

Ferenc Abraham

BADANIA NAD USPRAWNINIEM PROCESU SEDYMENTACJI W KLAROWNIKACH

W literaturze technicznej wiele uwagi poświęca się usprawnieniu procesów usuwania zawieszin z wody lub ścieków [1, 2, 3]. Ostatnie doniesienia mówią już o konkretnych zastosowaniach pakietów sedymentacyjnych oraz podają wyniki badań eksploatacyjnych osadników wielostrumieniowych [4, 5]. Wyniki badań potwierdzają skuteczność intensyfikacji procesu sedymentacji [2, 6, 7].

W ostatnich latach na rynku węgierskim ukazało się wiele gotowych elementów do osadników wielostrumieniowych, wśród nich pakietu typu Kary (RFN) oraz pakietu typu Norex, Tetraflok (WRL). Pakiety te są wykonane ze sklejonych cienkich płyt PCV, o gładkiej powierzchni oraz chronionym patentem, kształcie przekroju poprzecznego. Warunkiem zastosowania pakietów sedymentacyjnych w urządzeniach wodociagowych jest atest służby zdrowia oraz osiągnięcie doświadczalnie potwierdzonych właściwych efektów technologicznych (świadcstwo techniczne).

Pakiety sedymentacyjne znajdują zastosowanie w nowo budowanych osadnikach wielostrumieniowych lub w modernizowanych osadnikach konwencjonalnych. Według analizy ekonomicznej, modernizacja istniejących obiektów (celem ich intensyfikacji i zwiększenia wydajności) kosztuje około 1/5—1/3 części inwestycji nowo budowanego obiektu [8, 9].

Ze względu na ograniczoną obecnie możliwość ujęcia wszystkich parametrów i zmiennych procesu w analizie teoretycznej, zaleca się przed budową lub modernizacją osadników przeprowadzenie badań pilotowych [4, 5].

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań nowego typu pakietu wmontowanego w klarownik z zawieszonym osadem. Badania prowadzono na stacji doświadczalnej uzdatniania wody, o wydajności 800 m³/d, znajdującej się przy Instytucie Gospodarki Wodnej Wyższej Szkoły im. M. Pollacka w Baja. Szczególną uwagę zwrócono na niektóre problemy związane z intensyfikacją procesów klarowania w klasycznych urządzeniach, a także na matematyczny opis tych procesów.

Hydraulika procesu sedymentacji

W procesie sedymentacji ważną rolę odgrywa charakter ruchu wody. Dla oceny charakteru ruchu wody korzysta się z liczby Reynoldsa, której wartość kryterialna $Re \leq 500$ świadczy

o ruchu laminarnym. Stabilność procesu sedymentacji określa się za pomocą liczby Froude'a, której wartość krytyczna $Fr \geq 10^{-5}$ świadczy o stabilności ruchu wody. W celu zwiększenia stabilności ruchu wody w osadnikach dąży się do jednoczesnego zmniejszenia liczby Reynoldsa i zwiększenia liczby Froude'a przez zwiększenie obwodu zwilżonego dokonanego na drodze podziału przestrzeni sedymentacji [10]. Poniewa $R_h = A/O_z$, zatem:

$$Re = \frac{v \cdot A}{\nu \cdot O_z} ; Fr = \frac{v^2 \cdot O_z}{g \cdot A} \quad (1)$$

gdzie:

- Re — liczba Reynoldsa
- Fr — liczba Froude'a
- A — powierzchnia zwilżona
- R_h — promień hydrauliczny
- O_z — obwód zwilżony
- ν — lepkość kinematyczna
- v — prędkość przepływu wody
- g — przyspieszenie ziemskie.

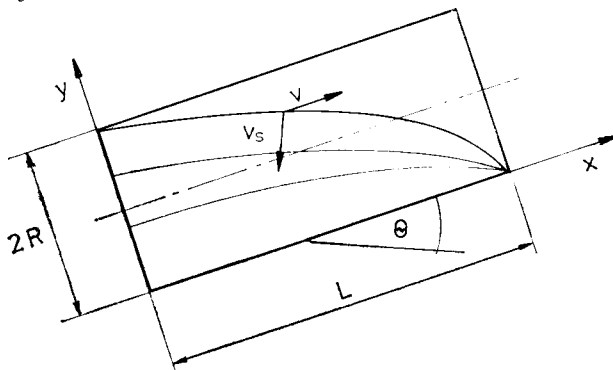
Dla konkretnych wartości liczb Re i Fr można określić wartość promienia hydraulicznego następująco:

$$R_h = \frac{Re \cdot \nu}{v} = \frac{v^2}{Fr \cdot g} = \sqrt{\frac{Re^2 \cdot \nu^2}{Fr \cdot g}} \quad (2)$$

