystkim w przypadkach, gdy ścieków ubywa w kierunku przepływu [3,4], natomiast badany przypadek jest odwrotny – ścieki są zbierane z otoczenia i przelewając się przez koronę bocznego przelewu dopływają do kanału obejściowego. Dlatego należy wyróżnić w kanale obejściowym dwie części, tj. część zawierającą przelew i zwykły kanał otwarty (obydwie części o dnie poziomym). Część kanału z przelewem jest szczególnie skomplikowana pod względem hydraulicznym. Ścieki wpływają najpierw do syfonu wlotowego (o powierzchni $3/2$ pola przepływu przez przelew), zlokalizowanego w komorze osadnika, który nadaje im prawie pionowy kierunek przepływu.

Nad przelewem bocznym ścieki zmieniają kierunek na prawie poziomy i wpływają do kanału obejściowego. Całe zjawisko przepływu ścieków przez taki przelew przebiega różnie, w zależności od strumienia ścieków przepływających w kanale obejściowym. Podczas małych przepływów (do $2Q_n$), przy których poziom ścieków w kanale obejściowym nie osiąga korony przelewu (lub tylko nieznacznie ją przewyższa), traktuje się przelew jako niezatopiony. Wówczas wartość strumienia ścieków oblicza się według wzoru:

$$q_v = \frac{2}{3} \mu l h_{(p)} \sqrt{2gh_{(p)}} \quad (7)$$

w którym:

μ – współczynnik przepływu przelewu, –
 l – długość krawędzi przelewu, m
 $h_{(p)}$ – wysokość warstwy przelewowej, m

Kiedy poziom ścieków w kanale obejściowym – w miarę wzrostu strumienia – podniesie się względem korony przelewu tak, że osiągnie wysokość przekraczającą 30% wysokości warstwy przelewowej, przelew staje się zatopiony i wówczas wzór (7) przyjmuje postać:

$$q_v = \frac{2}{3} \mu \delta l h_{(p)} \sqrt{2gh_{(p)}} \quad (8)$$

w której:

δ – współczynnik zatopienia przelewu, –

Formuły na obliczenie wartości współczynników do wzorów (7) i (8) zaczerpnięto z literatury [5,6]:

$$\mu = 0,607 + \frac{0,00452}{h_{(p)}} \quad (9)$$

$$\delta = 1,05 \sqrt[3]{\frac{z}{h_{(p)}}} \quad (10)$$

w których:

z – różnica między poziomem cieczy nad przelewem i w kanale obejściowym na końcu przelewu ($z/h_{(p)} < 0,7$; gdy $z/h_{(p)} \geq 0,7$ to $\delta=1$), –

W postaciach wzorów (9) i (10) uwzględniono fakt, że przelew poprzedza pionowy syfon. Dlatego składniki w tych wzorach, które uwzględniają poprawki na niezerową wartość prędkości dopływu przed przelewem, zostały pominięte. W tym wypadku energia kinetyczna dopływających ścieków została automatycznie uwzględniona (przechodząc w energię potencjalną), podobnie jak w wypadku swobodnej strugi ścieków wypływającej pionowo ku górze.

Wartość parametru z może zostać obliczona wówczas, jeśli znana będzie głębokość napełnienia kanału obejściowego na końcu przelewu. Wymaga to rozwiązania równania różniczkowego ustalonego, nierównomiernego, ruchu w kanale o niezmiennym wzdłuż osi kształcie przekroju poprzecznego i poziomym dnie [3,7–9]:

$$\frac{dh}{dx} = - \frac{\frac{U}{C^2 A^3} q_v^2}{1 - \frac{\alpha b}{g A^3} q_v^2} \quad (11)$$

w którym:

$h=h(x)$ – wysokość poziomu ścieków w kanale obejściowym w odległości x od początku układu współrzędnych (względem końca przelewu), m

$\alpha=1,3$ – współczynnik Coriolisa ($\alpha \in <1,1; 1,3>$ [3,8,9]), –

$b=b(h)$ – szerokość zwierciadła ścieków w kanale w odległości x , m

$A=A(h)$, $C=C(h)$, $U=U(h)$ – funkcje głębokości h w kanale obejściowym, –

Równanie (11) musi spełniać warunek brzegowy, że na końcu kanału obejściowego ($x=L_k-1$) jego głębokość jest równa głębokości napełnienia kanału odpływowego, dla strumienia przepływających ścieków równego strumieniowi w kanale obejściowym, podczas gdy w kanale odpływowym strumień ten równa się całkowitemu strumieniowi ścieków przepływających przez urządzenie. W obydwu typach separatorów tak obliczone spiętrzenie ścieków – tzw. cofka piętrząca w kanale obejściowym – osiągało co najwyżej wartość 2 cm (podczas przepływu strumienia $5Q_n$).

