

# SEPARACJA FAZY STAŁEJ SEPARATOREM Z EFEKTEM COANDY

**Zbigniew DĄBEK**

Polskie Towarzystwo Botaniczne, Oddział w Krakowie

*Słowa kluczowe: faza stała, powierzchnia krzywoliniowa, separator Coandy, ścieki bytowe*

## Streszczenie

Praca dotyczy zagadnień separacji fazy stałej separatorem z efektem Coandy. Badania laboratoryjne separatora fazy stałej prowadzono na przełomie lat 2006/2007, w skali półtechnicznej na pełnowymiarowym separatorze Aquatron 90. Opisano budowę stanowiska badawczego oraz podano skład materiału organicznego (substytutu kawy). Po zastosowaniu spadku przewodu dopływowego  $i = 1,0\%$  uzyskano skuteczność separacji 97,30%. Wyniki testów laboratoryjnych analizowano uwzględniając wielkość separatu. Przedstawiono prosty wzór na obliczenie objętości separatu  $S_w$ . Potwierdzono znaczenie grawitacyjnego przemieszczania się strugi w torusie separatora oraz oceniono przyczynę wykraplania się fazy ciekłej do separatu. Dokonano interpretacji matematycznej zachodzących zjawisk podczas rozdziału fazowego, z uwzględnieniem zjawiska wykraplania się ze strugi części cieczy do separatu. Przedstawiono praktyczne zastosowanie wyników badań separatora fazy stałej z efektem Coandy.

## WSTĘP

Opracowano wiele publikacji i doniesień naukowych, dotyczących efektu Coandy (istoty działania separatora fazy stałej), jednak pierwszą publikację zawierającą matematyczną interpretację tego zjawiska przedstawił w 1934 r. profesor l'Ecol Polytechnique Albert Metral (1902–1962). Dotyczyła ona przepływu płynów po powierzchniach krzywoliniowych [DĄBEK, 2008]. Nazwa – efekt Coandy – pochodzi od nazwiska rumuńskiego inżyniera Henri Coanda (1886–1972), który

w 1910 r. odkrył zjawisko przylegania gazów spalinowych do kadłuba podczas lotu odrzutowym (reakcyjnym) samolotem własnej konstrukcji [DĄBEK, 2008].

Efekt Coandy można zaobserwować trzymając łyżeczkę pod cienką stróżką wody. Przepływając po wypukłości łyżeczki stróżka podąża za wypukłością. Jeżeli powierzchnia jest zbyt wypukła, strumień nie podąży za krzywizną, ale lekko się odegnie i oderwie od powierzchni. Zrozumienie i objaśnienie dynamiki płynów jest jednym z większych osiągnięć fizyki, matematyki i mechaniki płynów w ciągu ostatnich kilkuset lat [DĄBEK, 2005; 2006].

Procesem separacji fazy stałej ze ścieków bytowych zainteresowało się na początku lat 90. minionego stulecia kilka ośrodków naukowych oraz branżowych w Szwecji. W 1990 r. w firmie Aquatron AB powstała konstrukcja separatora fazy stałej Aquatron 90 [DĄBEK, ROSZAK, 2005]. Badania nad separacją fazy stałej prowadzili również VINNERÅS [2001], VINNERÅS i JÖNSSON [2002], WINBLAD i SIMPSON-HÉBERT [2004].

Celem niniejszej pracy było określenie skuteczności rozdziału fazowego płyn–ciało stałe w separatorze fazy stałej z efektem Coandy.

## METODY BADAŃ

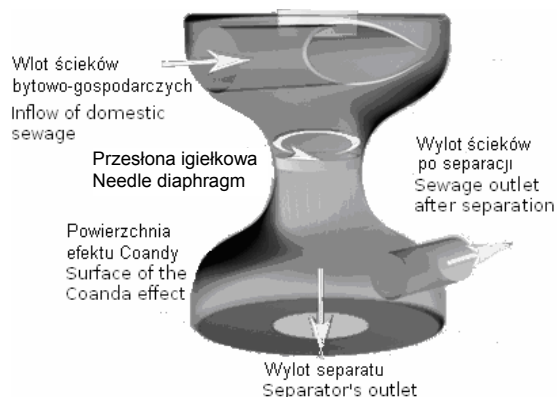
Badania były pionierską pracą w Polsce, prowadzoną przez Autora w skali półtechnicznej na pełnowymiarowym modelu na przełomie lat 2006/2007, w Laboratorium Hydrotechnicznym UR w Krakowie. Stanowisko badawcze zbudowano na stojaku, do którego, za pomocą króćców wylotowych, przytwierdzono separator Aquatron 90 (fot. 1) składający się z części górnej i dolnej, rozdzielnie połączonych odcinkiem pionowej rury (rys. 1). Część górna, w kształcie torusa parabolicznego, z radialnie zainstalowanym przewodem dolotowym o spadku  $i = 5\%$ , przechodzi dołem łagodnie z powierzchni krzywoliniowej w pionową rurę centrującą torus. W rurze, na krawędzi spływu za obszarem efektu Coandy, umieszczono cienkościenny pierścień zlicowany z powierzchnią wewnętrzną rury spływowej.