Z równania tego wynika, że krytyczne wartości promienia hydraulicznego, odpowiadające granicznym wartościom liczb kryterialnych dla ruchu laminarnego, wynoszą:

$$\begin{aligned} \text{dla } t = 293 \text{ K} \quad R_h &= 13,8 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ \text{dla } t = 273 \text{ K} \quad R_h &= 20,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}. \end{aligned}$$

Promienie hydrauliczne stosowanych w praktyce elementów rurowych są mniejsze niż wymiary krytyczne wyprowadzone z równania (2). Uzasadnione jest zatem przyjęcie laminarnego ruchu wody w rurach. Schemat elementu rurowego wraz z oznaczeniami jest pokazany na rys. 1.



Rys. 1 Schemat rury sedymentacyjnej

Dla ruchu ustalonego można przyjąć:

$$V_x = v - v_s \cdot \sin \Theta \quad (3)$$

$$V_y = -v_s \cdot \cos \Theta \quad (4)$$

Równanie różniczkowe trajektorii sedymentacyjnych cząstek ma postać:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-v_s \cdot \cos \Theta}{v - v_s \cdot \sin \Theta} \quad (5)$$

w którym:

v_s — prędkość opadania cząstek

v — prędkość miejscowa przepływu wody

Θ — kąt nachylenia rur względem poziomu.

Po scałkowaniu równania różniczkowego (5) z uwzględnieniem warunków brzegowych:

$y=0$ dla $x=1$, $y=2R$ dla $x=0$, oraz przyjęciu,

że $v = \frac{g \cdot I}{4\nu} (R^2 - r^2)$ otrzymujemy:

$$v_s (\sin \Theta + L \cos \Theta) = \frac{g \cdot I \cdot R^2}{6\nu} \quad (6)$$

gdzie: $L=1/2R$ (I — spadek hydrauliczny, l — długość rury).

Wprowadzając warunek ciągłości dla rury o przekroju (f) i natężenia przepływu (q), średnia prędkość wyniesie:

$$v = \frac{q}{f} \quad (7)$$

Po obustronnym podzieleniu równania (6) przez (7) otrzymano:

$$\frac{v_s}{v} (\sin \Theta + L \cos \Theta) = \frac{g \cdot I \cdot R^2 \cdot f}{6 \cdot \nu \cdot q} \quad (8)$$

Dla ustalonego ruchu laminarnego wody przez prostokątną rurę o przekroju kołowym wartość I jest równa:

$$I = \frac{8 \cdot \nu \cdot \nu}{g \cdot R^2} \quad (9)$$

Po podstawieniu równania (9) do (8) otrzymuje się znaną zależność wyprowadzoną przez Yao [11].

$$\frac{v_s}{v} (\sin \Theta + L \cos \Theta) = \frac{4}{3} = s \quad (10)$$

Wartość współczynnika s zależy od kształtu przekroju rury i przykładowo dla przekroju kwadratowego $s=11/8$, a dla płyt ustawionych równolegle $s=1,0$.

Doświadczalna weryfikacja przedstawionych równań oraz wpływ poszczególnych parametrów procesu na efekty sedymentacji są przedmiotem wielu prac [1, 2]. Z przedstawionych zależności wynika, że efekt działania osadników wielostrumieniowych zależy od obciążenia hydraulicznego, kształtu przekroju poprzecznego przewodów sedymentacyjnych, ich długości oraz kąta nachylenia względem poziomu.

Wyprowadzone na drodze teoretycznej równania nie uwzględniają:

- działania innych cząstek na opadającą cząstkę,
- wpływu zmian temperatury oraz procesu flokulacji cząstek w rurze sedymentacyjnej,
- wpływu ruchu osadu na rozkład prędkości przepływu wody w rurze,
- sposobu ułożenia rur sedymentacyjnych o przekrojach niekołowych w pakiecie sedymentacyjnym.

Próby uwzględnienia tych czynników na efekty działania osadników wielostrumieniowych prowadzą do uogólnienia równania (10), czego przykładem może być uogólniona formuła, określająca efekty sedymentacji w osadnikach wielostrumieniowych [9]:

$$E = 100 - M \left[-\frac{1}{v} - (\sin \Theta + L \cos \Theta) \right]^N \quad (11)$$

w której:

E — efekt usuwania zawiesin, %

M, N — bezwymiarowe współczynniki empiryczne, charakteryzujące wpływ rodzaju i koncentracji zawiesiny w dopływie.

