

JERZY MAREK GUTTETER-GRUDZIŃSKI

Wydział Mechaniczny, Akademia Morska, Szczecin

Hydrocyklony do rozdziału układu ciecz – ciecz

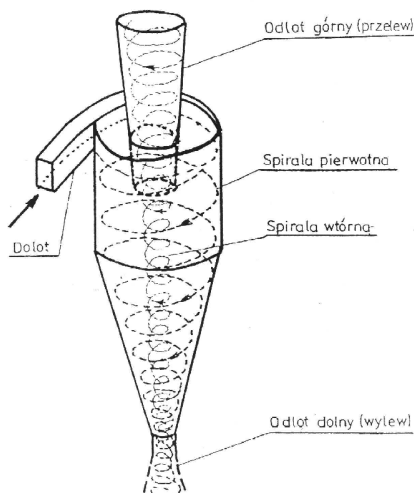
Wprowadzenie

Hydrocyklony do rozdziału układu ciecz – ciecz stanowią niewielką część (~5%) ogólnej liczby stosowanych obecnie w przemyśle urządzeń separujących. Powszechne zastosowanie znalazły na platformach i statkach ratowniczych neutralizujących rozlewy olejowe [1, 2].

Określenie średnicy kropli oleju wydzielanych w hydrocyklonie

Aby uzyskać jak najlepszą sprawność rozdziału dwóch niemieszających się cieczy w hydrocyklonie ciecz – ciecz należy tak dobrać konstrukcję hydrocyklonu i prędkość kropli oleju, aby w wirze swobodnym nie występowała wtórna ich dyspersja. Powtórne rozdrobnienie kropli będzie zależało od prędkości wlotowej, jej wzrostu w trakcie przepływu po spirali osi hydrocyklonu oraz rozwiązania konstrukcyjnego wielkości kąta stożka i długości części cylindrycznej. Z parametrów fizycznych mających wpływ na rozdrobnienie największy wpływ będą miały wielkości: strumień zasilający q_v , średnica wlotowa d i procentowy stosunek przelewu q_p/q_v . W opisie mechanizmu zjawisk separacji przyjmuje się uproszczony dwuwymiarowy model wraz z upraszczającymi założeniami. Prędkość styczną V_t i siły działające na kroplę oleju poruszającą się w wydzielonej płaszczyźnie poziomej, prostopadłej do osi hydrocyklonu pokazano na rys. 1 i 2. Wskutek stycznego wlotu strumienia zasilającego hydrocyklon z prędkością V_t , powstaje pole przyspieszeń dośrodkowych, co wraz ze składową promieniową prędkości V_r powoduje przemieszczenie się lżejszej kropli oleju w kierunku osi hydrocyklonu.

W uproszczonym modelu zakłada się równowagę siły odśrodkowej i oporu działających na kroplę oleju. Dla $Re < 0,4$, a więc w ruchu laminarnym kropli oleju (prawo Stokesa), w przypadku równowagi siły odśrodkowej i oporu otrzymamy:



Rys. 1. Przepływ mieszaniny dwufazowej w klasycznym hydrocyklonie

$$\frac{\pi d_o^3}{6} (\rho_w - \rho_o) \frac{V_t^2}{r} = 3\pi\eta_w d_o V_r \quad (1)$$

gdzie:

- d_o – średnica kropli oleju, [m],
- ρ_w, ρ_o – gęstość wody i oleju, [kg/m³],
- V_t – prędkość styczna, [m/s],
- η – lepkość dynamiczna wody, [Pa·s].

Składową prędkości promieniowej V_r otrzymamy z równania (1):

$$V_r = \frac{dr}{dt} = \frac{(\rho_w - \rho_o) V_t^2 d_o^2}{18\eta} \frac{1}{r} \quad (2)$$

Po rozdzieleniu zmiennych otrzymuje się:

$$dt = \frac{18\eta_w}{(\rho_w - \rho_o) V_t^2 d_o^2} r dr \quad (3)$$

Najdłuższy czas przejścia kropli oleju ku osi hydrocyklonu będą miały krople, które znajdują się na zewnętrznym promieniu R , czyli najdalej od rdzenia. Po scałkowaniu równania (3) w granicach od R do r_o i od 0 do t' oraz założeniu równomiernego rozkładu prędkości $V_t = \text{const.}$, czas separacji cząstki oleju wyniesie:

$$t' = \frac{9\eta_w (R^2 - r_o^2)}{(\rho_w - \rho_o) V_t^2 d_o^2} \quad (4)$$

Czas t' przejścia kropli oleju ku osi hydrocyklonu powinien być krótszy lub równy czasowi t'' przebywania kropli oleju w strefie działania hydrocyklonu, czyli:

$$t' \leq t'' \quad (5)$$

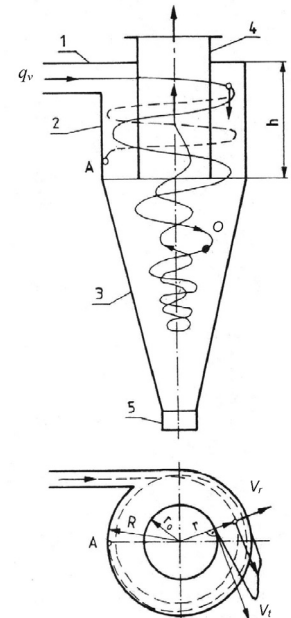
Czas t'' można wyrazić w sposób przybliżony, jako stosunek drogi L przebytej przez cząstkę oleju do jej prędkości stycznej V_t :

$$t'' = \frac{L}{V_t} = \frac{2\pi RN}{V_t} \quad (6)$$

gdzie:

- N – liczba zwojów wykonanych przez cząstkę przed jej wpadnięciem do osi rdzenia.

Czas przebywania cząstki oleju w części cylindrycznej hydrocyklonu można też wyrazić wychodząc z objętości przepływu w części cylindrycznej hydrocyklonu według wzoru:



Rys. 2. Obraz toru kropli oleju w hydrocyklonie, $V_t(r)$

$$t''' = \frac{H_c}{V_o} = \frac{H_c \pi (R^2 - r^2)}{q_v} \quad (7)$$

gdzie:

V_o – prędkość osiowa w hydrocyklonie,
 H_c – wysokość części cylindrycznej.

Z doświadczeń wykonanych przez autora, przy dozowaniu paliwa lekkiego i oleju smarnego do hydrocyklonu (Rys. 3) [4] przy $q_v = 1 \div 5 \text{ m}^3/\text{h}$ uzyskano $N = 15 \div 80$. Zmierzony czas t''' przebywania oleju w modelu (przezroczystym) wynosił $1,5 \div 3 \text{ s}$.

Po przyrównaniu czasów z równań (4) i (6) otrzymano średnicę minimalnej kropli oleju wydzielonej w hydrocyklonie:

$$d_{cz.oleju} \geq \sqrt{\frac{9\eta_w(R^2 - r_o^2)}{2\pi(\rho_w - \rho_o)V_t R}} \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (8)$$

Wzór (8) pozwala na wstępne określenie wielkości oddzielanej kropli oleju d_o .

W rzeczywistości V_t nie jest stała, lecz zależy od strat wewnętrznych tarcia według równania wiru swobodnego:

$$V_t r^n = \text{const} \quad (9)$$

gdzie:

n – wyznaczone doświadczalnie przez *Kelsalla* zawiera się w przedziale $0,4 \div 0,9$.

Składowa prędkości $V_t(r)$ pokazana jest na rys. 2. Prędkość styczną można wstawić do równania (8) i wykonać całkowanie [1, 3]:

$$d_o = \frac{3}{C} \sqrt{\frac{\eta q_v}{\pi(n+1)(\rho_w - \rho_o)} \frac{R^{2(n+1)} - r^{2(n+1)}}{H_c(R^2 - r^2)}} \quad (10)$$

gdzie:

H_c – wysokość części cylindrycznej hydrocyklonu (wlotowej), [m].

Listewnik [1] wyprowadził wzór na d_o i dla $V_t = 5,32 \text{ m/s}$ oraz paliwa lekkiego oddzielanego w modelowym hydrocyklonie AM otrzymał $d_o = 43 \text{ }\mu\text{m}$. Wymiary modelowego hydrocyklonu AM są następujące [4]: $a = 600 \text{ mm}$, $b = 700 \text{ mm}$, $c = 165 \text{ mm}$, $d = 8 \text{ mm}$, $e = 10 \text{ mm}$, $f = 0 + 25 \text{ mm}$, $g = 410 \text{ mm}$ (wysokość stożka), $\alpha = 7^\circ$ (kął wierzchołkowy).

Przy uwzględnieniu wpływu stożka na jakość separacji cząstek w hydrocyklonie na podstawie [3] minimalną średnicę kropli da się wyznaczyć z równania:

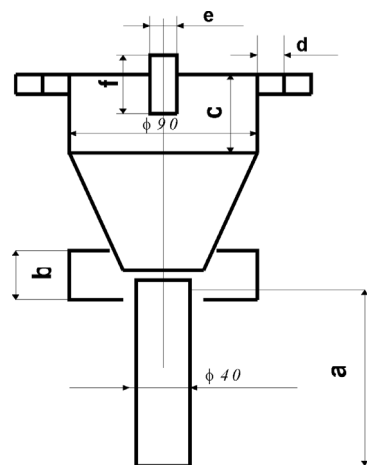
$$d'_o = \frac{3\sqrt{2}}{V_t} \sqrt{\frac{r(R-r)\eta V_w}{(\rho_w - \rho_o)h}} \quad (11)$$

gdzie:

V_w – prędkość osiowa, [m/s],
 h – wysokość stożka, [m].