Optymalizacja parametrów eksploatacyjnych separatorów typu TBF

Wartość strumienia ścieków przepływających przez separator zależy od wielu parametrów o wartościach dyskretnych i ciągłych. Do parametrów o wartościach dyskretnych należą np. średnice kanałów i syfonów, opory miejscowe i zadane charakterystyczne strumienie przepływu, natomiast do parametrów o wartościach ciągłych zalicza się np. długość krawędzi przelewu (l), wysokość korony przelewu nad dnem kanału obejściowego (M) i spadek dna kanału odpływowego (I_{od}). Każdy z tych parametrów może przyjmować wartości z ograniczonych przedziałów zależnych od konstrukcji separatorów, ich właściwej pracy pod względem hydraulicznym (kanały dopływowy i odpływowy) i innych względów.

Minimalną wartość spadku (I_{do}) dna kanału dopływowego ustalono ze wzoru (3), przyjmując jego całkowite napełnienie dla strumienia ścieków $q_v=5Q_n$ (tab. 1 i 2). Spadek ten może być też przyjęty jako większy od wartości obliczonej, wówczas separator wymusi zatopienie tego kanału przy Q_{maks} . Spadek dna kanału odpływowego (I_{od}) musi być zgodny z obliczonym (tab. 1 i 2), gdyż wysokość jego napełnienia istotnie wpływa na rozdział strumienia ścieków dopływających do urządzenia, tj. na część przepływającą przez komorę koalescencyjną (co najwyżej $1,15Q_n$) i resztę odprowadzaną do kanału obejściowego. Spadek ten dobrano tak, aby kanał był napełniony do wysokości $h_{od} \in (0,8; 0,9) > D_n$, preferując wartości bliższe $0,9D_n$ przy Q_{maks} .

Takie parametry, jak średnice obydwu kanałów i syfonów odpływowych dobrano metodą prób, skupiając się na obliczeniach wartości parametrów ciągłych, którymi były wielkości $\{l, M, I_{od}\}$. Wynika to z faktu, że związki między wielkościami $\{l, M, I_{od}\}$ dają się opisać równaniami o zmiennych ciągłych, tworzących następujący układ trzech równań:

$$Q - q = \frac{2}{3} \mu \delta l h_{(p)} \sqrt{2gh_{(p)}} \quad (12a)$$

$$q = \left(\frac{M + h_{(p)} + \zeta_b \left(\frac{Q - q}{1,5 l h_p} \right)^2 \frac{1}{2g} - h_{od}}{\Delta h} \right)^{1/2} \quad (12b)$$

$$I_{od} \left(\frac{q}{\chi}, \frac{M - \Delta h}{D_n} \right) = I_{od} \left(Q, \frac{h_{od}}{D_n} \right) \quad (12c)$$

Tabela 1. Wybrane parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne separatorów TBF z bocznym kanałem obejściowym (typoszereg 1250/1500/1900 mm)

