



Możliwości modyfikacji konstrukcji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym

TADEUSZ DZIUBAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. Przedstawiono wpływ wymiarów głównych cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym na efektywność odpylania. Zaprezentowano przykładowe modyfikacje konstrukcji cyklonów oraz dokonano ich oceny w zakresie zastosowania w filtrze powietrza pojazdu mechanicznego. Przeprowadzono modyfikację konstrukcji cyklonu D-40 filtru powietrza pojazdu terenowego. Dokonano eksperymentalnej oceny wpływu zmian konstrukcyjnych cyklonu na charakterystyki skuteczności odpylania i oporu przepływu. Określono przy pomocy licznika cząstek rozmiar i liczbę ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem przed i po wykonaniu jego modyfikacji.

Słowa kluczowe: filtr powietrza, cyklony, skuteczność odpylania, opór przepływu, rozmiar ziaren pyłu, licznik cząstek

Symbole UKD: 621.432.001.5

1. Wprowadzenie

Zapewnienie odpowiedniej czystości powietrza wlotowego do silników spalinowych pojazdów mechanicznych i maszyn roboczych było zawsze i pozostaje nadal ważnym problemem eksploatacyjnym i konstrukcyjnym, szczególnie gdy pojazdy eksploatowane są w warunkach dużego (około 1 g/m^3) zapylenia powietrza. Dotyczy to głównie wojskowych pojazdów specjalnych (czołgi, bwp, działa samobieżne, samochody specjalne), wyposażonych w silniki o ZS dużej mocy, których maksymalne zapotrzebowanie powietrza Q_{Sil} znacznie przekracza wartość 1 kg/s , na przykład: dla silnika czołgu T-72 $Q_{Sil} = 1,21 \text{ kg/s}$, ($3400 \text{ m}^3/\text{h}$), a dla silnika czołgu Leopard 2 $Q_{Sil} = 2,15 \text{ kg/s}$ ($6000 \text{ m}^3/\text{h}$) [6]. Jeżeli zapylenie powietrza wynosi $s = 1 \text{ g/m}^3$, co często ma

miejsce podczas eksploatacji pojazdów na poligonowych placach ćwiczeń, to do silników wymienionych czołgów zasysany jest strumień pyłu o wartości odpowiednio 0,94 g/s i 1,67 g/s.

Do usunięcia z dużego strumienia powietrza tak znacznej masy pyłu, którego rozmiary nie przekraczają 100 μm [1, 3], stosuje się dwustopniowe filtry powietrza, pracujące w systemie multicyklon-przegroda porowata, która wykonana jest najczęściej w postaci papierowego wkładu filtracyjnego.

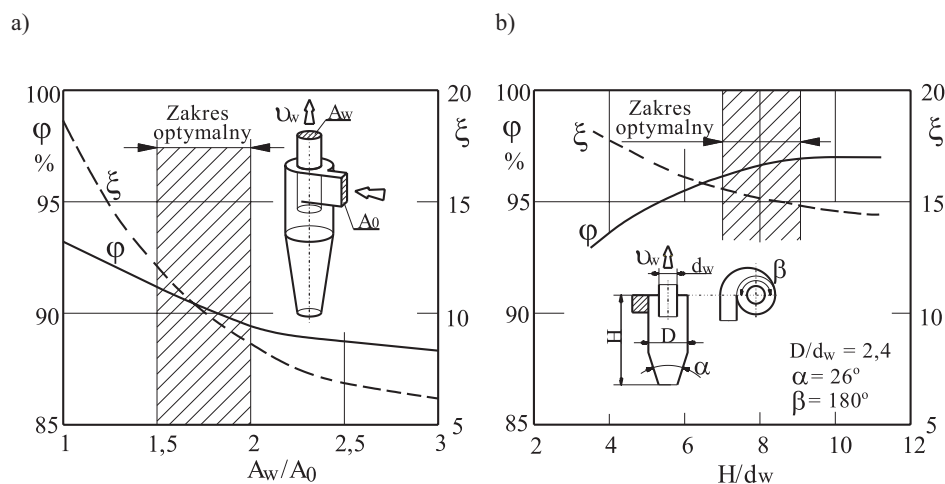
Multicyklon to zespół rozmieszczonych równolegle obok siebie jednakowych elementów filtracyjnych — cyklonów, umocowanych we wspólnych płytach sitowych — dolnej i górnej. Napływ strumienia gazu do wszystkich cyklonów odbywa się bezpośrednio z otoczenia, a jeżeli multicyklon jest zamknięty w obudowie, to wtedy strumień powietrza doprowadzany jest z otoczenia zbiorczym przewodem. Multicyklony charakteryzują się skutecznością odpylania dochodzącą do 98% [2]. Tylko w ciągu 8 godzin pracy silnika czołgu T-72 w warunkach poligonowych multicyklon filtru powietrza może zatrzymać ponad 25 kg pyłu, który odprowadzany jest na bieżąco poprzez układ eiekcyjnego odsysania.

Wysoką efektywność pracy cyklonu, określaną przez skuteczność odpylania φ i opór przepływu Δp , uzyskuje się poprzez zastosowanie odpowiednich prędkości przepływu powietrza i proporcji jego wymiarów głównych — parametrów geometrycznych, które zostały ustalone w wyniku prowadzonych przez wiele lat prac badawczych [7, 8, 11, 14]. Badania te wykazały wzajemną zależność pomiędzy wymiarami głównymi cyklonu i doprowadziły do ustalenia wpływu tych wymiarów na zmiany skuteczności odpylania oraz oporu przepływu i określenia zakresu wartości parametrów geometrycznych cyklonu (ilorazów wymiarów głównych), dla których cyklon uzyskuje optymalne warunki pracy. Z przedstawionych (rys. 1) przykładowych zmian skuteczności odpylania φ i współczynnika oporów przepływu ξ w funkcji ilorazu A_w/A_0 i H/d_w wynika, że optymalny zakres tych parametrów mieści się odpowiednio w zakresie 1,5 ÷ 2 i 7 ÷ 9 [8]. Przy czym, współczynnik oporu przepływu ξ definiowany jest zależnością:

$$\xi = \frac{2\Delta p}{\rho_p \cdot v_w^2}, \quad (1)$$

gdzie: ρ_p — gęstość powietrza; Δp — opór przepływu powietrza przez cyklon; v_w — prędkość wylotowa z cyklonu.

Wykorzystanie tych danych podczas prac projektowych cyklonów pozwala uzyskać stosunkowo wysoką efektywność odpylania w odniesieniu do cząstek mikronowych.



Rys. 1. Skuteczność odpylania φ i współczynnik oporu przepływu ξ w funkcji ilorazu wymiarów głównych cyklonu: a) iloraz pól przekroju poprzecznego przewodu wylotowego A_w i króćca wlotowego A_0 ; b) iloraz wysokości cyklonu H i średnicy rurki wylotowej d_w [8]

Dlatego prowadzone są ciągle prace, mające na celu zwiększenie sprawności wydzielenia cząstek aerozolowych w cyklonach oraz ograniczanie oporów przepływu powietrza poprzez modyfikację ich konstrukcji bez zmian wymiarów głównych. Opisane w literaturze różne sposoby poprawy efektywności pracy cyklonów [4, 9-13, 17-19], mimo że zostały zweryfikowane podczas badań laboratoryjnych, nie zostały sprawdzone w praktycznych rozwiązaniach multicyklonów pojazdów mechanicznych.

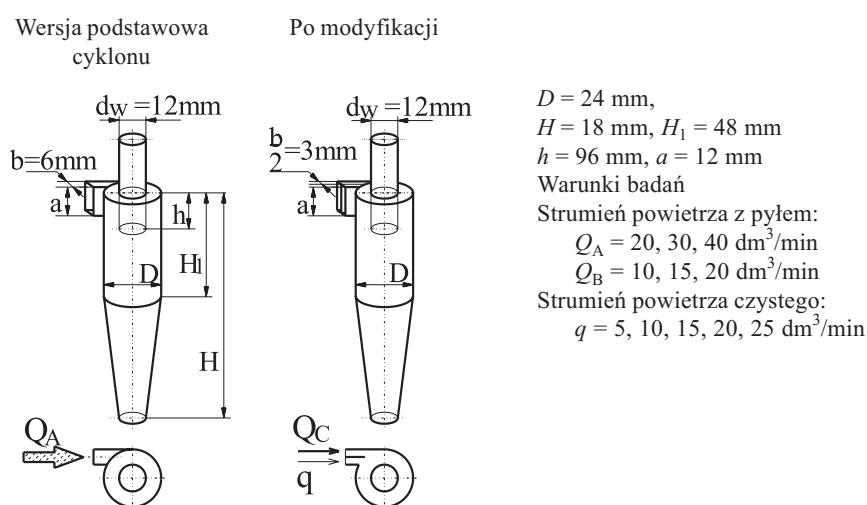
Niniejsza praca przedstawia eksperymentalną ocenę zastosowania wybranych rozwiązań konstrukcyjnych do modyfikacji cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym, będącego elementem multicyklonu filtru powietrza pojazdu wojskowego. Ocena dotyczy skuteczności odpylania i oporu przepływu strumienia powietrza.