Na wewnętrznej powierzchni pierścienia, wykonanego ze stali nierdzewnej, przytwierdzono, po obwodzie, przesłonę igiełkową (szereg promieniście ustawionych cienkich okrągłych sprężystych drucików stalowych). Cienka struga ścieków przepływa szybko wirując po wewnętrznej powierzchni torusa (zgodnie z siłą Coriolisa) zacieśniając grawitacyjnie orbitę wiru spływa po powierzchni krzywoliniowej do pionowej rury. Pokonując ten fragment powierzchni, napotyka w rurze pionowej przesłonę igiełkową, która wytrąca ze strugi fazę stałą (fot. 2). Struga, wirując w rurze, spływa pod nadwieszoną w dolnej części powierzchnię krzywoliniową zbiornika dolnego i po wygaszeniu jej energii na przesłonach dennych wypływa na zewnątrz. Przepływająca cienką warstwą struga przemieszcza się po powierzchni krzywoliniowej nie tracąc z nią kontaktu w związku ze zmianą kierunku przepływu, co stanowi istotę efektu Coandy.

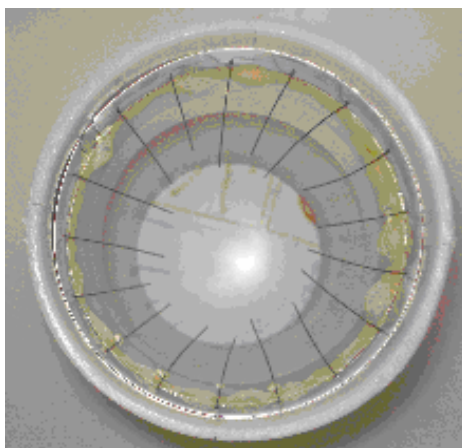


Fot. 1. Separator fazy stałej z efektem Coandy model Aquatron 90 na stanowisku badawczym (fot. Z. Dąbek)

Photo 1. Solid phase separator using the Coanda effect model Aquatron 90 in study site (photo Z. Dąbek)



Rys. 1. Schemat działania separatora  
Fig. 1. A scheme of separator function



Fot. 2. Przesłona igielkowa separatora fazy stałej z efektem Coandy (fot. Z. Dąbek)

Photo 2. Needle diaphragm of the solid phase separator with the Coanda effect (photo Z. Dąbek)

Występuje przy tym ciągły transport fazy stałej w kierunku przegrody z przesłoną igielkową, na której bez utraty energii cieczy, faza stała jest grawitacyjnie deponowana w zbiorniku akumulacyjnym [DĄBEK, 2010a, b].

Porcjowanie wody splukującej następowało za pomocą standardowego górnopłuku o objętości zbiornika  $8 \text{ dm}^3$ , wyposażonego w zawór pływakowy (fot. 3).



Fot. 3. Zbiornik wody splukującej na laboratoryjnym stanowisku badawczym (fot. Z. Dąbek)

Photo 3. Flushing water container in laboratory study site (photo Z. Dąbek)

Objętość wody splukującej substrat regulowano przez wypełnianie zbiornika spluczki zastępczą objętością (butelkami o znanej pojemności napełnionymi wodą), w celu zmniejszenia objętości czynnej zbiornika, w zależności od serii testów laboratoryjnych [DĄBEK, 2008].