Q_n dm ³ /s	D_n mm	l_{do} (min.) ‰	l_{od} (const) ‰	Q_{rz} dm ³ /s	$Q_{maks}=5Q_n$ dm ³ /s	$Q_{ob}=Q_{maks}-Q_{rz}$ dm ³ /s	Q_{maks}/Q_{rz}
15	400	1,3	1,1	27	75	48	2,8
			1,7*	17*		58*	4,4*
20	400	2,3	2,0	27	100	73	3,7
			2,6*	23*		77*	4,3*
25	400	3,6	3,2	27	125	98	4,6
			3,5*	29*		96*	4,3*
30	400	5,2	4,6	27	150	123	5,6
	500	1,6*	1,6*	34*		116*	4,4*
35	400	7,1	6,2	27	175	148	6,5
	500*	2,2*	2,5*	40*		135*	4,4*
40	400	9,2	8,1	55	200	145	3,6
	500*	2,9	3,3*	46*		154*	4,3*
45	400	11,7	10,3	55	225	170	4,1
	500*	3,7*	3,6*	52*		173*	4,3*
50	500	4,6	4,0	58	250	192	4,3
	600*	1,7*	1,6*	57*		193*	4,4*
55	500	5,5	4,9	58	275	217	4,7
	600*	2,0*	2,0*	63*		212*	4,4*
60	500	6,6	5,8	58	300	242	5,2
	600*	2,4*	2,5*	69*		231*	4,3*
70	500	9,0	7,9	58	350	292	6,0
	600*	3,2*	3,4*	80*		270*	4,4*
80	500	11,7	10,3	58	400	342	6,9
	600*	4,2*	4,1*	92*		308*	4,3*

*Parametry po optymalizacji hydraulicznej

Tabela 2. Wybrane parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne separatorów TBF z centralnym kanałem obejściowym (typoszereg 2400/3000 mm)

Q_n dm ³ /s	D_n mm	l_{do} (min.) ‰	l_{od} (const) ‰	Q_{rz} dm ³ /s	$Q_{maks}=5Q_n$ dm ³ /s	$Q_{ob}=Q_{maks}-Q_{rz}$ dm ³ /s	Q_{maks}/Q_{rz}
90	600	5,4	4,7	94	450	356	4,8
	800*	1,2*	1,1*	101*		349*	4,5*
100	600	6,6	5,8	97	500	403	5,2
	800*	1,5*	1,5*	115*		385*	4,3*
120	600	9,5	8,4	102	600	498	5,9
	800	2,2*	2,2*	138*		462*	4,3*
140	800	3,0	2,6	124	700	576	5,7
	1000*	0,9*	0,8*	157*		543*	4,5*
160	800	3,9	3,4	126	800	674	6,3
	1000*	1,1*	1,0*	179*		621*	4,5*
180	800	5,0	4,4	188	900	712	4,8
	1000*	1,4*	1,3*	202*		698*	4,5*
200	800	6,1	5,4	195	1000	805	5,1
	1000*	1,7*	1,7*	230*		770*	4,3*
220	800	7,4	6,5	202	1100	898	5,4
	1000*	2,1*	2,2*	253*		847*	4,3*
240	800	8,8	7,8	209	1200	991	5,7
	1000*	2,5*	2,4*	276*		924*	4,3*
300	1000	3,9	3,4	213	1500	1287	7,0
	1200*	1,5*	1,5*	345*		1155*	4,3*

*Parametry po optymalizacji hydraulicznej

Tabela 3. Parametry eksploatacyjne separatorów TBF z bocznym kanałem obejściowym po optymalizacji

Q_n dm ³ /s	Q_{rz}/Q_n (dla 1 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 2 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 3 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 4 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 5 Q_n)
15	1,0	1,04	1,08	1,12	1,15
20	1,0	1,05	1,09	1,13	1,15
25	1,0	1,06	1,11	1,14	1,15
30	1,0	1,07	1,12	1,15	1,15
35	1,0	1,05	1,09	1,12	1,15
40	1,0	1,05	1,09	1,13	1,15
45	1,0	1,06	1,11	1,14	1,15
50	1,0	1,07	1,12	1,15	1,15
55	1,0	1,06	1,11	1,15	1,15
60	1,0	1,05	1,10	1,13	1,15
70	1,0	1,05	1,09	1,13	1,15
80	1,0	1,06	1,10	1,12	1,15

Tabela 4. Parametry eksploatacyjne separatorów TBF z centralnym kanałem obejściowym po optymalizacji

Q_n dm ³ /s	Q_{rz}/Q_n (dla 1 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 2 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 3 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 4 Q_n)	Q_{rz}/Q_n (dla 5 Q_n)
90	1,0	1,07	1,12	1,14	1,12
100	1,0	1,07	1,12	1,15	1,15
120	1,0	1,07	1,12	1,15	1,15
140	1,0	1,07	1,12	1,15	1,12
160	1,0	1,08	1,13	1,15	1,12
180	1,0	1,07	1,11	1,14	1,12
200	1,0	1,07	1,12	1,14	1,15
220	1,0	1,06	1,10	1,13	1,15
240	1,0	1,07	1,11	1,14	1,15
300	1,0	1,06	1,10	1,13	1,15

w których:

Q – zakładany dyskretnie strumień ścieków dopływających do urządzenia ($Q=Q_{d0}=kQ_n$, $k=1, \dots, 5$), m³/s

q – strumień ścieków przepływających przez komorę koalescencyjną ($q=\chi Q_n=Q_{rz}$), m³/s

χ – współczynnik przeciążenia komory koalescencyjnej (przyjęto $\chi \in <1; 1,15>$), –

ζ_b – współczynnik oporu miejscowego syfonu wlotowego do kanału obejściowego ($\zeta_b=1,0$), –

$h_{(p)}$ – wysokość warstwy przelewowej (z uwzględnieniem równania (11)), m

h_p – wysokość otworu przelewowego (w płaszczyźnie krawędzi przelewu), m

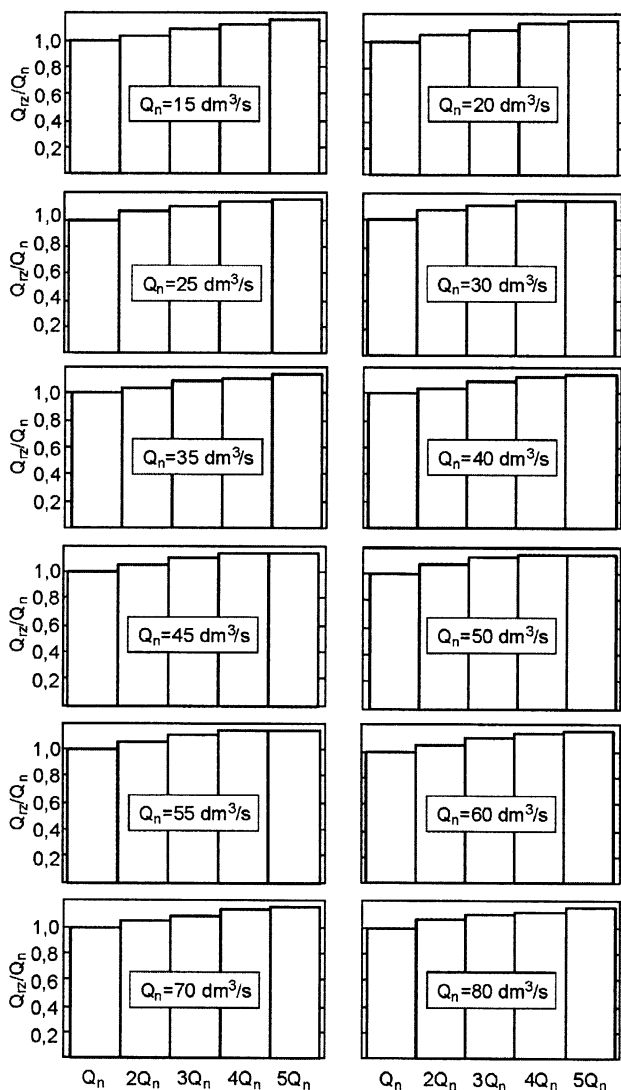
h_{od} – głębokość napełnienia kanału odpływowego (przyjęto $h_{od} \in (0,8; 0,9) > D_n$), m

I_{od} – spadek dna kanału odpływowego według wzoru (3), –

Jeśli przyjąć $Q=5Q_n$, $q=\chi Q_n$ i $h_{(p)}=h_p$, to z układu równań nieliniowych (12) można obliczyć wartości $\{1, M, h_{od}\}$. Do obliczeń przyjęto $h_{(p)}$ równe wysokości otworu przelewowego – dla separatorów typoszeregu z bocznym kanałem obejściowym, bądź wysokości tego otworu pomniejszone o 1 cm – dla typoszeregu z centralnym kanałem obejściowym. Jeżeli wartości obliczone z rozwiązania układu równań (12) nie spełniły oczekiwań, konieczna była korekta wartości D_n bądź d . Po obliczeniu wartości $\{1, M, h_{od}\}$ należało obliczyć wysokość straty energii na syfonie dolotowym do kanału obejściowego, aby można było się upewnić, że podczas przepływu $5Q_n$ wypełnienie kanału dopływowego nie przekroczy wartości D_n .

