

STANISŁAW BEDNARSKI*, JANUSZ MAGIERA, ALEKSANDER PABIŚ**

ROZDZIAŁ UKŁADU CIECZ–CIECZ W PROTOTYPOWYM HYDROCYKLONIE

SEPARATION OF LIQUID–LIQUID SYSTEM IN PROTOTYPICAL HYDROCYCLONE

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki wstępnych badań zdolności rozdzielczej prototypowego hydrocyklonu dla emulsji oleju w wodzie. W trakcie badań zmieniano ciśnienie na wlocie do hydrocyklonu, stężenie oleju w emulsji oraz wymiary wybranych elementów urządzenia. Wyniki przedstawiono w postaci graficznej.

Słowa kluczowe: hydrocyklon, rozdział emulsji, siła odśrodkowa

Abstract

The results of initial investigations of separation efficiency of prototypical hydrocyclone for oil-in-water emulsion have been presented. An effect of the following operational parameters has been tested: the inlet pressure, the oil concentration in emulsion and the constructional parameters of device. The results have been shown in graphic form.

Keywords: hydrocyclone, separation of oil-in-water emulsions, centrifugal force

* Dr hab. inż. Stanisław Bednarski, emerytowany profesor Politechniki Krakowskiej.

** Dr hab. inż. Janusz Magiera, prof. PK, dr inż. Aleksander Pabiś, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Hydrocyklony z uwagi na prostotę konstrukcji, niezawodność działania, brak elementów ruchomych, małe wymiary gabarytowe oraz łatwość łączenia szeregowego i równoległego, wykorzystywane są w coraz to nowych dziedzinach przemysłu. Stosowane są w przemysłach: wydobywczym, petrochemicznym, papierniczym, cukrowniczym, chemicznym, farmaceutycznym, a także maszynowym i hutniczym. Pierwszy hydrocyklon był opatentowany w USA już w 1897 r., ale dopiero w 1914 r. wykorzystano hydrocyklony na skalę przemysłową w zakładach fosforanów.

Wzrost zainteresowania hydrocyklonami ze strony badaczy i praktyków nastąpił dopiero po II wojnie światowej. Pojawiły się wyniki badań doświadczalnych i prac teoretycznych poświęcone hydrodynamice pracy hydrocyklonów, co stworzyło podstawy do ich projektowania.

Aktualnie, najlepiej poznaną grupą tych urządzeń, dzięki licznym rezultatom badań i zastosowaniom przemysłowym, są hydrocyklony do wydzielania rozproszonej, cięższej fazy stałej z ciekłej (lżejszej) fazy ciągłej.

Drugą grupę stanowią hydrocyklony przeznaczone do rozdziału układów ciecz–ciecz. W tym przypadku szczegóły konstrukcyjne hydrocyklonu odgrywają bardzo ważną rolę z uwagi na niewielkie różnice w gęstości rozdzielanych cieczy w porównaniu ze znacznymi różnicami gęstości składników w układach ciecz–ciało stałe. Prekursorami badań tej grupy hydrocyklonów byli Simkin D.J. [1], Bradley D. [2], Sheng H.P. [3], a także Dolman D.A. i Thew M.T. [4, 5].

Trzecią grupę hydrocyklonów stanowią te, które pozwalają na wydzielenie dwóch i więcej faz rozproszonych o większych i mniejszych gęstościach w stosunku do ciekłej fazy ciągłej. Pierwszymi, którzy zaprezentowali rozwiązanie konstrukcyjne i wyniki badań takiego urządzenia byli Bednarski S. i Listewnik J. [6, 7].

Rosnące zainteresowanie wykorzystaniem hydrocyklonów uwidoczniło się między innymi przez rosnącą ilość zgłoszeń patentowych począwszy od lat siedemdziesiątych XX wieku. Z uwagi na ograniczone ramy publikacji wyszczególniono tylko kilkanaście z nich.