Dla początkowej zawartości zawiesin w granicach 250—350 g/m³ i zakresu obciążenia hydraulicznego $q=4,5$ —18,0 m³/m²·h, wartość tych współczynników wynosi: $M=70$, $N=-0,45$ [9]. We wzorze (11) wartości v_s i S_k są uwzględnione w parametrach M i N . Dla konkretnych wartości Θ i L wzór ten można uprościć do postaci:

$$E = 100 - M \left(-\frac{a}{v} \right)^N \quad (12)$$

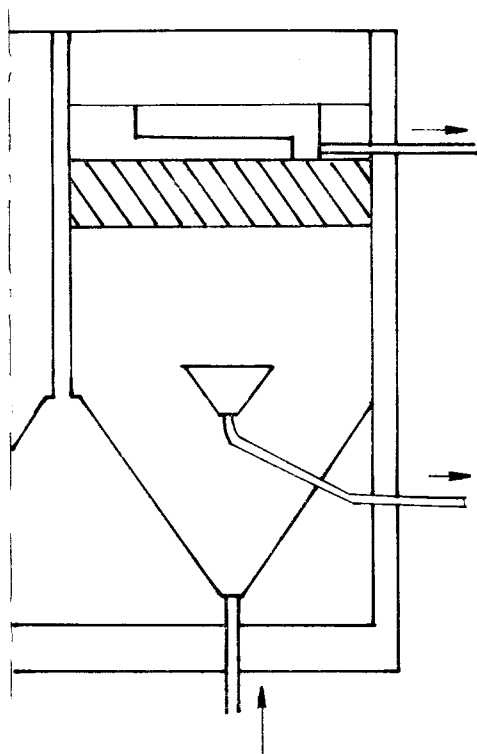
w której parametr (a) zależy od charakterystycznych wielkości rur pakietów sedymentacyjnych.

Omówienie wyników badań

W celu określenia możliwości intensyfikacji pracy klarownika, wmontowano elementy sedymentacyjne do jego górnej strefy. Schemat urządzenia doświadczalnego przedstawiono na rys. 2.

W okresie badań skład jakościowy wody Dunaju charakteryzował się nieznacznymi wahaniem. Uśrednione wyniki badań fizycznych i chemicznych składników wody zawiera tab. 1. Przepływ wody przez urządzenia stacji doświadczalnej zmieniono w granicach 330—787 m³/d, a odpowiadające mu wartości obciążenia hydraulicznego wahały się w przedziale 2,6—6,2 m³/m²·h.

Układ technologiczny obejmował: pompy I°, piaskownik, mieszacz szybki, klarownik z wbudowanymi pakietami sedymentacyjnymi, zbiornik wody sklarowanej, pompy pośrednie, ciśnieniowy filtr dwuwarstwowy węglowo-piaskowy i zbiornik wody czystej. Koagulant $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$ dawковано na odpływie z piaskownika, natomiast polikrylamid — do zbiornika szybkiego mieszania. W końcowej fazie badań, w celu zwiększenia stężenia zawiesiny dawковано do wody przed piaskownikiem



Rys. 2 Schemat klarownika z wbudowanymi pakietami sedymentacyjnymi

Tabela 1

SREDNIE WARTOŚCI WSKAŹNIKÓW SKŁADU FIZYCZNO-CHEMICZNEGO WODY DUNAJU W OKRESIE BADAŃ

Temperatura	K	275
Mętność	mg/dm ³	95,5
Barwa	mg/dm ³	24,0
pH	—	7,30
Zasadowość	mval/dm ³	3,90
Zawiesiny	mg/dm ³	34,6
Sucha pozostałość	mg/dm ³	390,0
Związki rozpuszczone	mg/dm ³	355,0
Utlenialność	mgO ₂ /dm ³	6,1
ChZT	mgO ₂ /dm ³	22,0
RWO	mg/dm ³	2,2

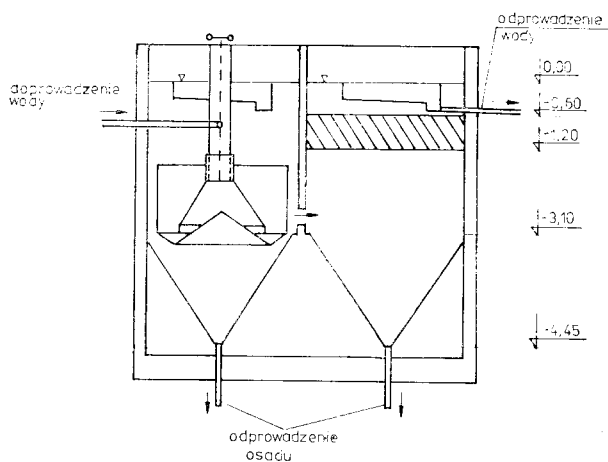
bentonit w ilości 50 g/m³. Skoagulowana woda była grawitacyjnie doprowadzana do klarownika. Gradient prędkości obliczony dla mieszania szybkiego wynosił 200 s⁻¹, a czas przetrzymania

wody w mieszaczu o pojemności 1,0 m³ zmieniła się w zależności od przepływu wody i wynosił: 110—262 s. Dawki koagulantów określono na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych [12].