Końcowy etap obliczeń polegał na sprawdzeniu, czy podczas przepływu ścieków przez separator o strumieniach kQ_n , dla $k=1, \dots, 5$, strumień ścieków przepływających przez komorę koalescencyjną nie przekroczy dopuszczalnej wartości $1,15Q_n$. Obliczenia wykonano posługując się dwoma pierwszymi równaniami układu (12). Ponieważ wymiary przelewu i spadek dna kanału odpływowego były już znane, dlatego można było obliczyć rzeczywisty strumień ścieków przepływających przez komorę koalescencyjną, a także grubość warstwy przelewowej potrzebną do sprawdzenia typu przepływu przez przelew (zatopiony czy niezatopiony). Wyniki tych obliczeń są zawarte w tabelach 3 i 4 oraz na rysunkach 2 i 3, które przedstawiają względne rzeczywiste wartości strumienia ścieków przepływającego przez komory koalescencyjne, odpowiednio dla kQ_n przy $k=1, \dots, 5$ w kolejności występowania typowości separatorów podanych w poprzednich tabelach.

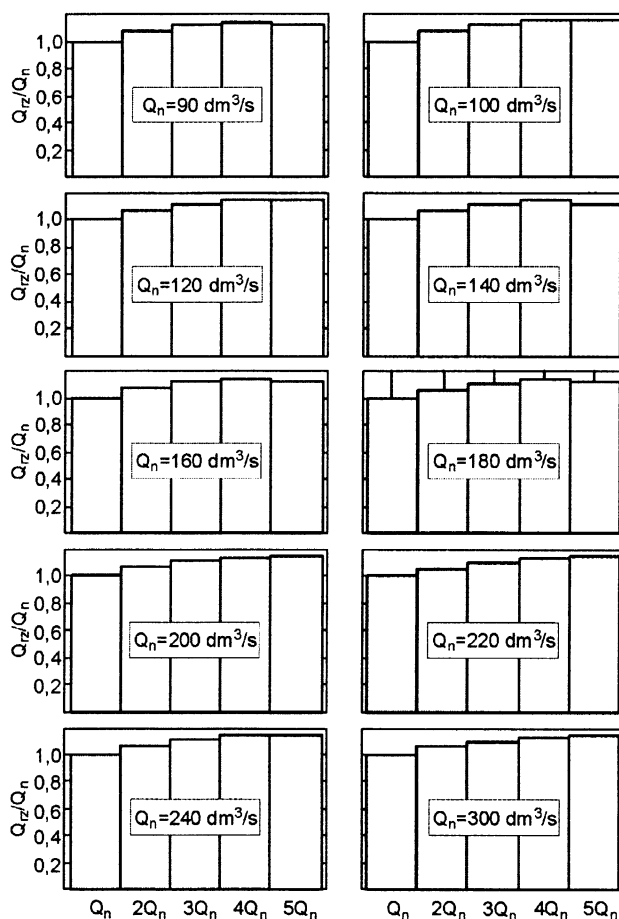
Można zauważyć, że 4 separatory TBF typoszeregu z centralnym kanałem obejściowym osiągają maksymalną wartość strumienia ścieków przepływających przez komory koalescencyjne dla strumienia ścieków dopływających do separatorów wynoszącego $4Q_n$, pozostałe zaś osiągają wartość $Q_{rz}=1,15Q_n$ dla $Q_{maks}=5Q_n$. W trakcie obliczeń w równaniach (12) początkowo zakładano zawsze $\chi=1,15$ dla Q_{maks} , zatem musiała ona zostać skorygowana tak, aby nie przekroczyć zakładanych wartości strumieni, czyli $1,15Q_n$ dla pośrednich strumieni ścieków dopływających. Zadowolający rezultat osiągnięto w tych czterech przypadkach, przyjmując $\chi=1,12$ dla Q_{maks} (tab. 4, rys. 3).