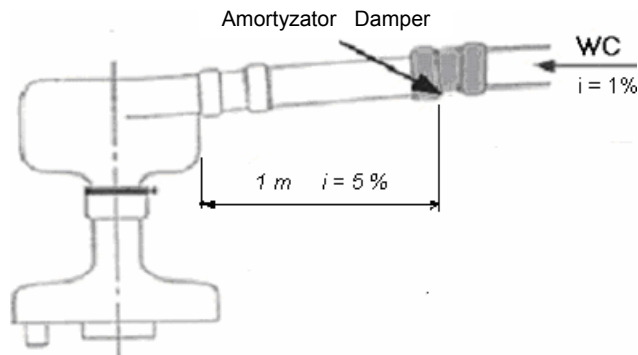
Zgodnie z metodyką badań, zastosowano specjalny, fazowy wypełniacz cieczy (substytut kału), składający się z zielonego groszku sałatkowego i papieru toaletowego połączonego z wodą w suspensję (substytut ścieków –  $\text{dm}^3$ ). Równoważna ilość kału standardowej pojedynczej defekacji wynosi 90 g. W testach laboratoryjnych zastosowano 90 g groszku zielonego i 7 g papieru toaletowego, szarego, potrójnego, gufrowanego. Aby zachować powtarzalność cech substratu kału oraz podobne parametry, każdą z serii (o 5 powtórzeniach) przeprowadzano stosując świeży substytut organiczny (fot. 4).



Fot. 4. Substytut materiału organicznego do serii prób laboratoryjnych (fot. Z. Dąbek)

Photo 4. Substitute of organic material to series of laboratory tests (photo Z. Dąbek)

Spadki przewodów dopływowych dla poszczególnych serii ustalono w zakresie  $i = 1,0; 1,5; 2,0; 5,0\%$ , zgodnie z założeniami technicznymi producenta separatora (rys. 2).



Rys. 2. Warunki techniczne zachowania spadków  $i$  na doprowadzeniu do separatora Aquatron 90

Fig. 2. Technical conditions to preserve pressure falls  $i$  at the inlet pipe into separator Aquatron 90

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Wyniki testów laboratoryjnych separacji fazy stałej (substytutu kału) przedstawiono w tabeli 1.

Z analizy uśrednionych wyników testów laboratoryjnych wynika, że seria 1 wykazywała najmniejsze wytrącenie separatu o objętości  $0,288 \text{ dm}^3$ , jeśli spadek przewodu dopływowego wyniósł  $i = 1,0\%$ .

Objętość zatrzymanego separatu można obliczyć (stosując spadek przewodu dopływowego  $i = 1,0\%$ , natomiast przed wlotem do separatora na odcinku 1 metra spadek  $i = 5\%$  – rys. 2), podstawiając z tabeli 1 do wzoru na  $S_w$  (1) uśrednione wartości  $V_m$  oraz  $Q$  ( $v$  – prędkość suspensji w przewodzie doprowadzającym obliczono po wypełnieniu przekroju w połowie, jako przemieszczenie liniowe). Uwzględniając, że objętość splukiwana to suspensja o składzie:  $V_m$  – woda, groszek zielony sałatkowy i papier toaletowy:

$$S_w = a \frac{V_m}{Qv} g, \text{ dm}^3 \quad (1)$$

gdzie:

- $a$  – współczynnik empiryczny objętości suspensji (dobrany w trakcie badań na stanowisku laboratoryjnym) przyjęto jako równy  $0,006 \text{ dm}^3$ ;
- $V_m$  – objętość splukiwanej suspensji,  $\text{dm}^3$ ;
- $v$  – prędkość suspensji w przewodzie doprowadzającym,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;
- $g$  – przyspieszenie grawitacyjne,  $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ;
- $Q$  – natężenie przepływu strugi suspensji,  $\text{dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$ .

Wynik obliczeń ze wzoru (1) jest obciążony błędem z tolerancją do  $\pm 0,5\%$ .

**Tabela 1.** Wyniki testów laboratoryjnych separatora fazy stałej w seriach dla  $t = 1,0-5,0\%$   
**Table 1.** The results of laboratory tests of solid phase separator in series for  $t = 1,0-5,0\%$

Seria Series	Suspensja dm <sup>3</sup>			Spadek przewodu dopływu of the inlet pipe $i, \%$	Objętość separatu Volume of the separate $S_w, \text{dm}^3$	Średnie wartości Average values		Skuteczność separacji Efficiency of separation %
	objętość splukująca flushing volume $V, \text{dm}^3$	groszek green peas g	papier paper g			prędkości ścieków sewage flow velocity $v, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	nateżenia przepływu flow intensity $Q, \text{dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$	
1	4,8	90	7	1,0	0,288	1,107	0,902	97,30
2	6,0	140	14	1,5	0,478	1,217	0,822	96,17
3	6,0	180	14	2,0	0,451	1,266	0,788	96,07
4	8,0	360	20	5,0	0,998	1,204	0,829	94,90