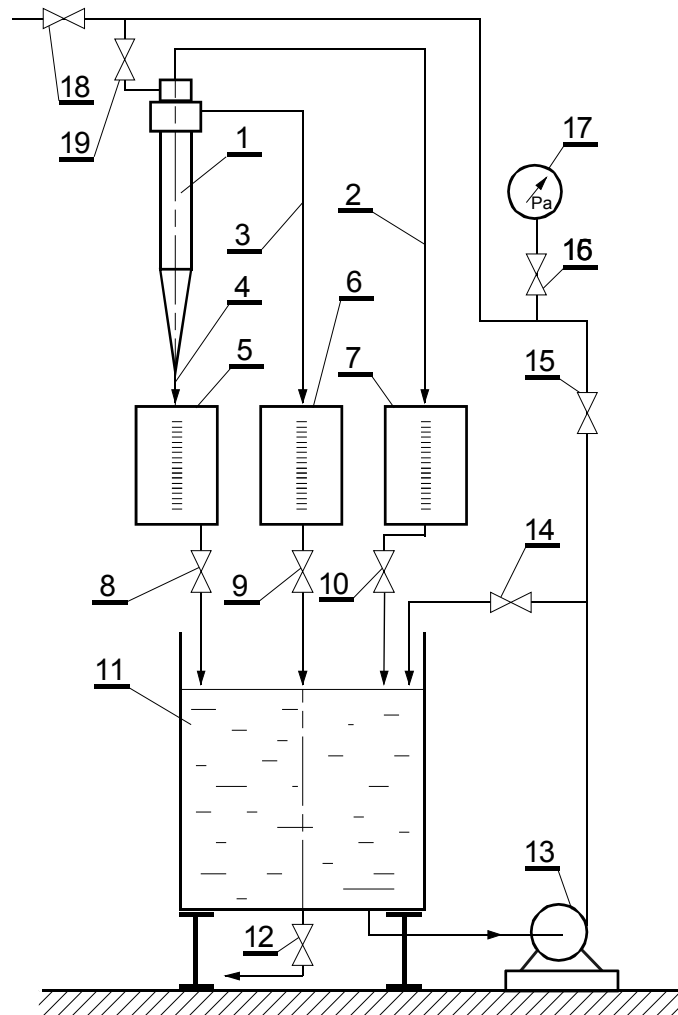
W 1970 r. Anders N. i Wrkdahl L. opatentowali uniwersalne urządzenie do rozdziału mieszanin ciekłych i gazowych, emulsji, zawiesin i innych układów dyspersyjnych [8]. Dolman D.A. i Thew M.T. są twórcami dwóch różnych, objętych patentami, rozwiązań hydrocyklonów [9, 12], innym badaczem, który opatentował dwa różne separatory cyklonowe był Carroll N. [10, 13].

Sung L. Suh i inni są autorami separatora hybrydowego wykorzystującego zarówno siłę odśrodkową jak i siłę grawitacji do rozdziału układów gaz–ciecz [11]. W Polsce, w 1989 r. Bednarski S. i Listewnik J. opatentowali hydrocyklon oraz sposób rozdziału w nim układu trójskładnikowego woda–olej–ciało stałe [14]. W 2001 r. Listewnik J. i inni zaproponowali nowatorskie rozwiązanie konstrukcyjne hydrocyklonu do oddzielania oleju od wody [15]. Zespół hydrocyklonów, wykonanych z PTFE i zamkniętych w jednej komorze, przeznaczony do rozdziału układu woda–olej–piasek opatentował w 2000 r. Shaw Ch.K. [16]. Analogiczne do poprzedniego zastosowanie ma hydrocyklon opatentowany w 2007 r. przez Kampferera H.P. [17].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników rozdziału układu woda–olej w prototypowym hydrocyklonie przeznaczonym do rozdziału dwu i trójskładnikowych układów dyspersyjnych (ciecz–ciecz oraz ciecz–ciecz–ciało stałe).

2. Opis stanowiska badawczego

W skład stanowiska badawczego (rys. 1) wchodziły: prototypowy hydrocyklon 1, przewód 2 z przelewu przeznaczony do odbioru lżejszego składnika emulsji (oleju), przewód 3 z przelewu, w którym odbierana jest woda, w przypadku emulsji woda-olej, przewód 4 z wylewu zamkniętego, w przypadku rozdziału emulsji i otwartego do rozdziału układu trójskładnikowego.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 1. Scheme of experimental set-up