Rys. 2. Względny strumień ścieków (Q_{rz}/Q_n) przepływających przez komory koalescencyjne w separatorach typu TBF z bocznym kanałem obejściowym dla strumienia kQ_n ($k=1, \dots, 5$)

Wyniki obliczeń sprawdzających działanie dotychczasowych konstrukcji analizowanych separatorów (tj. rozdziału strumienia ścieków wewnątrz urządzeń, przy Q_n oraz $5Q_n$) oraz po modernizacji hydraulicznej urządzeń, tj. po zmianach wartości niektórych parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych separatorów TBF w dwóch typoszeregach podano w tabelach 1 i 2. W tabelach 3 i 4 oraz na rysunkach 2 i 3 podano natomiast wyniki obliczeń rozdziału strumienia ścieków Q_{rz}/Q_n w zmodernizowanych separatorach, przy Q_n , $2Q_n$, $3Q_n$, $4Q_n$ i $5Q_n$. Tym samym wykazano zakładaną poprawność hydrauliczną działania zmodernizowanych separatorów.

Dla przykładu, modernizacja konstrukcji separatora dla $Q_n=55 \text{ dm}^3/\text{s}$ (typoszereg z bocznym kanałem obejściowym), polegająca na zwiększeniu średnicy kanałów dopływowego i odpływowego z $D_n=500 \text{ mm}$ do $D_n=600 \text{ mm}$ (przy spadkach $I_{do}=I_{od}=2,0\%$), spowodowała prawie 3-krotne zmniejszenie wymaganych spadków dna tych kanałów, w porównaniu do pierwotnych średnic, przy zachowaniu przyjętej dokładności rozdziału strumienia ścieków wewnątrz urządzenia $Q_{rz}=1,15Q_n=63 \text{ dm}^3/\text{s}$ – przy $Q_{maks}=275 \text{ dm}^3/\text{s}$ i $Q_{maks}/Q_{rz}=4,4$ oraz $Q_{ob}=275-63=212 \text{ dm}^3/\text{s}$ (tab. 1). Długość krawędzi przelewowej zmalała o 5%.



Rys. 3. Względny strumień ścieków (Q_{rz}/Q_n) przepływających przez komory koalescencyjne w separatorach typu TBF z centralnym kanałem obejściowym dla strumienia kQ_n ($k=1, \dots, 5$)

Modernizacja konstrukcji separatora dla $Q_n=160 \text{ dm}^3/\text{s}$ (typoszereg z centralnym kanałem obejściowym), polegająca na jednoczesnym zwiększeniu średnicy kanałów dopływowego i odpływowego z $D_n=800 \text{ mm}$ do $D_n=1000 \text{ mm}$ (przy spadkach $I_{do}=1,1\%$ oraz $I_{od}=1,0\%$) oraz średnicy syfonu, spowodowała 3,5-krotne zmniejszenie wymaganych spadków dna kanałów, w porównaniu do pierwotnych średnic, przy zachowaniu z przyjętą dokładnością rozdziału strumienia ścieków wewnątrz tego urządzenia $Q_{rz}=1,12Q_n=179 \text{ dm}^3/\text{s}$ – przy $Q_{maks}=800 \text{ dm}^3/\text{s}$ i $Q_{maks}/Q_{rz}=4,5$ oraz $Q_{ob}=800-179=621 \text{ dm}^3/\text{s}$. Przed modernizacją było $Q_{rz}=0,79Q_n=126 \text{ dm}^3/\text{s}$ – zdecydowanie za mało oraz $Q_{ob}=800-126=674 \text{ dm}^3/\text{s}$ i $Q_{maks}/Q_{rz}=6,3>5$ – zdecydowanie za dużo (tab. 2). Długość krawędzi przelewowej zmalała o 50%.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń hydraulicznych stwierdzono, że wszystkie separatory typu TBF o dotychczasowej konstrukcji (w dwóch typoszeregach) zapewniają w przybliżeniu nominalną przepustowość (Q_n) urządzenia, w czasie gdy kanał obejściowy nie pracuje, oraz przepustowość maksymalną ($Q_{maks}=5Q_n$), gdy część ścieków przepływa kanałem obejściowym, pod warunkiem, że spadki dna kanałów dopływowego i odpływowego są znaczne (tj. co najmniej takie, jak podano w tab. 1 i 2), nie gwarantując jednakże z dostateczną dokładnością zakładanego technologicznie [2] rozdziału strumienia ścieków wewnątrz niektórych

urządzeń, tj. spełnienia warunku ich poprawnego działania $Q_{maks}/Q_{rz} \leq 5$.