2. Przykłady modyfikacji konstrukcji cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym

Poprawieniu efektywności działania cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym, bez ingerencji w jego podstawowe wymiary geometryczne, poświęcono wiele prac badawczych, z których wynikają trzy kierunki działań w modyfikacji cyklonów. Autorzy prac [4, 13, 17, 18] udowodnili, że sposób doprowadzenia strumienia dolotowego do części cylindrycznej cyklonu ma znaczny wpływ na poprawę skuteczności odpylania. Inni uważają, że kształtowanie przewodu wylotowego cyklonu daje duże możliwości ograniczenia oporów przepływu [11, 12]. Spotyka

się prace, w których autorzy prezentują oryginalne sposoby zwiększenia efektywności działania cyklonów [9, 10, 19].

W pracy [13] przedstawiono badania cyklonu, do którego doprowadzono strumień czystego powietrza q , dodatkowym króćcem wlotowym usytuowanym równolegle (obok siebie) do króćca strumienia powietrza zanieczyszczonego pyłem Q — rysunek 2.

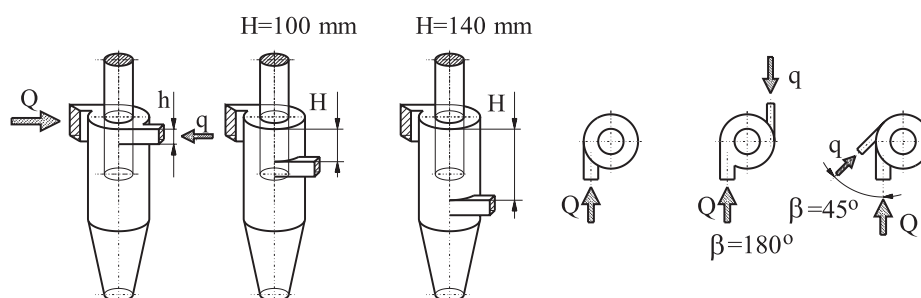


Rys. 2. Cyklon zwrotny z wlotem stycznym z dodatkowym króćcem doprowadzenia powietrza do części cylindrycznej [13]

Zachowując warunek $q = Q$ oraz tę samą wartość prędkości wlotowej w obu króćcach wlotowych, określono skuteczność cyklonów przy użyciu monodispersyjnego pyłu testowego (PSL polystyrene latex) o gęstości $1,05\text{ g/cm}^3$ i rozmiarze ziaren w zakresie $0,67 \div 2,92\ \mu\text{m}$. Mimo że uzyskano poprawę skuteczności odpylania bez wyraźnego wzrostu oporu przepływu, cyklony tej konstrukcji trudno byłoby zastosować w multicyklonach filtrów pojazdów mechanicznych ze względu na trudności techniczne w doprowadzeniu strumienia czystego powietrza do kilkudziesięciu pojedynczych cyklonów usytuowanych blisko siebie.

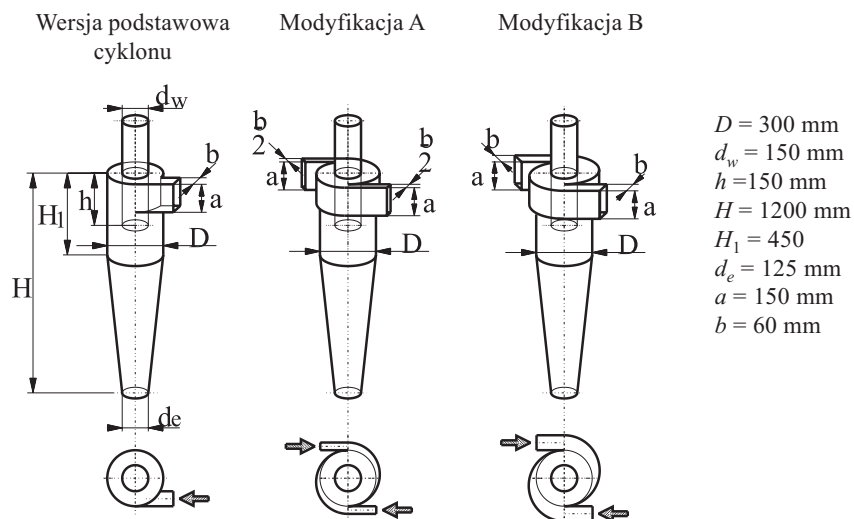
Podobny sposób podwyższenia skuteczności odpylania cyklonu zastosowali autorzy pracy [17]. Do cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym o średnicy $D = 72\text{ mm}$ zastosowali dodatkowy stycznymi króćcem, którym dozowali strumień czystego sprężonego powietrza w zakresie $q = 0 \div 210\text{ dm}^3/\text{min}$, zachowując warunek: $Q + q = \text{const} = 630\text{ dm}^3/\text{min}$. Zmieniając położenie króćca dodatkowego wzdłuż wysokości części cylindrycznej, największą skuteczność odpylania cyklonu uzyskano, gdy oba króćce wlotowe położone były w tej samej płaszczyźnie w górnej części cylindrycznej cyklonu, a ich osie symetrii były równoległe,

kątem $\beta = 180^\circ$ — rysunek 3. Wzrost strumienia powietrza dodatkowego w zakresie $q = 0 \div 210 \text{ dm}^3/\text{min}$ powodował wzrost skuteczności odpylania cyklonu od $\varphi_c = 93,2\%$ do $\varphi_c = 98,1\%$.



Rys. 3. Cyklon zwrotny z wlotem stycznym z dodatkowym króćcem doprowadzenia powietrza w części cylindrycznej [17]

Wpływ sposobu doprowadzenia powietrza do części cylindrycznej cyklonu dwoma króćcami badali także autorzy pracy [18]. W tym przypadku króćce wlotowe cyklonu położone były w tej samej płaszczyźnie — rysunek 4.



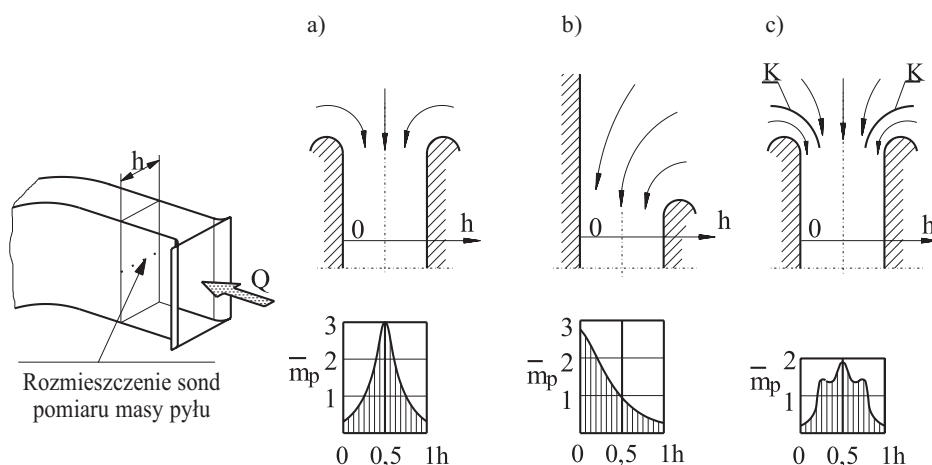
Rys. 4. Sposoby doprowadzenia gazu do części cylindrycznej cyklonu [23]

Badając wersję podstawową cyklonu oraz dwie modyfikacje (A, B — rys. 4) cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym o tych samych wymiarach i dla tych samych wartości prędkości wlotowych, wykazano, że cyklon z dwoma symetrycz-

nymi króćcami wlotowymi w części cylindrycznej (cyklon B — rys. 4) charakteryzuje się największą skutecznością odpylania ($\varphi_c = 97,2\%$ dla $v_0 = 20$ m/s) i największymi oporami przepływu w całym zakresie ($v_0 = 12,0 \div 23,85$ m/s) badanej prędkości wlotowej. Przy niższych prędkościach wlotowych różnica skuteczności między modyfikacją cyklonu A (o najniższej skuteczności) a modyfikacją B wynosi 3% i jest dwukrotnie większa niż dla wyższych wartości v_0 . Uzyskane efekty należy tłumaczyć tym, że wlot styczny w kształcie spirali dolotowej opisanej na części cylindrycznej eliminuje wzajemne oddziaływanie strumieni gazu wpływającego i wirującego, co daje lepsze efekty wydzielania ziaren pyłu niż wlot z króćcem wpisanym w część cylindryczną. Kąt opasania β spirali na części cylindrycznej cyklonu praktycznie nie przekracza 180° [11].