Półprzezroczyste zbiorniki 5, 6, 7 z naniesioną podziałką wykorzystywano do określenia wydatków objętościowych strumieni z przelewów i wylewu, przez pomiar czasu napełniania określonej ich objętości, przy zamkniętych okresowo zaworach 8, 9, 10. Produkty rozdziału były zawracane do zbiornika magazynowego 11. Zawór 12 pozwalał na opróżnianie zbiornika. Pompa odśrodkowa 13 wykorzystywana była do wytwarzania emulsji wodno-olejowej, a następnie do jej transportu do hydrocyklonu. Emulsja wytwarzana była dzięki cyrkulacji mieszanki wodno-olejowej w układzie zbiornik–pompa–bypass przy otwartym zaworze 14 i zamkniętym zaworze 15. Po około 45 minutach przemykano częściowo zawór 14 i otwierano zawór 15, kierując emulsję do hydrocyklonu poprzez otwarty zawór 19. Na przewodzie tłocznym zainstalowany był manometr 17 pozwalający na ocenę ciśnienia na wlocie do hydrocyklonu.

Po pomiarze wydatku strumieni opuszczających hydrocyklon pobierano z nich po trzy próbki do późniejszej oceny zawartości w nich oleju. W trakcie badań zdolności wydzielania oleju z ciągłej fazy wodnej w prototypowym hydrocyklonie stosowano emulsje o stężeniu oleju w wodzie: 1, 2 i 3% wag. Pomiarów dokonywano przy trzech wartościach ciśnień na wlocie: 3, 4 i 5 bar.

W trakcie badań zmieniano również dwa elementy konstrukcyjne cylindryczno-stożkowego prototypu, a mianowicie długość części cylindrycznej oraz wykorzystywano lub usuwano wewnętrzną, cylindryczną przegrodę strefową uzyskując w ten sposób cztery typy tego samego urządzenia: A, B, C i D.



Rys. 2. Hydrocyklon typu A wykonany ze szkła organicznego

Fig. 2. Hydrocyclone of type A made up of organic glass

Ważniejsze wymiary hydrocyklonu:

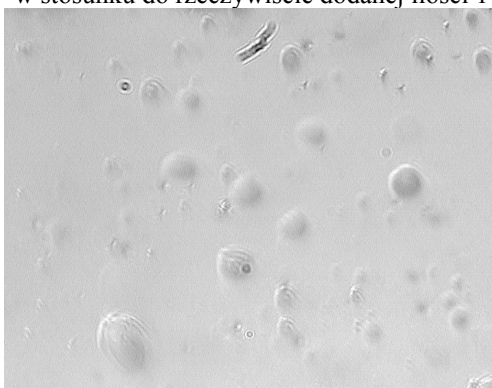
- wysokość części cylindrycznej: 350 lub 700 mm,
- średnica wewnętrzna części cylindrycznej $\Phi 54$ mm,
- wysokość części stożkowej 209,3 mm, kąt stożka 12° ,
- średnica wewnętrzna wymiennej dyszy olejowej $\Phi 6$ mm,
- średnica wewnętrzna bocznego króćca przelewu $\Phi 16$ mm,
- średnica wewnętrzna króćca dolotowego $\Phi 16$ mm,
- przegroda strefowa $\Phi 40/34$ mm,
- średnica dolnego otworu stożka $\Phi 10$ mm,
- średnica wewnętrzna wymiennej dyszy wylewu dołączonej do stożka w jej najwęższym miejscu $\Phi 6$ mm.

Badany hydrocyklon z uwagi na swoją wielofunkcyjność ma możliwość stosowania części cylindrycznej o różnej wysokości, zmiany dyszy wylewu i dyszy olejowej cechujących się różnymi średnicami otworu wewnętrznego oraz może pracować bez części stożkowej.