Przedstawiony w pracy sposób modernizacji hydraulicznej analizowanych urządzeń, polegający na zwiększeniu średnic kanałów dopływowych i odpływowych większości separatorów TBF i ustaleniu spadków dna kanałów odpływowych oraz korekcie średnic niektórych syfonów (w komorach koalescencyjnych), spowodował wielokrotne zmniejszenie wartości wymaganych spadków (minimalnych bądź stałych) dna kanałów dopływowych i odpływowych (2,7+4,5-krotnie, przeciętnie 3,5-krotnie), przy zakładanym rozdziale strumienia ścieków wewnątrz wszystkich urządzeń z przyjętą, wg zaleceń [2], dokładnością, tj. $Q_{rz} \in <Q_n; 1,15Q_n>$ – przy strumieniach ścieków dopływających do separatorów $Q_{do} \in \{1,2,3,4,5\}Q_n$. Uzyskano też przy tym, w większości wypadków, znaczne skrócenie długości krawędzi przelewu, wskutek zwiększenia wysokości warstwy przelewowej ścieków (wynikającej głównie ze zwiększenia średnic kanałów).

Należy zaznaczyć, że obliczenia (modelowanie) hydrauliczne oparto na literaturowych wartościach współczynników we wzorach i równaniu ruchu, zaś pewność co do rzeczywistych warunków przepływów wewnątrz analizowanych urządzeń można uzyskać dopiero po wykonaniu badań modelowych. Prezentowane w pracy wyniki badań stanowią próbę optymalizacji hydraulicznej separatorów na drodze teoretycznej.

Kotowski, A., Szewczyk, H., Wartalski, A. Optimizing the Operating Parameters for the Separators of TBF-Type Petroleum Distributors. *Ochrona Środowiska* 2005, Vol. 27, No. 2, pp. 29–36.

Abstract: The problem dealt with in this paper is the hydraulic reconstruction of petroleum derivative separators integrated with the settling tank and with a lateral or central by-pass channel of the coalescence chamber (inside the separator). The functioning of such systems was shown on hydraulic models – with a free discharge of wastewater from the sedimentation tank through a side overflow into the by-pass channel, and with

LITERATURA

1. Katalog stalowych separatorów substancji ropopochodnych TBF, typoszereg $\phi 1250/1500/1900$ oraz $\phi 2400/3000$. Techneau Polska sp. z o. o., Łódź 2003/2004.
2. Zalecenia aprobacyjne do modernizacji separatorów TBF. Instytut Ochrony Środowiska, Zespół Normalizacji i Aprobata Technicznych, Warszawa 2004.
3. A. KOTOWSKI: Podstawy wymiarowania bocznych przelewów burzowych z rurą dławiącą. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.
4. A. KOTOWSKI: Dimensionless equation for side-channel weirs. Bezwymiarowe równanie dla kanałów z boczną krawędzią przelewową. Arch. Hydro-Eng. and Environ. Mech., 2001, Vol. 48, No. 1, pp. 97–113.
5. E. Z. RABINOVICZ: Gidravlika. Gosudar. Izdat. Fiziko-Matemat. Literat., Moskwa 1961.
6. M. A. MOSTKOV: Příkladnaya gidromekhanika. Gosudar. Energ. Izdat., Moskva–Leningrad 1963.
7. K. JEŻOWIECKA-KABSCH, H. SZEWCZYK: Mechanika płynów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.
8. R. PUZYREWSKI, J. SAWICKI: Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
9. J. SAWICKI: Przepływy ze swobodną powierzchnią. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.

a throttled discharge of wastewater from the coalescence chamber through siphon elbows or outflow tubes with a float valve (of specified diameters) into the discharge channel. The paper also specifies the diameters, as well as the minimum and optimal bottom slopes of the inlet and outlet channels, after appropriate changes have been made in the dimensions of the outflow tubes and siphon elbows, and in the height and length of the overflow weir. Calculations have confirmed that the distribution of wastewater flow inside the unit is as assumed, both at rated and maximal flow.

Keywords: Wastewater system, separator with by-pass, flow division, modeling, hydraulic reconstruction.