Na przykład: dla standardowej serii 1 można odczytać z tabeli 1. sumaryczną objętość splukiwanej suspensji  $V_m$  przyjmując, że mieszanina wody splukującej + substytut kału =  $4,897 \text{ dm}^3$ , oraz parametry  $Q$  i  $v$ . Przeliczając podstawione wartości otrzymuje się średnią objętość separatu  $S_w$ , deponowanego w zbiorniku akumulacyjnym osadnika szybowego [DĄBEK, 2009]:

$$S_w = \frac{0,006 \cdot 4,897 \cdot 9,81}{0,902 \cdot 1,107} = 0,289, \text{ dm}^3$$

Wzór jest poprawny dla obliczeń w serii 1., w której zastosowano substytut kału równoważny standardowej defekacji w cytowanej tabeli 1. Średnia objętość separatu  $S_w$  dla serii 1. wynosi  $0,288 \text{ dm}^3$ . Inne serie wymagają zastosowania odmiennych wartości współczynnika empirycznego objętości  $a$  [DĄBEK, 2008].

Skuteczność separacji  $\eta$  (%) można obliczyć po podstawieniu wyników uzyskanych w badaniach laboratoryjnych do wzoru (2):

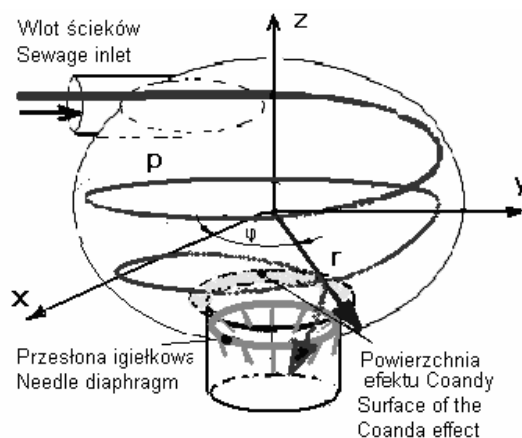
$$\eta = 1 \frac{S_w}{V_m} 100 \quad (2)$$

gdzie:

$S_w$  – substrat (objętość fazy stałej odseparowanej ze ścieków),  $\text{dm}^3$ ;

$V_m$  – suspensja (sumaryczna ilość wody i substratu),  $\text{dm}^3$ .

W podsumowaniu wyników testów należy dokonać matematycznej interpretacji działania separatora, niezbędnej do opisanie zjawisk mających wpływ na skuteczność separacji (rys. 3).



Rys. 3. Efekt Coandy w działaniu separatora fazy stałej

Fig. 3. The Coanda effect in the action of solid phase separator

Wychodząc z funkcji Lagrange'a  $\rightarrow (L = U_k - U(q))$  dla ruchu punktu materialnego o masie 1, po powierzchni obrotowej zanurzonej w przestrzeni trójwymiarowej, z orbitami zwanymi geodetykami powierzchni, we współrzędnych walcowych:  $r, \varphi, z$ , zadaną powierzchnią lokalną równaniem  $r = r(z)$  lub  $z = z(r)$ , wzór na energię kinetyczną  $L$  strugi przyjmuje postać jak we wzorze (3), (4) oraz (5):

$$L = (x'^2 + y'^2 + z'^2)^{-2} = \left[ (1 + r_z'^2) z'^2 + r^2(z) \varphi'^2 \right]^{-2} \quad (3)$$

We współrzędnych  $\varphi, z$  postać energii kinetycznej strugi można zapisać:

$$L = (x'^2 + y'^2 + z'^2)^{-2} = \left[ (1 + z_r'^2) r'^2 + r^2 \varphi'^2 \right]^{-2} \quad (4)$$