Autorzy pracy [4] wykazali, że stosowany powszechnie w cyklonach zwrotnych z wlotem stycznym wlotowy króciec symetryczny z zaokrąglonymi krawędziami, powoduje niekorzystny rozkład masowy cząstek pyłu w przekroju poprzecznym (rys. 5a), co może mieć ujemny wpływ na skuteczność odpylania.

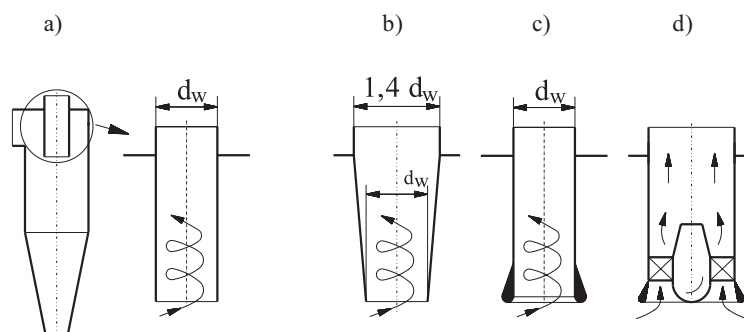
Zastąpienie wlotu symetrycznego wlotem niesymetrycznym (rys. 5b) lub zastosowanie bezpośrednio przed takim wlotem kierownic „K” (rys. 5c) powoduje skierowanie (już na wlocie) w stronę ścianki zewnętrznej części cylindrycznej cyklonu znacznej masy pyłu, co w naturalny sposób ułatwia wydzielanie go z powietrza, a tym samym podwyższa skuteczność odpylania.



Rys. 5. Rozkład masowy pyłu w przekroju poprzecznym płaskiego wlotu [4]: a) symetrycznego; b) niesymetrycznego; c) symetrycznego z kierownicami; \bar{m}_p — względny udział masy pyłu w strumieniu powietrza wlotowego

Dotychczasowe badania wykazują, że największy udział (około $75 \div 90\%$) w całkowitych stratach ciśnienia gazu w cyklonie zwrotnym z wlotem stycznym

mają straty podczas przepływu przez przewód wylotowy. Aby zminimalizować te straty, stosuje się szereg sposobów (konstrukcji) kształtowania przewodu wylotowego [11, 12].

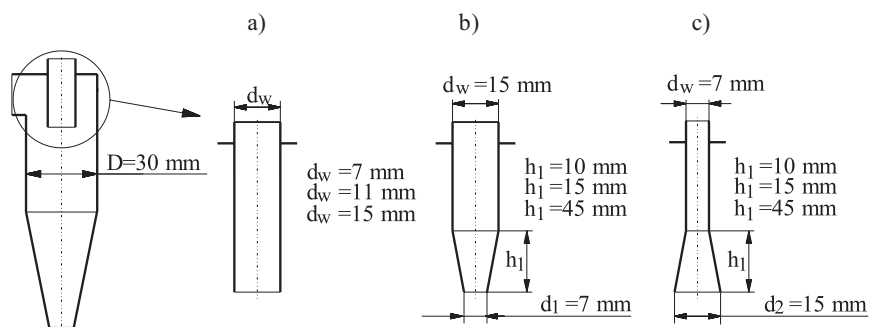


Rys. 6. Kształtowanie rurki wylotowej cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym [11]: a) wersja oryginalna; b) rurka stożkowa; c) rurka cylindryczna z opływowym wlotem; d) rurka z kierownicami na wlocie

Zastąpienie tradycyjnej cylindrycznej rurki wylotowej przez stożkową, z zachowaniem średnicy d_w otworu wlotowego, oraz wprowadzenie opływowego kształtu otworu wlotowego rurki wylotowej (rys. 6b, c) może znacznie zmniejszyć opory przepływu w cyklonie, nie powodując spadku skuteczności odpylania. Innym sposobem, pozwalającym zmniejszyć opory przepływu cyklonu, jest stosowanie specjalnych kierownic (rys. 6d) wewnątrz rurki wylotowej, służących do zamiany energii kinetycznej ruchu spiralnego, jakim porusza się gaz wewnątrz rurki, na energię kinetyczną ruchu liniowego. W dostępnej literaturze brak jest jednak informacji o badaniach tego typu rozwiązań.

W pracy [12] przedstawiono wyniki badań cyklonu zwrotnego z wlotem stycznym ($D = 30$ mm) z rurkami wylotowymi o tej samej długości lecz o różnych kształtach: cylindryczne o średnicy $d_w = 15, 11, 7$ mm, ze stożkami zbieżnymi i rozbieżnymi o długości stożka $h_s = 10, 25, 45$ i średnicach $d_1 = 7$ mm i $d_2 = 15$ mm na obu końcach stożka (rys. 7).

Skuteczność różnych wariantów cyklonów określano przy użyciu monodispersyjnego pyłu testowego (PSL) o gęstości $1,05$ g/cm³ dla dwóch różnych wartości strumienia powietrza $Q = 30$ dm³/min i $Q = 50$ dm³/min. Cyklony ze stożkowymi rurkami wylotowymi wykazywały większą skuteczność odpylania niż cyklon z cylindryczną rurką wylotową o średnicy $d_w = 15$ mm i mniejszą skuteczność niż cyklon z cylindryczną rurką wylotową o średnicy $d_w = 7$ mm. Wysokość stożka nie wpływa zasadniczo na skuteczność odpylania cyklonu i jego opór przepływu.



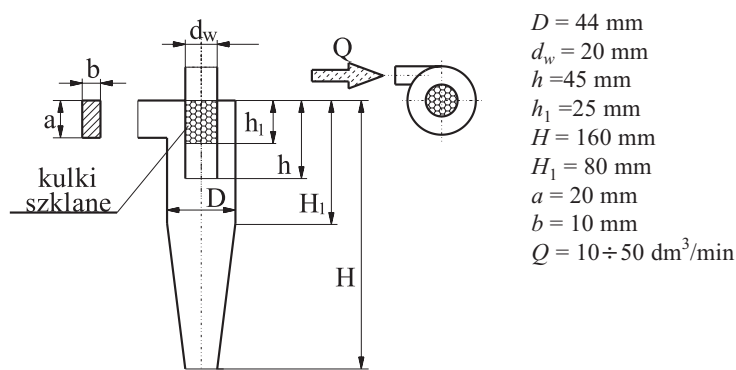
Rys. 7. Kształtowanie cylindrycznej rurki wylotowej cyklonu: a) rurki cylindryczne; b) rurki z wlotami zbieżnymi; c) rurki z wlotami rozbieżnymi [12]

Przedstawione modyfikacje rurki wylotowej, ze względu na mało skomplikowaną konstrukcję, mogą być wykonywane w cyklonach stosowanych jako elementy multicyklonów filtrów powietrza pojazdów mechanicznych.

W celu zapobieżenia przenoszeniu się ruchu wirowego gazu do osadnika pyłu cyklonu i unoszeniu z niego oddzielonego już pyłu, cyklony wyposaża się w stożek w otworze wysypowym pyłu [11, 16]. Sposób ten zalecany jest do stosowania w tych cyklonach, w których nie zastosowano odsysania z osadnika odseparowanego pyłu oraz w cyklonach „krótkich”, tzn. o małym stosunku wysokości cyklonu H do jego średnicy D . Multicyklony współczesnych pojazdów mechanicznych (szczególnie wojskowych) wyposażone są w układ odsysania, a więc stosowanie stożka na wylocie pyłu z cyklonu nie jest konieczne.

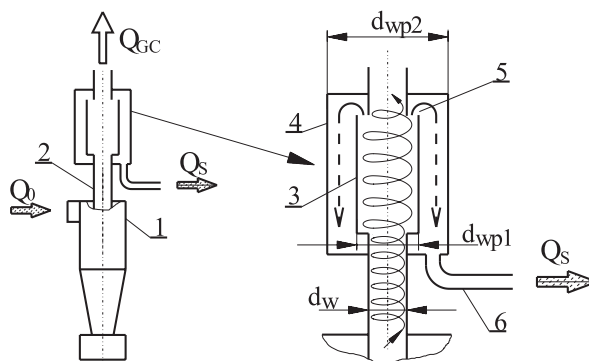
3. Nietypowe konstrukcje cyklonów zwrotnych z wlotem stycznym

Nietypowy sposób podwyższenia efektywności odpylania cyklonu przedstawili autorzy pracy [10]. Prowadzili oni badania 4 wariantów cyklonu ($D = 44 \text{ mm}$), w rurce wylotowej którego, na długości $h_1 = 25 \text{ mm}$, znajdowały się szklane kulki o średnicach odpowiednio $d_g = 2, 3, 4, 5 \text{ mm}$ (rys. 8). Obecność szklanych kulek powoduje, że przy mniejszych wartościach strumienia powietrza $Q = 10 \text{ dm}^3/\text{min}$ nastąpił wzrost skuteczności odpylania wszystkich ziaren pyłu testowego PSL z zakresu $d_z = 0,6 \div 8,8 \text{ }\mu\text{m}$. Przy wyższych wartościach $Q = 30 \div 50 \text{ dm}^3/\text{min}$ następuje nieznaczne obniżenie skuteczności odpylania dużych ziaren pyłu. Im średnica d_g szklanych kulek w rurce wylotowej jest większa, tym wzrost skuteczności odpylania cyklonu, w porównaniu z cyklonem bez kulek, jest coraz mniejszy, natomiast wzrost oporów przepływu jest coraz większy.