Badania klarownika rozpoczęto od niskich obciążeń hydraulicznych równych 2,6 m³/m²·h. Stwierdzono, że w niskiej temperaturze osad zawieszony był niestabilny, a w odpływie znajdowało się dużo drobnych kłaczków.

Przed zwiększeniem obciążenia hydraulicznego dokonano zmiany układu, polegającej na szeregowym połączeniu drugiej komory klarownika. Schemat połączenia dwóch komór ilustruje rysunek 3.

Połączenie to miało na celu zwiększenie czasu przepływu i uzyskanie bardziej optymalnych warunków tworzenia się osadu zawieszonego. Wpływ dokonanych zmian na efekty sedymentacji w klarowniku obrazują dane w tabeli 2.



Rys. 3 Schemat dwóch szeregowo połączonych komór klarownika

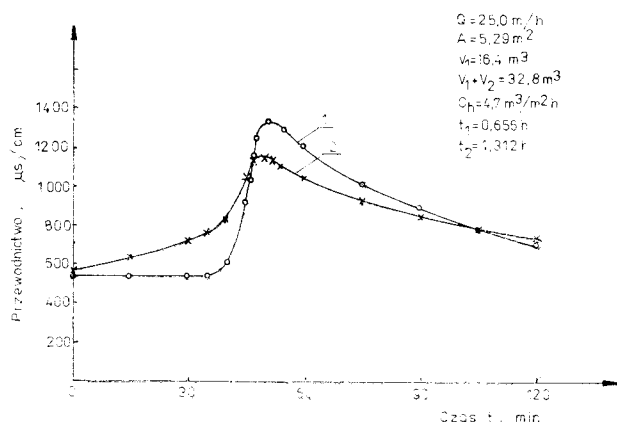
Po zakończeniu serii badań wykonano badania kontrolne na identycznym urządzeniu bez elementów sedymentacyjnych, stosując obciążenie hydrauliczne równe 3,3 m³/m²·h (tabela 2). Wyniki badań kontrolnych wskazały na skuteczność elementów sedymentacyjnych stosowanych w górnej strefie klarownika.

Tabela 2

WYNIKI BADAŃ USUWANIA ZAWIESIN ORAZ UTLENIALNOŚCI W KLAROWNIKU O POW. 5,29 m² Z WBUDOWANYMI ELEMENTAMI SEDYMENTACYJNYMI O 2R=60 mm, L=1,0 m, Θ=60°

Obciążenie hydrauliczne O _h , m ³ /m ² ·h		Dawka koagulanta g/m ²		Uśrednione wart. stężenia zawiesin g/m ³		Stopień usunięcia zawiesin	Ilość pomia- rów	Uśrednione wart. utlenialności g O ₂ /m ³		Stopień usunięcia utlenialn.	Ilość pomia- rów	Uwagi
pow. osad- nika	pow. rur. sed.	Al ₂ (SO ₄) ₃ 18H ₂ O	poli- akry- lamid	C _O	C _e	%		C _O	C _e	%		
2,6	3,6	80,0	0,25	12,6	8,2	35,1	2	5,93	3,30	44,3	4	pojedyncza komora klarownika
3,3	—	80,0	0,30	18,0	10,0	44,4	11	4,58	2,72	40,6	12	
3,3	4,5	90,0	0,30	21,0	6,3	70,1	10	9,90	5,25	47,0	10	szeregowo połączone dwie komory klarownika
4,2	5,8	85,0	0,35	40,3	6,9	82,8	33	6,99	3,87	44,6	36	
5,1	7,0	85,0	0,40	48,9	11,8	75,9	16	7,85	3,59	54,7	18	
6,2	8,5	85,0	0,50	58,1	14,9	74,3	12	5,87	3,42	40,8	12	

W celu sprawdzenia własności hydraulicznych pojedynczej i połączonych komór klarownika wykonano pomiary krzywych przepływu stosując roztwór NaCl. Otrzymane zależności przedstawia rys. 4.