Natomiast korzystając ze związku współrzędnych  $r, \varphi$ , wzór, opisujący energię kinetyczną strugi suspensji przemieszczającej się w torusie separatora, przyjmuje postać różniczkową:

$$x'^2 + y'^2 = r'^2 + r^2 \varphi'^2 \quad (5)$$

W tym układzie współrzędnych  $\varphi$  jest współrzędną cykliczną przemieszczeń kątowych, a odpowiadający jej pęd  $p$  strugi suspensji w separatorze jest zachowany, gdy:

$$I'_\varphi = r^2 \varphi' \quad (6)$$

Stanowi zatem składową z wektora momentu pędu strugi w parabolicznym cyklonie separatora z efektem Coandy (siły masowe na kierunkach  $X = Y = 0$ ,  $Z = -g$ ). Ponieważ układ ma dwa stopnie swobody, znajomość współrzędnej cyklicznej  $\varphi$  ze wzoru (6), wystarczy, aby określić parametry równania przedstawiającego pęd i energię kinetyczną suspensji w torusie separatora [DĄBEK, 2008]. Interpretując zjawisko wytrącania się cieczy do separatu, należy wziąć pod uwagę masę właściwą cieczy o danej wybranej objętości. Jeśli nawet jej rozmiar i kształt będą się zmieniać, masa pozostanie niezmienną.

Zasada zachowania pędu jest w istocie zastosowaniem drugiego prawa dynamiki Newtona wobec cząstki cieczy. Rozpatrując daną masę cieczy w układzie odniesienia Lagrange'a stwierdzono, że wielkość zmiany pędu jest równa sile zewnętrznej netto działającej na masę.

Zasada zachowania energii w separatorze jest również zgodna z pierwszym prawem termodynamiki dla cząstek płynu w ruchu. Oznacza to, że chwilowa energia stanowi sumę energii potencjalnej oraz energii kinetycznej na jednostkę masy. Tak sformułowane prawo termodynamiki stanowi, że wielkość zmiany energii cała-



kowej cieczy płynącej po powierzchni krzywoliniowej, jest równa sumie wielkości pracy wykonanej względem płynu przez siły zewnętrzne.

Podczas testów laboratoryjnych zauważono, że struga, wirując w prawo wewnątrz torusa parabolicznego separatora, wykonuje dwa pełne obroty (napotykając po drodze na igiełki przesłony), przepływa po powierzchni krzywoliniowej torusa do rury pionowej wytrącając przy tym strużki cieczy. Przyczyną odrywania się w tym miejscu cienkich strużek cieczy (rozcieńczającej odseparowaną fazę stałą), jest naruszenie napięcia powierzchniowego i utrata energii pędu części cząstek wody w zderzeniu z palisadą igiełek w przesłonie ustawionej prostopadle do kierunku spływu. Przesłona skutecznie wytrąca cząstki stałe, jej obecność skutkuje również zwiększeniem udziału cieczy w odseparowanym substracie. Zakłócenie to jest przyczyną niestabilności strugi na kierunku osi jej przepływu i dewiacji wokół igiełek przesłony. Jest również powodem niestabilności masy i defragmentacji fazy stałej, powodującej wzrost stężenia zawiesiny ogólnej w ściekach po separacji [DĄBEK, 2009].

## WNIOSKI

1. Wyniki testów wykazały jednoznacznie, że separator zatrzymywał najmniejsze objętości separatu po zastosowaniu spadku przewodu doprowadzającego  $i = 1,0\%$ . Skuteczność separacji w przeprowadzonym teście wyniosła  $97,30\%$ . Wraz ze zwiększeniem masy substratu, oraz spadkiem przewodu doprowadzającego  $i$ , zwiększała się prędkość strugi, zmniejszało się natomiast natężenie przepływu i skuteczność separacji. W przypadku spadku przewodu dopływowego  $i = 2,0\%$  oraz dwukrotnie większej ( $194\text{ g}$ ) masie substratu organicznego, prędkość strugi ścieków  $v$  była największa i wynosiła  $\approx 1,27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , przy jednocześnie najmniejszym natężeniu przepływu  $Q$  równym  $\approx 0,79\text{ dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$  (wzrosła energia kinetyczna strugi, zgodnie z równaniem (6), spływającej przewodem doprowadzającym suspensję). Pęd strugi był powiązany z gęstością suspensji oraz energią kinetyczną strugi wyrażoną wzorem (5), wówczas skuteczność separacji wynosiła  $\eta = 96,07\%$ . Obserwowana cecha separatora wskazuje na bardzo wysoką skuteczność separacji fazy stałej w przypadku standardowej defekacji.