Rys. 8. Cyklon zwrotny z wlotem stycznym z granulkami w rurce wylotowej [10]

Oryginalny sposób podwyższenia skuteczności odpylania w cyklonie przedstawiono w pracy [9]. Przewód wylotowy o średnicy $d_w = 100 \text{ mm}$ za cyklonem zaopatrzono w zasobnik. Krótki odcinek przewodu cylindrycznego 3 o średnicy $d_{wp1} = 120 \text{ mm}$ połączono szczelnie z rurką wylotową, zostawiając szczelinę w górnej części zasobnika (rys. 9).

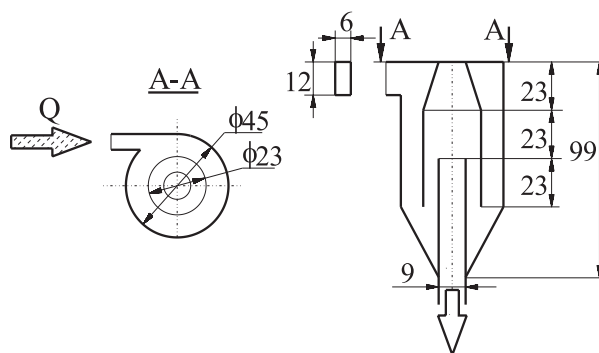


Rys. 9. Cyklon zwrotny z wlotem stycznym z zasobnikiem na wylocie z cyklonu: 1 — cyklon; 2 — rurka wylotowa cyklonu; 3 — dodatkowy przewód cylindryczny; 4 — zasobnik PoC; 5 — szczelina wylotowa; 6 — przewód odsysania [9]

Wypływający z cyklonu ruchem śrubowym strumień powietrza zawiera jeszcze zanieczyszczenia, z których część ulega wydzieleniu i przedostaje się utworzoną szczeliną 5 do przestrzeni zasobnika, skąd usuwana jest w sposób efektywnej. Autorzy pracy [9] badali zastosowanie takiego rozwiązania (w literaturze nazywane „Post Cyclone” PoC) w pojedynczym cyklonie o średnicy $D = 200 \text{ mm}$ i wysokości $H = 850 \text{ mm}$ dla trzech różnych średnic d_{wp1} (120; 135; 150 mm)

i d_{wp2} (210; 266; 310 mm) oraz przy stopniu efekcyjnego odsysania w zakresie $m_{0P} = 10 \div 25\%$. Stosując jako pył testowy cząstki wapna hydratyzowanego $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o gęstości $2,45 \text{ g/cm}^3$, przy $m_{0P} = 20\%$ i prędkości wlotowej do cyklonu w zakresie $v_0 = 4,9 \div 23,2 \text{ m/s}$, uzyskali zmiany skuteczności odpylania cyklonu w zakresie $\varphi_c = 63 \div 83\%$, a z zasobnikiem na wylocie $\varphi_{cp} = 70 \div 88\%$, przy czym wyższe wartości skuteczności uzyskano dla mniejszych wartości średnic d_{wp1} , wyższych wartości stopnia odsysania m_{0P} oraz dla wyższych prędkości v_0 .

Zastosowanie rozwiązania z zasobnikiem typu PoC w cyklonach multicyklonu filtru powietrza pojazdu mechanicznego jest konstrukcyjnie kłopotliwe i kosztowne.



Rys. 10. Cyklon podwójny zwrotny z wlotem stycznym [19]

Autorzy pracy [19] dla podwyższenia skuteczności odpylania aerozolu zastosowali cyklon „podwójny” (rys. 10), będący połączeniem dwóch cyklonów klasycznych zwrotnych z wlotem stycznym. Prowadząc badania porównawcze cyklonu „podwójnego” i cyklonu klasycznego, wykazali, że w zakresie zmian strumienia powietrza $Q = 10 \div 40 \text{ dm}^3/\text{min}$, zachowując te same wartości prędkości wlotowej, przy użyciu pyłu testowego PSL o rozmiarach ziaren $d_z = 0,6 \div 8,8 \text{ }\mu\text{m}$ i gęstości $1,05 \text{ g/cm}^3$, cyklon podwójny cechuje się wyższą skutecznością odpylania, ale też i wyższymi (trzykrotnie) oporami przepływu ($0,145 \text{ kPa}$ przy $40 \text{ dm}^3/\text{min}$) w porównaniu z cyklonem klasycznym. Różnice te widoczne są szczególnie w zakresie wyższych wartości strumienia powietrza. Z opisu nie wynika, w jaki sposób odprowadzany jest pył wydzielony w cyklonie. Skomplikowana konstrukcja cyklonu „podwójnego” nie kwalifikuje go do zastosowania w multicyklonie filtru powietrza pojazdu mechanicznego.

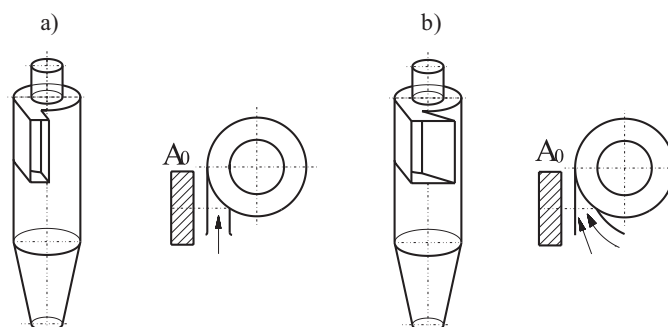
Z powyższej analizy wynika, że:

1. Możliwa jest poprawa efektywności pracy cyklonu w zakresie zmniejszenia oporów przepływu lub zwiększenia skuteczności odpylania poprzez modyfikację jego konstrukcji bez zmiany jego wymiarów głównych.
2. Przedstawione modyfikacje cyklonów zostały wykonane w cyklonach pojedynczych i przetestowane w kierunku wykorzystania ich do celów przemysłowych.

3. Do modyfikacji cyklonów będących elementami multicyklonu stanowiącego stopień pierwszy filtru powietrza pojazdu mechanicznego mogą być wykorzystane następujące rozwiązania:
- zmiana sposobu połączenia króćca wlotowego z kadłubem cyklonu;
 - zmiana geometrii przekroju i kształtu wlotu króćca wlotowego;
 - zmiana ukształtowania przewodu wylotowego (rurki wylotowej);
 - zastosowanie opływowego kształtu otworu wlotowego do przewodu wylotowego.

4. Możliwości modyfikacji cyklonu filtru powietrza

Przedstawione propozycje modyfikacji konstrukcji cyklonu przeanalizowano pod względem możliwości praktycznego zastosowania w cyklonie zwrotnym z wlotem stycznym D-40 (rys. 11a), stosowanym powszechnie w multicyklonach filtrów powietrza, będących aktualnie na wyposażeniu WP, czołgów T-72, PT-91 oraz w pojazdach specjalnych zbudowanych na tych podwoziach.

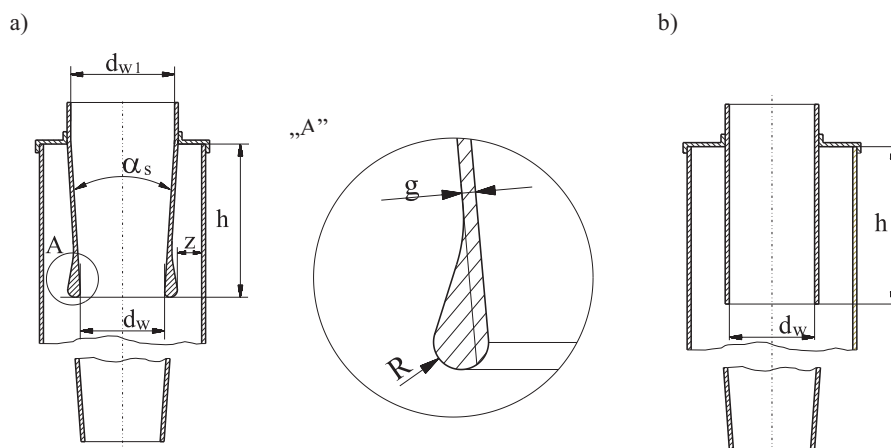


Rys. 11. Modyfikacja konstrukcji cyklonu D-40: a) oryginalny (symetryczny) kształt króćca wlotowego; b) krzywoliniowy wlot niesymetryczny

Cyklon zwrotny z wlotem stycznym D-40, ze względu na prostotę konstrukcji, wydaje się najbardziej podatny na zmiany konstrukcyjne, które mogą doprowadzić do zmniejszenia oporów przepływu. Zmiany konstrukcyjne nie powinny jednak naruszać podstawowych wymiarów cyklonu, gdyż może to spowodować skutek odwrotny.