Hydrocyklon typu A posiadał część

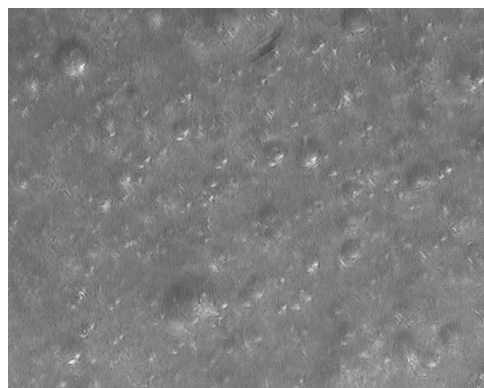
cylicydryczną o wysokości $H_c = 350$ mm i cylindryczną przegrodę strefową o wysokości 300 mm. Hydrocyklon B pracował bez przegrody strefowej. Typ C posiadał wydłużoną część cylindryczną $H_c = 700$ mm i przegrodę strefową o wysokości 650 mm, natomiast hydrocyklon D o tej samej wysokości H_c był pozbawiony przegrody strefowej. Rysunek 2. przedstawia zdjęcie hydrocyklonu A.

W celu określenia zawartości stosowanego oleju SN-200 w wodzie, po przejściu emulsji przez hydrocyklon i rozdzieleniu na dwie frakcje, zastosowano metodę wagową wg normy PN-78/C-04573. W ogólności metoda ta polega na ekstrahowaniu substancji organicznych dichlorometanem (CH_2Cl_2) z zakwaszonej (kwasem solnym) próbki zanieczyszczonej wody lub ścieków. Dokładność metody sprawdzono, przygotowując emulsję o zawartości oleju SN-200 znanej tylko laborantowi, a następnie przeprowadzono analizę, w wyniku której ustalono, że w 1 dm^3 wody znajdowało się $0,9997 \text{ g}$ oleju w stosunku do rzeczywiście dodanej ilości 1 g .



Rys. 3. Mikroskopowy obraz zawartości oleju we frakcji wodnej opuszczającej hydrocyklon

Fig. 3. Microscope view of oil content in water in side overflow fraction



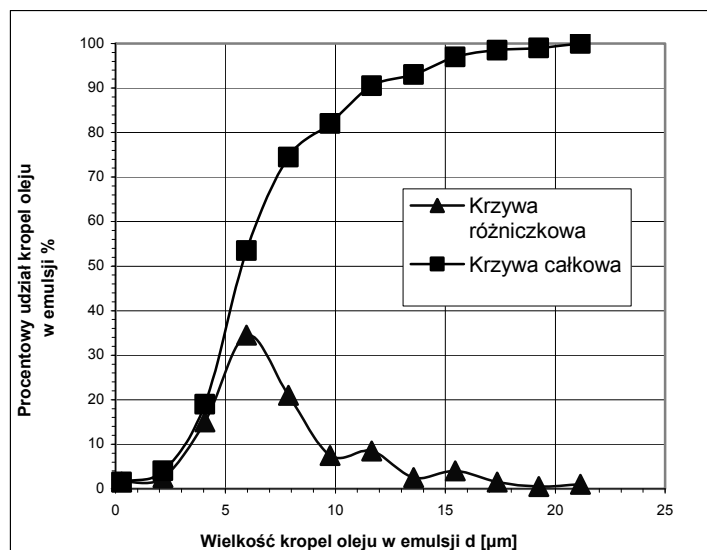
Rys. 4. Mikroskopowy obraz zawartości oleju we frakcji olejowej opuszczającej górny przelew hydrocyklonu

Fig. 4. Microscope view of oil content in oil fraction in upper overflow

W celu oceny wielkości kropeł badanego oleju w emulsji utworzonej w wyniku mieszania przez 45 minut w układzie zbiornik–pompa–bypass–zbiornik, wykonano zdjęcia mikroskopowe emulsji w nadawie oraz we frakcji olejowej i wodnej odebranych z hydrocyklonu. Uzyskane zdjęcia poddano obróbce, wykorzystując program Image-Pro Plus, co w efekcie pozwoliło na uzyskanie rozkładu średnic kropeł oleju.

Przykładowo rys. 3 przedstawiono obraz zawartości oleju we frakcji wodnej opuszczającej hydrocyklon, natomiast rys. 4 przedstawia zdjęcie frakcji olejowej po wyjściu z górnego przelewu.

Krzywą różniczkową i całkowitą rozkładu wielkości kropeł oleju w emulsji na wlocie do hydrocyklonu, będącą wynikiem analizy programu Image-Pro Plus przedstawiono na kolejnym rysunku. Krzywa różniczkowa wyraźnie wskazuje, iż w wytworzonej w trakcie badań emulsji przeważały krople o średnicy około $6 \mu\text{m}$. Z kolei analiza krzywej całkowitej pozwala stwierdzić, że 90% z wszystkich kropeł oleju w emulsji nie przekraczało średnicy $11,5 \mu\text{m}$.