2. Parametry separacji, po zastosowaniu spadku przewodu doprowadzającego  $i = 1,0\text{--}2,0\%$  oraz dwukrotnie zwiększonej objętości substratu, pozwalają wnioskować o przydatności separatora do rozdziału fazowego ścieków bytowych z domków jednorodzinnych. Zakres skuteczności wysoko sprawnego rozdziału fazowego w tym przypadku wynosi  $96,07\text{--}97,30\%$ .

3. Wzór (1) na objętość separatu  $S_w$  pozwala teoretycznie określić przybliżony czas wypełnienia zbiornika akumulacyjnego osadnika szybowego oraz termin jego asenizacji.

4. Duża skuteczność separacji (dla  $i = 1,0\%$ ) może w znacznym stopniu ograniczyć występowanie zjawiska kolmatacji w złożu oczyszczalni przydomowej oraz zmniejszyć liczbę zabiegów płukania instalacji rozsączającej.

5. Największą skuteczność separacji prawdopodobnie zapewniał spadek przewodu doprowadzającego  $i = 5,0\%$ , jednak czterokrotne zwiększenie objętości masy suspensji spowodowało zwiększenie energii kinetycznej strugi oraz pędu kosztem tej skuteczności. Należy zatem przebadać skuteczność separacji w serii 4. z zastosowaniem objętości suspensji jak w serii 1.

## LITERATURA

- DĄBEK Z., 2006. Niekonwencjonalne systemy utylizacji odpadów bytowych. Biooalety humusowe (HBT). *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 5 s. 32–38.
- DĄBEK Z., 2008. Wpływ wybranych czynników na rozdział fazowy ścieków bytowych w separatorze z efektem Coandy. Kraków: UR WIŚiG rozpr. dokt. maszyn. ss. 106.
- DĄBEK Z., 2009. Osadnik szybowy zwłaszcza do oczyszczalni przydomowych. Zgłoszenie patentowe P 387896. BUP RP 2010. 2(941) s. 5.
- DĄBEK Z., 2010a. Separacja fazy stałej ze ścieków bytowych na przydomowej oczyszczalni ścieków w osadniku szybowym. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* 7–8 s. 52–55.
- DĄBEK Z., 2010b. Wpływ usuniętej fazy stałej w osadniku szybowym na stężenie zanieczyszczeń w ściekach szarych. W: *Woda-ścieki-odpady w środowisku*. T. 4. 13. *Konf. Nauk.-Tech.* 17–18 czerwca 2010 r. Zielona Góra. Zielona Góra: UZiel. s. 51–56.
- DĄBEK Z., ROSZAK Z., 2005. Humifikacja substratu organicznego. 7. Międzyn. *Konf. Nauk.* 5–7. 09.2005. Iwanowo: Państw. Chem.-Technol. Uniw. s. 70–78.
- VINNERÅS B., 2002. Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine diversion. Uppsala: Swedish Univ. Agricult. Sci. PhD thesis ss. 86.
- VINNERÅS B., JÖNSSON H., 2002. The performance and potential of faecal separation and urine diversion to recycle plant nutrients in household waste water. Uppsala: Swedish Univ. Agricult. Sci. s. 24–48.
- WINBLAD U., SIMPSON-HÉBERT M., 2004. *Ecological sanitation revised and enlarged edition*. Stockholm: Stockholm Env. Inst. ss. 147.

*Zbigniew DĄBEK*

### SOLID PHASE SEPARATION WITH A SEPARATOR USING THE COANDA EFFECT

*Key words: curvilinear surface, domestic sewage, separator Coanda, solid phase*

#### S u m m a r y

The paper describes solid phase separation in a separator using the Coanda effect. Laboratory studies of the separator were carried out at the break of 2006/2007 in semi-technological scale in the full-size separator Aquatron 90. The construction of a study site and the composition of organic material (faeces substitute) are presented. After using a slope of inflow tube  $i = 1.0\%$  the efficiency of separation was 97.30%. The result of laboratory tests was analysed in relation to the amount of sepa-

rated material. A simple equation was presented to calculate the volume of separate  $S_w$ . The importance of gravitational movement of a stream in the separator's torus was confirmed and the reason for condensation of liquid phase to the separate was assessed. Processes taking place during phase separation were mathematically interpreted considering condensation of a part of liquid to the separate. Practical applications of obtained results are presented.

---

Recenzenci:

*prof. dr hab. Franciszek Czyżyk*

*dr hab. Tadeusz Siwiec*

Praca wpłynęła do Redakcji 14.04.2010 r.