W związku z powyższym, konstrukcję cyklonu D-40 zmodyfikowano, wprowadzając następujące zmiany:

- A. zastosowano niesymetryczny krzywoliniowy kształt króćca wlotowego zamiast symetrycznego (rys. 11b)
- B. nadano opływowy kształt krawędziom otworu wlotowego rurki wylotowej (rys. 12)
- C. zastosowano stożkową rurkę wylotową d_w (rys. 12).



Rys. 12. Cyklon D-40: a) stożkowa rurka wylotowa z opływowym kształtem otworu wlotowego; b) cylindryczna rurka wylotowa — wersja oryginalna

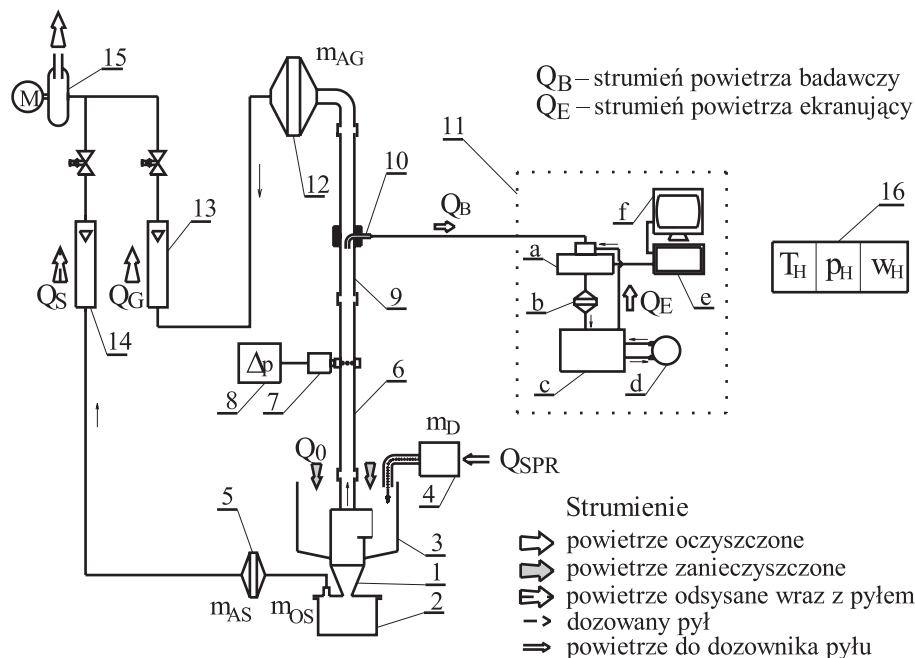
Dotychczasową cylindryczną rurkę wylotową o średnicy wewnętrznej d_w zastąpiono przez rurkę o kształcie ściętego stożka, którego mniejsza średnica równa się wewnętrznej średnicy rurki wylotowej $d_w = 23$ mm. Stożkową rurkę wylotową wykonano jako dyfuzor o kącie rozwarcia $\alpha_s = 7^\circ$. Dla tej wartości kąta nie następuje odrywanie strumienia od ścianek ani powstawanie wirów, a współczynnik oporów przepływu ξ ma wartość najmniejszą.

5. Metodyka i warunki badań

Badania cyklonów przeprowadzono na specjalnie zbudowanym stanowisku (rys. 13), które umożliwia wykonywanie charakterystyk skuteczności odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$, oporu przepływu $\Delta p_C = f(Q_G)$ dla strumienia powietrza do $85 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,0305 \text{ kg/s}$), przy stopniu efektywnego odsysania do 20% i stężeniu zapylenia do 3 g/m^3 .

Stanowisko wyposażone było w licznik cząstek, umożliwiający określenie liczby i rozmiarów ziaren pyłu w strumieniu powietrza za cyklonem z zakresu $0,7\text{--}100 \text{ }\mu\text{m}$, w $i = 32$ przedziałach pomiarowych, ograniczonych średnicami ($d_{zi \text{ min}} \div d_{zi \text{ max}}$). Szerokości przedziałów pomiarowych można było zaprogramować dowolnie. Sensor urządzenia przystosowany jest do pracy przy maksymalnej koncentracji cząstek zanieczyszczeń w powietrzu do 1000 szt/ml , co odpowiada masowemu stężeniu zapylenia powietrza $s \approx 0,25 \text{ g/m}^3$.

Przewód pomiarowy zakończony był filtrem absolutnym, który zabezpieczał przed przedostawaniem się pyłu do rotametu. Jednocześnie jest on filtrem służącym do wyznaczenia masy pyłu m_{AG} przepływającego przez cyklon i w konse-



Rys. 13. Schemat stanowiska badawczego cyklonów: 1 – cyklon; 2 – osadnik pyłu; 3 – komora pyłowa; 4 – dozownik pyłu; 5 – filtr absolutny przewodu odsysania pyłu; 6 – przewód pomiarowy oporu przepływu cyklonu; 7 – czujnik ciśnienia CL1A; 8 – przetwornik ciśnienia oraz panel odczytowy CL 134/24V; 9 – przewód pomiarowy z sondą licznika cząstek; 10 – sonda pomiarowa; 11 – licznik cząstek; 12 – filtr absolutny przewodu głównego; 13, 14 – rotametry pomiaru strumienia głównego i odsysania; 15 – wentylator ssawny; 16 – zestaw do pomiaru ciśnienia, temperatury i wilgotności względnej powietrza

kwencji do określenia skuteczności odpylania φ_C cyklonu. Badania cyklonów przeprowadzono w zakresie strumienia powietrza $Q_{G\min} \div Q_{G\max}$ wynikającego z liczby cyklonów stosowanych w multicyklonie filtra powietrza czołgu T-72 i zapotrzebowania powietrza $Q_G = 1200 \div 3400 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,42 \div 1,21 \text{ kg/s}$) w zakresie prędkości obrotowej $n_{\min} \div n_N$ przez silnik czołgu.

Czas trwania jednego pomiaru (czas równomiernego dozowania i rozprzadzania pyłu testowego przy stężeniu zapylenia powietrza $s = 1 \text{ g/m}^3$) przyjęto $t_{pom} = 3 \text{ min}$. Stosowano pył testowy PTC-D, będący krajowym zamiennikiem pyłu AC-fine.

Skuteczność odpylania φ_C i opór przepływu Δp_C cyklonu określano kolejno dla ustalonych wartości strumienia powietrza z zakresu $Q_G = 6 \div 34 \text{ m}^3/\text{h}$ (w równych odstępach co $4 \text{ m}^3/\text{h}$) i dla odpowiadających im wartościom strumieni odsysania Q_S dla przyjętego stopnia efekcyjnego odsysania pyłu z osadnika cyklonu $m_0 = 8\%$.

Dla każdego punktu pomiarowego $p = I, II, III \dots k$, poczynając od $Q_G = 6 \text{ m}^3/\text{h}$, wykonywano kolejno $j = 5$ pomiarów, obliczając dla każdego pomiaru skuteczność odpylania φ_{Cj} cyklonu z zależności:

$$\varphi_{Cj} = \frac{m_{ZCj}}{m_{Dj}} \cdot 100\% = \frac{(m'_{Dj} - m''_{Dj}) - (m''_{ZGj} - m'_{ZGj})}{m'_{Dj} - m''_{Dj}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

gdzie: m'_{Dj}, m'_{ZGj} — masa pojemnika dozownika pyłu i masa wkładu filtru absolutnego przed pomiarem; m''_{Dj}, m''_{ZGj} — masa pojemnika dozownika pyłu i masa wkładu filtru absolutnego po pomiarze.

W odległości $6d_w$ od płaszczyzny czołowej kadłuba cyklonu (gdzie d_w — średnica wewnętrzna przewodu wylotowego cyklonu) odczytywano z panelu przetwornika ciśnienia wartość Δp_{Sj} w kPa, a następnie określano wartość oporu przepływu Δp_C cyklonu, wykorzystując zależność:

$$\Delta p_{Cj} = \Delta p_{Sj} - \rho_0 \frac{v_w^2}{2 \cdot 1000}, \quad (3)$$

gdzie: v_w [m/s] — prędkość powietrza w przewodzie wylotowym za cyklonem.

Stężenie zapylenia powietrza w czasie każdego pomiaru obliczano, wykorzystując zależność:

$$s_j = \frac{m_{Dj}}{Q_{0j} \cdot t_{pom}} = \frac{m_{Dj}}{(Q_{Gj} + Q_{Sj}) \cdot t_{pom}}, \quad (4)$$

gdzie: t_{pom} — czas, w którym masę pyłu m_{Dj} dozowano równomiernie do strumienia powietrza wlotowego cyklonu Q_0 .

Po wykonaniu cyklu $n = 5$ pomiarów w danym punkcie pomiarowym p , obliczano średnią wartość skuteczności odpylania, oporu przepływu i stężenia zapylenia powietrza.