Dla danych: $q_v = 2 \text{ m}^3/\text{h}$; $V_t = 5 \text{ m/s}$; $n = 0,5$; $R = 0,045 \text{ m}$; $r = 0,02 \text{ m}$; $\Delta\rho = (1000 - 850) = 150 \text{ kg/m}^3$; $H_c = 0,15 \text{ m}$ oraz $h = 0,37 \text{ m}$ otrzymano: $d_o = 42,9 \text{ }\mu\text{m}$ według (10) oraz $d'_o = 26,7 \text{ }\mu\text{m}$ według (11).

W tabelicy 1 zamieszczono wartości średnicy kropli oleju d_o [μm] obli-



Rys. 3. Hydrocyklon modelowy AM [4]

czone według wzoru (8) dla danych: $R = 0,045 \text{ m}$; $r_o = 0,003 \text{ m}$; $V_u = 5 \text{ m/s}$; $\rho_{w_{20}} = 998,2 \text{ kg/m}^3$; $\rho_o = 842 \text{ kg/m}^3$; $\eta_w = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ oraz $q_r = 1, 2, 3, 4, 5 \text{ m}^3/\text{h}$, zakładając liczbę zwojów wykonanych przez kroplę: $N = 15, 30, 40, 60, 80$.

Tabela 1
Obliczona średnica kropli oleju dla różnej liczby wykonanych przez nią zwojów

N	15	30	40	60	80
d_o [μm]	100	70	61	50	43

Należy dodać, że obliczenia przepływowe w hydrocyklonie zawierają wiele uproszczeń; między innymi pominięto zjawiska zachodzące w warstwie przyściennej i zjawisko wtórnej dyspersji, które zachodzi przy bardzo dużych prędkościach wlotowych, wrastających przy przejściu na mniejszy promień w ruchu spiralnym ku osi hydrocyklonu.

Wyniki pomiarów sprawności separacji i rozkładów wielkości kropli oleju za hydrocyklonem

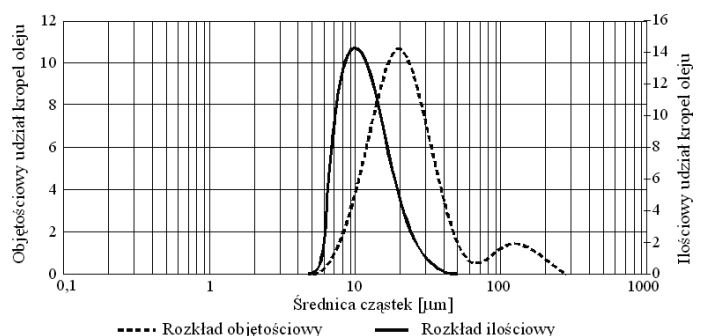
Dla parametrów zamieszczonych w tabelicy 2 obliczono sprawność separacji hydrocyklonu AM:

$$\eta = 1 - \frac{c_{odl}}{c_{wl}} = 1 - \frac{0,0016}{0,1} = 0,984 \quad (12)$$

Tabela 2
Parametry układu podczas pobierania próbek (paliwo lekkie) przy wyznaczaniu rozkładu średnic cząstek oleju w hydrocyklonie modelowym AM

Ilość przelewu q_v/q_p , [%]	10	Ciśnienie p_o	0,4
Ciśnienie pompy p_p , [bar]	0,8	Ciśnienie p_h	0,58
Stężenie oleju na wlocie, [%]	0,1	Stężenie na odlocie, [%]	0,0016

Na rys. 4 przedstawiono rozkłady objętościowe i ilościowe kropli oleju za hydrocyklonem AM, określone miernikiem *Malvern 2000* zgodnie z normą ISO 13320/01. Należy stwierdzić, że wyniki uzyskane w hydrocyklonie AM dają szansę na zastosowania go w systemach oczyszczania wód zaolejonych.



Rys. 4. Rozkład wielkości kropli oleju (paliwo lekkie) za hydrocyklonem AM, $C_d = 0,1\%$

LITERATURA

1. *J. Listewnik*: Badanie odolejania wód statkowych przy wykorzystaniu niekonwencjonalnych hydrocyklonów, Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, praca doktorska, Szczecin 1991.
2. *J. Listewnik*: Propozycje systemów oczyszczania zaolejonych wód morskich w hydrocyklonach, PAN KBN, WSM, Szczecin 2000.
3. *K. Jeżowiecka-Kabsch*: Mechanika płynów, skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1985.
4. Patent RP 1919701, *J. Listewnik*, Akademia Morska w Szczecinie 2006.