Rys. 4 Krzywe przepływu dla klarownika (1 — pojedyncza komora, 2 — dwie komory połączone szeregowo)

Po porównaniu wykresów przepływu okazało się, iż czas przepływu tylko nieznacznie się zmienił. Połączony układ dwóch komór klarownika charakteryzuje się większym wymieszaniem, istnieniem stref martwych oraz występowaniem zjawisk krótkich spięć. Pomimo to w układzie tym osiągnięto lepsze wyniki usuwania zawieszin i utlenialności, co świadczy o wpływie flokulacji na efekty pracy klarownika. W przestrzeniach martwych pierwszej komory klarownika stwierdzono duże stężenie (do 600 g/m³) osadu zawieszonego, oraz intensywny ruch kłaczków o dużych wymiarach. Warunki sedymentacji w drugiej komorze klarownika były lepsze.

Wnioski

1. Dotychczasowe równania nie uwzględniają wszystkich czynników hydraulicznych i technologicznych, mających istotny wpływ na proces sedymentacji w pojedynczej rurze osadnika wielostrumieniowego. Stąd też przed zastosowaniem pakietów prefabrykowanych w osadnikach celowe jest wykonanie badań piloto-

wych dla każdego przypadku pobieranej wody i zastosowanej technologii uzdatniania.

2. W warunkach zimowej eksploatacji stwierdzono pełną przydatność elementów sedymentacyjnych wmontowanych do górnej strefy klarownika. Obciążenie hydrauliczne powierzchni klarownika do 4,8 m³/m²·h, a powierzchni pakietów rurowych do 6,6 m³/m²·h, pozwoliło osiągnąć w odpływie zawartość zawieszin mniejszą niż 10 g/m³, jednocześnie usuwanie związków organicznych mierzone utlenialnością wynosiło 44—50‰.

3. Wyższe obciążenia hydrauliczne pogarszają efekty pracy klarownika. Wskazuje to na celowość badania stabilizacji i sposobów sterowania osadem zawieszonym.

LITERATURA

1. S. P. HANSEN, G. L. CULP: Applying Shallow Depth Sedimentation Theory J. Am. Wat. Wks. ASS. 1967, 10, p. 1134.
2. G. ÖLÖS et al: Deritok teljesitmenyfelelőssége csomódok beépítésével Hidrológiai Közlemények 1983, 11, p. 485—497.
3. E. M. GROCHULSKA-SEGAL, A. L. KOWAL, M. M. SOZANSKI: Stabilność osadników piętrowych. Materiały Drugiej Międzynarodowej Konferencji, Lublin 1979.
4. A. NALBERCZYŃSKI: Zastosowanie pakietów sedymentacyjnych do intensyfikacji opadania zawieszin. Ochrona Środowiska 1979, Nr 2—3.
5. Z. KOROS, I. LICSKÓ: A mohácsi és a körszerűvelgyi deritok intenzifikálásának nyert tapasztalatok. X Seminarium MHT. Szarvas. 1984.
6. A. J. KIEPAL: Zasadnicze zmiany technologiczne w osadnikach. Gaz, Woda i Technika Sanitarna. 1978, 1, p. 10—16.
7. A. L. KOWAL: Technologia Wody. ARKADY 1977.
8. R. HECKEL, M. KORN: Rationalisierung von Absetzbecken mittels Röhreusedimentation. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 1974, 10, p. 341.
9. W. OLSZEWSKI, K. SUCHANECKA: Obliczanie i wymiarowanie osadników wielostrumieniowych. Materiały Konferencyjne, Poznań 1980, tom III.
10. M. SZALAY: Lemezes ulepitomedencek hidraulikai kerdesei és kismintavizsgálatok. Hidrológiai Közlemények 1956, 2, p. 142—148.
11. K. M. YAO: Theoretical Study of High-Rate Sedimentation. Journal Wat. Poll. Contr. Fed. 1970, 2, p. 218—228.
12. F. ABRAHAM-LNÉ VINCZE: Teli üzemelesi tapasztalatok egyenaramu, iszapfolyozeses deritovel. X Seminarium MHT. Szarvas 1984.

F. Abraham

On the possibility of intensifying the sedimentation process in clarifiers

The theoretical principles to the operation of multi-ejector settling tanks are discussed. It has been shown that the available formulae have the limitation of being often inadequate to describe the problems of

interest. Investigations were carried out to support the utility of some lamellar elements as applied for intensifying the sedimentation process in the top zone of a sludge blanket clarifier. Analysis of experimental results shows that the hydraulic loading of a multi-ejector settling tank may be twice as high as that of a conventional system. At decreased temperatures, the intensification of the sedimentation process raises difficulty and trouble because of the insufficient flocculation effect.