W trakcie trwania pomiaru, w chwili $t_{cz} = 1/2 t_{pom}$, uruchamiano w liczniku cząstek procedurę pomiaru liczby i rozmiarów ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem. Obliczano udział Up_i ziaren pyłu z każdego przedziału pomiarowego ($d_{zi \min} \div d_{zi \max}$) w całkowitej liczbie ziaren pyłu ze wszystkich przedziałów pomiarowych i :

$$Up_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^{32} N_i}. \quad (5)$$

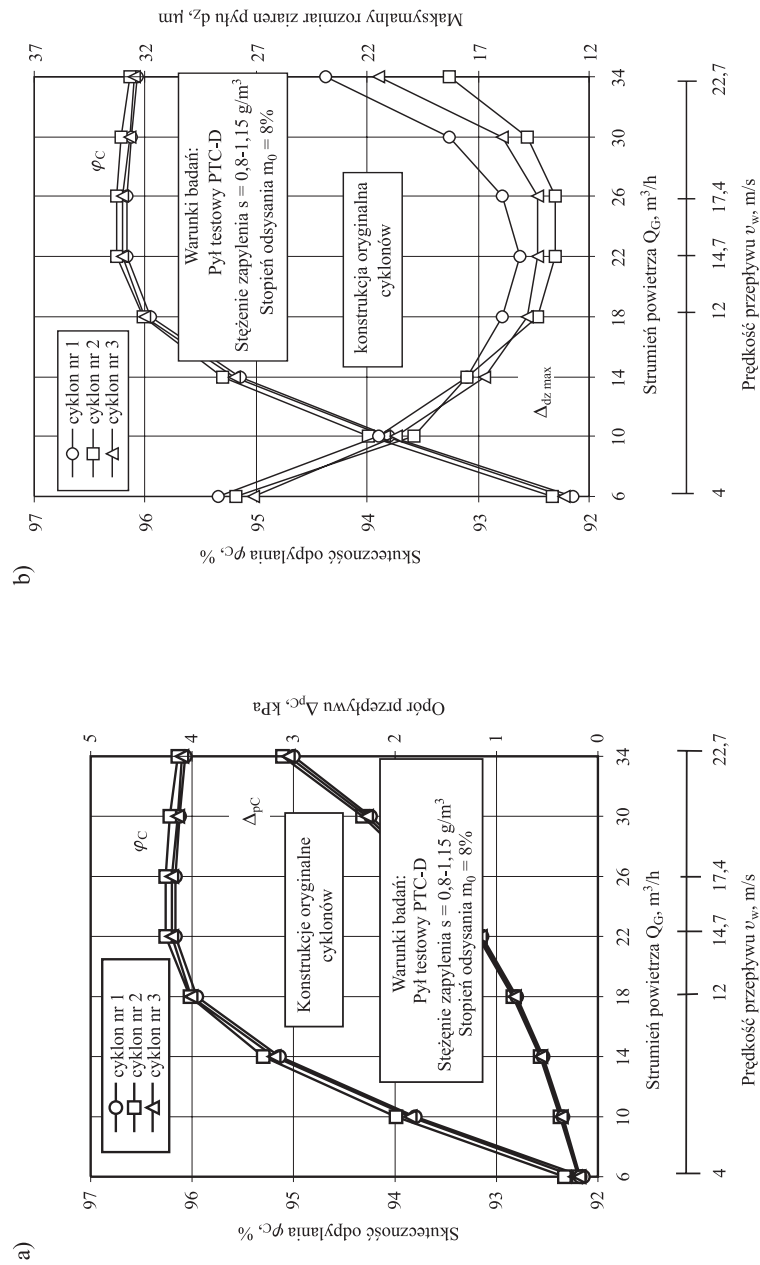
Badania eksperymentalne cyklonów obejmowały określenie charakterystyk skuteczności odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$ i oporów przepływu $\Delta p_C = f(Q_G)$ oraz dokładności odpylania (pomiar liczby i rozmiarów ziaren pyłu w strumieniu powietrza Q_G) trzech egzemplarzy cyklonów D-40: w wersji oryginalnej — I etap, po modyfikacji konstrukcji — II etap

6. Analiza wyników badań

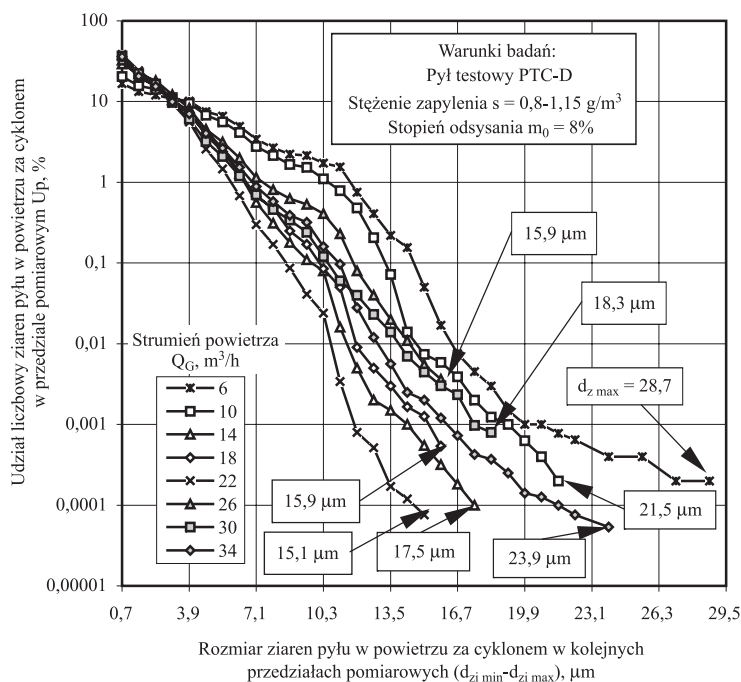
Charakterystyki skuteczności odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$ (rys. 14a) trzech (nr 1, 2, 3) egzemplarzy cyklonów D-40 o konstrukcji oryginalnej różnią się nieznacznie co do wartości, a ich przebieg jest podobny i zgodny z informacjami podawanymi przez wielu autorów prac badawczych oraz innymi badaniami autora. Wraz ze wzrostem wartości strumienia powietrza w zakresie $Q_G = 6 \div 18 \text{ m}^3/\text{h}$ (co odpowiada prędkości przepływu $v_w = 4 \div 12 \text{ m/s}$), skuteczności odpylania φ_C badanych cyklonów gwałtownie rosną. Dalszy wzrost strumienia powietrza Q_G (prędkości przepływu) powoduje nieznaczny wzrost skuteczności odpylania φ_C , a w końcowej fazie pracy cyklonu zauważa się niewielki jej spadek. Maksymalną wartość skuteczności odpylania $\varphi_{C \max} \approx 96,2\%$ cyklony uzyskują dla wartości strumienia $Q_G = 22 \div 26 \text{ m}^3/\text{h}$. Taki przebieg zmian skuteczności odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$ jest głównie rezultatem wzajemnych relacji sił bezwładności P_d , działających na ziarno pyłu i sił aerodynamicznych P_R oddziaływania strumienia gazu. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza przepływającego przez cyklon (prędkości przepływu), wartości obu sił są coraz większe, przy czym dla wyższych wartości strumienia (w badanym cyklonie po przekroczeniu $Q_G = 18 \text{ m}^3/\text{h}$) przyrost siły aerodynamicznej P_R zaczyna być szybszy niż siły bezwładności P_d , co powoduje wyhamowanie ruchu ziaren. Może nastąpić ich wtórne porywanie przez strumień (wir) powietrza wylotowego z cyklonu. W konsekwencji następuje spadek skuteczności odpylania cyklonu.

Niezależnie od ustalonej wartości strumienia Q_G , liczba ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem (wraz ze wzrostem ich rozmiarów) jest coraz mniejsza, aż do ich całkowitego zaniku. Tym samym, udziały liczbowe Up ziaren pyłu z poszczególnych przedziałów pomiarowych Δd_z są coraz mniejsze (rys. 15). W ostatnim przedziale pomiarowym znajduje się najczęściej jedno ziarno pyłu, mające największy rozmiar $d_z = d_{z \max}$. Podobne wyniki badań uzyskał autor pracy [15], badając cyklon zwrotny z wlotem stycznym o średnicy $D = 31,1 \text{ mm}$ w zakresie strumienia powietrza $Q_G = 30,24 \div 66,24 \text{ m}^3/\text{h}$ przy zastosowaniu pyłu testowego o gęstości $\rho_{zp} = 0,98 \text{ g/cm}^3$.