Rys. 5. Krzywa różniczkowa i całkowita rozkładu wielkości kropeł oleju w emulsji na wlocie do hydrocyklonu

Fig. 5. Distribution of oil content % in inlet emulsion vs. diameter of drops

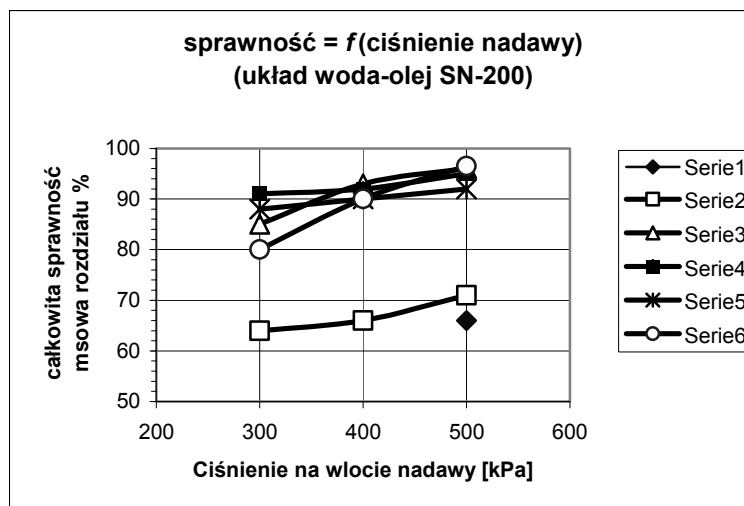
3. Wyniki badań

Rezultaty przeprowadzonych wstępnych badań przedstawiono na rys. 6, na którym umieszczono wykres zależności całkowitej sprawności masowej rozdziału $\eta\%$ w funkcji ciśnienia nadawy na wlocie do hydrocyklonu. Ogólna sprawność masowa definiowana jest jako stosunek masy oleju odzyskanego w górnym przelewie do jego zawartości w emulsji dostarczanej do hydrocyklonu (czyli w nadawie). W tabeli 1 zestawiono ważniejsze informacje odnośnie do sześciu zrealizowanych serii pomiarowych.

Tabela 1

Ważniejsze informacje odnośnie do sześciu serii pomiarowych zestawionych na wykresie (rys. 6)

Seria	Typ hydrocyklonu	Długość części cylindrycznej [mm]	Stosowanie wewnętrznej przegrody strefowej	Zawartość oleju [% mas]	Ciśnienie nadawy na wlocie [kPa]	Prędkość nadawy na wlocie do hydrocyklonu [m/s]		
1	A	350	stosowano	1	500	15,61		
2	B	350	brak	1	300, 400, 500	11,55	13,62	15,83
3	C	700	stosowano	1	300, 400, 500	11,57	13,39	15,41
4	D	700	brak	1	300, 400, 500	11,94	13,10	15,81
5	D	700	brak	2	300, 400, 500	11,60	13,78	15,15
6	C	700	stosowano	3	300, 400, 500	11,35	13,06	15,51



Rys. 6. Ogólna sprawność masowa rozdziálu η uzyskana w 6 seriach pomiarowych

Fig. 6. Overall mass efficiency of separation based on 6 series of investigations

4. Wnioski

Wyniki wstępnych badań wykazały, iż prototypowy hydrocyklon projektowany jako urządzenie uniwersalne pozwalające na rozdział układów dwu- i trójskładnikowych może być wykorzystywany do rozdziálu układu dwuskładnikowego woda-olej, gdzie woda stanowi fazę ciągłą, pomimo stosunkowo niewielkiej różnicy gęstości obu cieczy (gęstość wody w 20°C – 998 kg/m³, a oleju SN-200 878 kg/m³).

Istotnym parametrem geometrycznym wpływającym na całkowitą sprawność masową okazała się wysokość części cylindrycznej. Wydłużenie tej części hydrocyklonu z 350 mm do 700 mm spowodowało wzrost sprawności średnio o około 25%.