W przedstawionych na rysunku 14b wynikach widać wyraźną zależność między skutecznością odpylania φ_C oraz rozmiarami $d_{z \max}$ ziaren pyłu, znajdujących się w powietrzu za cyklonami D-40 o konstrukcji oryginalnej. Wzrost wartości strumienia powietrza (prędkości przepływu) w zakresie $Q_G = 6 \div 22 \text{ m}^3/\text{h}$, powoduje,



Rys. 14. Charakterystyki cyklonów D-40 o konstrukcji oryginalnej; a) skuteczność odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$ i opory przepływu $\Delta p_C = f(Q_G)$; b) rozmiary ziaren pyłu $d_{z, \max} = f(Q_G)$



Rys. 15. Udział liczbowy ziaren pyłu w powietrzu za badanym cyklonem D-40 (nr 1) dla różnych wartości strumienia powietrza Q_G

że w powietrzu za cyklonem znajdują się ziarna pyłu o coraz mniejszych rozmiarach, co tłumaczy wzrost skuteczności odpylania φ_C cyklonów w tym zakresie.

Dla $Q_G = 6 \text{ m}^3/\text{h}$ wartości rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu $d_{z \text{ max}}$ są największe i zawierają się w zakresie $d_{z \text{ max}} = 27,1 \div 28,7 \text{ }\mu\text{m}$, a dla $Q_G = 22 \text{ m}^3/\text{h}$ — najmniejsze i przyjmują wartości $d_{z \text{ max}} = 13,5 \div 15,1 \text{ }\mu\text{m}$. Przy dalszym wzroście prędkości przepływu w cyklonie, obserwuje się zjawisko wzrostu rozmiarów maksymalnych ziaren pyłu $d_{z \text{ max}}$ w strumieniu powietrza wylotowego przy nieznacznym spadku skuteczności odpylania φ_C cyklonów. W strumieniu powietrza $Q_G = 34 \text{ m}^3/\text{h}$ znajdują się ziarna pyłu o maksymalnych rozmiarach $d_{z \text{ max}} = 18,3 \div 23,9 \text{ }\mu\text{m}$.

Pojawienie się dużych ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem przy wyższych wartościach strumienia powietrza może być spowodowane tym, że ziarna pyłu uderzając z dużą prędkością o ściankę cyklonu, odbijają się od niej, po czym są ponownie porywane przez strumień powietrza i unoszone do wylotu cyklonu. Są to pojedyncze ziarna, ale o dużych rozmiarach i masie. Dlatego ziarno pyłu o największym rozmiarze $d_z = d_{z \text{ max}}$, znajdujące się w powietrzu za cyklonem, przyjęto jako kryterium oceny dokładności odpylania powietrza w cyklonie.

Teoretycznie, w powietrzu za cyklonem przy ustalonych warunkach przepływu (stała wartość strumienia Q_G) powinny znajdować się tylko ziarna pyłu poniżej pewnego rozmiaru granicznego d_{zgr} , którego wartość można określić z zależności podanej w pracy [8] i zmodyfikowanej przez autora:

$$d_{zgr} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{A_0}{A_w} \frac{D}{v_0} \left(\frac{D}{d_w}\right)^{-(2m+1)} \left(\frac{h_w}{d_w}\right)^{-1} \frac{\mu_g}{\rho_{zp}}}, \quad (6)$$

gdzie: m — wykładnik potęgowy równania zawierający się w zakresie $0,5 \div 0,9$; μ_g — lepkość gazu; ρ_{zp} — gęstość ziaren pyłu.

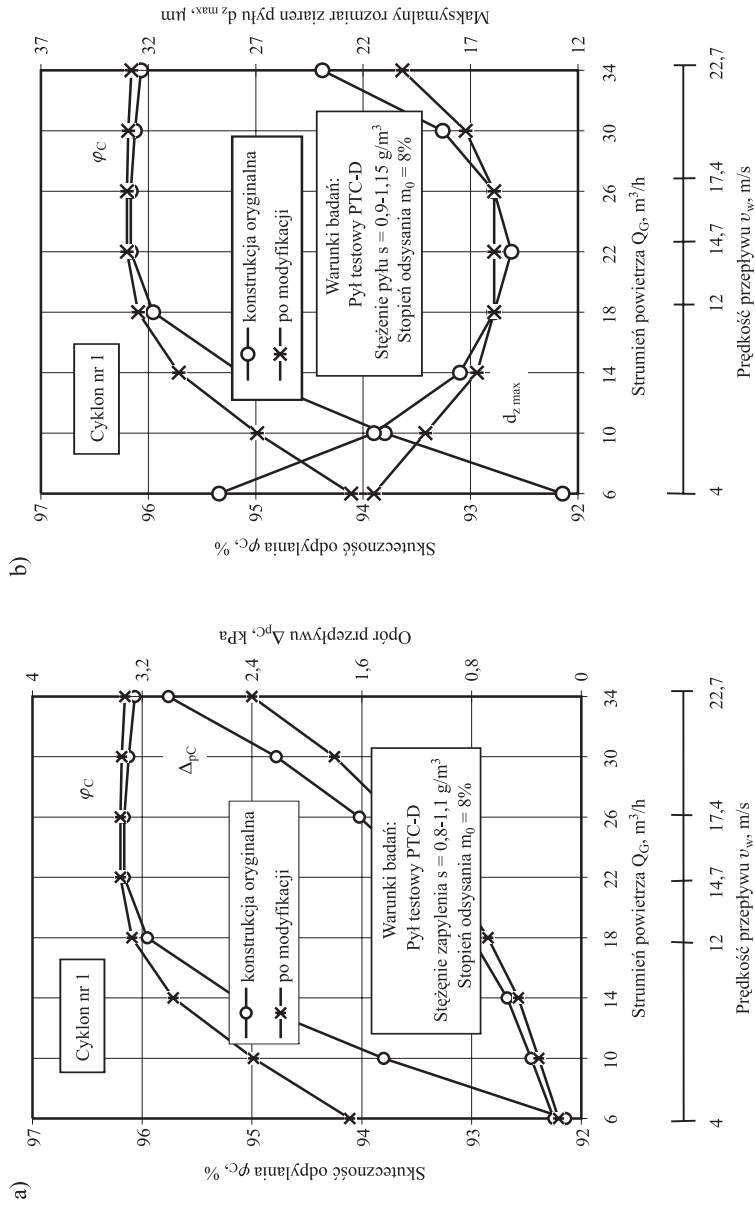
W przypadku badanego cyklonu, obliczone dla podstawowych składników pyłu (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) rozmiary ziaren granicznych d_{zgr} przyjmują wartości przedstawione w tabeli 1:

TABELA 1
Wyniki obliczeń rozmiaru granicznego d_{zgr} ziaren pyłu

Q_G m ³ /h	v_0 m/s	d_{zgr} , μm		
		SiO_2 $\rho_{zp} = 2,65 \text{ g/cm}^3$	Al_2O_3 $\rho_{zp} = 3,99 \text{ g/cm}^3$	Fe_2O_3 $\rho_{zp} = 5,24 \text{ g/cm}^3$
6	5,65	2,23	1,85	1,59
22	20,6	1,16	0,96	0,84
34	31,8	0,94	0,79	0,68

Obliczone rozmiary d_{zgr} różnią się nieznacznie między sobą i przyjmują bardzo małe wartości ($2,23 \div 0,68 \mu\text{m}$), znacznie mniejsze niż rozmiary ziaren pyłu $d_{z \max}$ zarejestrowane w powietrzu za badanym cyklonem. Wraz ze wzrostem strumienia powietrza przepływającego przez cyklon Q_G oraz gęstości ziaren pyłu, rozmiary d_{zgr} przyjmują coraz mniejsze wartości, co zgodne jest z ogólną teorią działania cyklonów.

Z badań cyklonów wynika, że brak jest wyraźnej granicy (wartości rozmiaru ziarna granicznego d_{zgr}), powyżej której wszystkie ziarna pyłu będą zatrzymane w cyklonie. Wynika to z tego, że użyty do badań pył testowy PTC-D, będący odwzorowaniem pyłu drogowego, jest pyłem polidispersyjnym o zróżnicowanym składzie chemicznym. W związku z tym, ziarna pyłu charakteryzują się różnymi rozmiarami (do $d_z = 80 \mu\text{m}$), zróżnicowanym kształtem, innym niż kulisty i różną gęstością (tab. 1). Dlatego ziarna pyłu o tych samych rozmiarach (mające tę samą objętość), mają różną masę, która decyduje o sile bezwładności. Szczególnie niekorzystna relacja sił P_R i P_d zachodzi dla ziaren pyłu o małej masie i dużej objętości, a więc małej gęstości. Przy założeniu braku wpływu kształtu



Rys. 16. Charakterystyki cyklonu nr 1 o konstrukcji oryginalnej i po modyfikacji konstrukcji: a) skuteczność odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$ i opory przepływu $\Delta p_C = f(Q_G)$; b) skuteczność odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$ i wartości maksymalnych rozmiarów ziaren pyłu $d_{z,max} = f(Q_G)$

ziaren na siłę oporu ośrodka P_R skuteczniej odseparowane w cyklonie będą więc ziarna mające większą gęstość np. tlenek żelaza czy korund.