Wyższe wartości sprawności były również generowane przez wzrost ciśnienia na wlocie do hydrocyklonu, co w badanym układzie wiązało się ze wzrostem wydatku objętościowego, średniej prędkości na wlocie i wzrostem oddziaływania siły odśrodkowej. Zmiana ciśnienia od 3 do 5 bar wywoływała wzrost sprawności urządzenia od około 5 do 15%.

Nie stwierdzono jednoznacznego wpływu przegrody strefowej na zdolność rozdzielać urządzenia z wyjątkiem krótkiego hydrocyklonu A, w którym po usunięciu przegrody uzyskano pewien wzrost sprawności przy tym samym ciśnieniu wlotowym.

W trakcie pomiarów stosowano emulsje o stężeniach 1, 2 oraz 3% masowych. Również ten parametr w badanym zakresie nie miał jednoznacznego wpływu na zdolność rozdzielać hydrocyklonu.

Reasumując, uzyskany poziom sprawności rozdziálu emulsji kwalifikuje badany hydrocyklon do wykorzystania w procesie oczyszczania wody z zawartego w niej oleju, aczkolwiek pełne jego możliwości mogą być ocenione po dokonaniu dodatkowych badań. Badania te powinny obejmować pracę urządzenia z dłuższą częścią cylindryczną (wg

projektu 1000 i 1400 mm), przebadanie wpływu średnicy dyszy olejowej i średnicy króćca dolotowego nadawy. Zgodnie z danymi literaturowymi zalecany stosunek długości części cylindrycznej hydrocyklonu do jej średnicy powinien wahać się od 10 do 20, a nawet 25. Stąd przebadanie pracy „dłuższego” hydrocyklonu byłoby szczególnie interesujące.

Literatura

- [1] Simkin D.J., Olney R.B.: A.I.C.H.E. Journal, Vol. 2, nr 4, 1956, 545-551.
- [2] Bradley D.: *The Hydrocyclone*, Pergamon Press, 1965.
- [3] Sheng H.P. et al.: Can. J. Chem. Eng., Vol 50, 1974, 487-491.
- [4] Colman D.A., Thew M.T., Corney D.R.: *Hydrocyclones for oil/water separation*, Inter. Conference on Hydrocyclone, Churchill College, Cambridge, UK, 1-3 October 1980.
- [5] Colman D.A.: *The hydrocyclone for separating light dispersion*, Ph.D. Thesis, Dept of Mech. Eng., Southampton University, 1981.
- [6] Bednarski S., Listewnik J.: *Hydrocyclones for simultaneous removal of oil and solid particles from ships' oily waters*, 3rd International Conference on Hydrocyclones, Oxford, UK, 30.09.–2.10.1987.
- [7] Bednarski S.: *Hydrocyclones. Analysis and Applications*, 4th International Conference on Hydrocyclones, Southampton, UK, 23-25 September 1992.
- [8] Anders N., Wrkdahl L.: *Array of Cyclonic Separators*, Patent USA nr 3747306, 17.09.1970.
- [9] Colman D.A., Thew M.T.: *Cyclone Separator*, Patent USA nr 4237006, 2.12.1980.
- [10] Carroll N.: *Cyclone Separator*, Patent USA nr 4544486, 1.10.1985.
- [11] Suh Sung L. et al.: *Hybrid Duple Hydrocyclone – Gravity Gaz/Liquid Separator*, Patent USA nr 4617031, 14.10.1986.
- [12] Dolman D.A., Thew M.T.: *Cyclone Separator*, Patent USA nr 4764287, 16.08.1988.
- [13] Carroll N. et al.: *Cyclone separator*, Patent USA nr 4738779, 19.04.1988.
- [14] Bednarski S., Listewnik J.: *Metod of Separating Components of Three – Phase Non – Homogenous and Apparatus Tferedor*, Patent PL nr 271532, 15.01.1989.
- [15] Listewnik J. i inni: *Hydrocyklon*, Patent PL nr 337760, 16.07. 2001.
- [16] Shaw Ch.K.: *Cyclonic Separator Assambly and Metod*, Patent USA nr 6089317, 18.07.2000.
- [17] Kampfer H.P.: *Hydrocyclone Oil/Sand/Water Separating Apparatus*, Patent USA 2007215541, 20.09.2007.