Charakterystyki skuteczności i dokładności odpylania oraz oporów przepływu cyklonu nr 1 o konstrukcji oryginalnej i po wykonanej modyfikacji konstrukcji przedstawiono na rysunku 16. Uzyskano wzrost skuteczności odpylania głównie w zakresie małych wartości strumienia powietrza, co spowodowane zostało tym, że niesymetryczny wlot zapewnił uzyskanie w jego przekroju takiego rozkładu ziaren pyłu, w którym podstawowa masa została zgromadzona przy ścianke zewnętrznej części cylindrycznej cyklonu. Przemieszczanie się ziaren pyłu ku ściankom powoduje wzrost stężenia pyłu w ich sąsiedztwie. W wyniku zderzeń ziaren ze sobą, przy ściankach cyklonu może dochodzić do koagulacji pyłu, co w rezultacie zwiększa wpływ działania sił masowych i przyspiesza wydzielanie pyłu szczególnie ziaren o małych rozmiarach. Wzrost skuteczności odpylania cyklonu mógł być spowodowany także wzrostem prędkości aerozolu w przewężeniu z (rys. 12a), powstałym po wykonaniu opływowego pierścienia na zewnętrznej powierzchni rurki wylotowej. W wyniku tego ziarna pyłu mniejszych rozmiarów i o mniejszej masie uzyskały prędkość i siłę bezwładności warunkującą odseparowanie ich z powietrza.

Znaczny, około 30%, spadek oporów przepływu cyklonu w stosunku do konstrukcji oryginalnej wynika ze zmniejszenia (z $v_w = 22,7$ m/s do $v_{w1} = 14$ m/s dla $Q_G = 34$ m³/h) prędkości wylotowej v_w cyklonu na skutek zamiany cylindrycznej rurki wylotowej na stożkową.

Modyfikacja cyklonu spowodowała wzrost skuteczności frakcyjnej cyklonu, co uwidoczniło się zmniejszeniem udziału maksymalnych rozmiarów $d_{z\max}$ ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem w zakresie minimalnych i maksymalnych wartości strumienia powietrza przepływającego Q_G przez cyklon.

Dla pozostałych dwóch egzemplarzy cyklonów D-40 (nr 2 i nr 3) ta sama modyfikacja konstrukcji w spowodowała podobne jak w cyklonie nr 1 zmiany, co do przebiegu charakterystyk skuteczności odpylania $\varphi_C = f(Q_G)$ i oporu przepływu $\Delta p_C = f(Q_G)$ oraz dokładności odpylania $d_{z\max} = f(Q_G)$.

Z wyników badań przedstawionych na rysunkach 14÷16 wynika, że cyklon D-40 powinien pracować w wąskim zakresie zmian strumienia powietrza $Q_G = 18 \div 26$ m³/h, wynikającym z maksymalnej skuteczności filtracji i minimalnej koncentracji ziaren pyłu dużych rozmiarów. Poszerzenie tego zakresu spowoduje pracę cyklonu przy niższej skuteczności i mniejszej dokładności odpylania, co zwiększy masę pyłu zatrzymywanego na drugim stopniu filtracji, a tym samym spowoduje przyspieszony wzrost jego oporów przepływu.

7. Wnioski

1. Mimo że istnieje wiele konstrukcyjnych możliwości zwiększenia efektywności działania cyklonów, to nie wszystkie z nich mogą być stosowane. Niektóre rozwiązania (rys. 2, 3, 9 i 10) mogą okazać się zbyt skomplikowane w wykonaniu, a efekt w postaci wzrostu skuteczności odpylania lub spadku oporów przepływu może być niewspółmiernie mały w stosunku do poniesionych kosztów.
2. Do modyfikacji cyklonów będących elementami multicyklonu filtru powietrza pojazdu mechanicznego mogą być wykorzystane praktycznie następujące rozwiązania: zmiana kształtu króćca wlotowego — zastąpienie wlotu symetrycznego wlotem niesymetrycznym (rys. 5), zmiana ukształtowania przewodu wylotowego (rurki wylotowej) z cylindrycznego na stożkowy (rys. 6b i 7b), wprowadzenie opływowego kształtu otworu wlotowego przewodu wylotowego (rys. 6c) lub zastosowanie stożka w otworze wysypowym pyłu.
3. Skuteczność odpylania badanych cyklonów (zwrotnych z wlotem stycznym) w odniesieniu do polidispersyjnego pyłu o rozmiarach ziaren do d_z rośnie wraz ze wzrostem prędkości przepływu u (strumienia powietrza Q_G) aż do osiągnięcia wartości $\varphi_{C \max} \approx 96,2\%$, a następnie nieznacznie maleje (rys. 14). Taki charakter przebiegu $\varphi_C = f(v)$ oraz wartości uzyskanych skuteczności zgodne są z informacjami podawanymi w literaturze przez autorów prac badawczych [7, 8, 11, 16], a także z innymi wynikami badań autora [5].
4. Dla ustalonych warunków przepływu (Q_G) liczba ziaren pyłu w powietrzu za cyklonem systematycznie maleje wraz ze wzrostem ich rozmiaru, aż do ich całkowitego zaniku (rys. 15). W ostatnim przedziale pomiarowym znajduje się najczęściej jedno ziarno pyłu o maksymalnym rozmiarze $d_z = d_{z \max}$. Brak jest wyraźnego rozdziału (na granicy ziarna granicznego d_{zgr}) między zianami pyłu zatrzymywanymi przez cyklon i opuszczającymi cyklon wraz z powietrzem. Przyczyną tego zjawiska są: polidispersyjność pyłu, jego właściwości chemiczne oraz kształt ziaren pyłu.
5. Dla strumienia powietrza odpowiadającego maksymalnej $\varphi_{C \max}$ wartości skuteczności odpylania cyklonów, rozmiary maksymalnych ziaren pyłu znajdujących się w powietrzu za cyklonem (nieodseparowanych w cyklonie) osiągają wartości najmniejsze w zakresie $d_{z \max} = 13,5 \div 15,1 \mu\text{m}$ (rys. 16), co wskazuje na przedział strumienia powietrza i prędkości, w jakim powinna odbywać się praca tego cyklonu.
6. Modyfikacja konstrukcji cyklonów nie powoduje zmian zasadniczych charakterystyk φ_C i Δp_C . Efektem przeprowadzonych modyfikacji konstrukcji cyklonów jest przede wszystkim znaczny 30% spadek oporów przepływu w całym zakresie badanego strumienia Q_G i około 2% wzrost skuteczności odpylania φ_C w zakresie najmniejszych wartości strumienia powietrza Q_G

oraz wyraźne zmniejszenie rozmiarów maksymalnych $d_{z \max}$ ziaren pyłu dla skrajnych ($Q_G = 6 \text{ m}^3/\text{h}$ i $Q_G = 34 \text{ m}^3/\text{h}$) wartości strumienia — rys. 16.

7. Możliwa jest poprawa efektywności pracy cyklonu (bez ingerencji w jego wymiary główne) w zakresie zmniejszenia oporów przepływu lub zwiększenia skuteczności odpylania.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.01.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w marcu 2006 r.

LITERATURA

- [1] K. BACZEWSKI, M. HEBDA, *Filtracja płynów eksploatacyjnych*, MCNEMT, Radom, 1991/92.
- [2] CENRTISEP AIR CLEANER, Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA 2004.
- [3] M. DURST, G. KLEIN, N. MOSER, *Filtration in Fahrzeugen*, Materiały informacyjne firmy Mann+Hummel GMBH, Ludwigsburg, Niemcy 2005.
- [4] P. DZIERŻANOWSKI, W. KORDZIŃSKI, J. OTYŚ, S. SZCZECIŃSKI, R. WIATREK, *Napędy lotnicze. Turbinowe silniki śmigłowe i śmigłowcowe*, WKŁ, Warszawa, 1985.
- [5] T. DZIUBAK, *Badania eksperymentalne minicyklonu zwrotnego z wlotem stycznym*, Biul. WAT, 44, 3/4, 1995.
- [6] T. DZIUBAK, *Problemy filtracji powietrza w silnikach spalinowych pojazdów eksploatowanych w warunkach dużego zapylenia powietrza*, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, z. 4 (124), 2000.
- [7] A. C. HOFFMANN, H. ARENDS, H. SIE, *An Experimental Investigation Elucidating the Nature of the Effect of Solids Loading on Cyclone Performance*, Filtration & Separation, vol. 28, no 3, 1991.
- [8] J. JUDA, *Pomiary zapylenia i technika odpylania*, WNT, Warszawa, 1968.
- [9] Y. JO, CH. TIEN, M. B. RAY, *Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclones*, Powder Technology, vol. 113, no 1-2, 2000.
- [10] CH. H. JUNG, R. B. XIANG, M. C. KIM, K. S. LIM, K. W. LEE, *Performance evaluation of a cyclone with granular packed beds*, Journal of Aerosol Science, vol. 35, no 12, 2004.
- [11] P. KABSCH, *Odpylanie i odpylacze*, WNT, Warszawa, 1992.
- [12] K. S. LIM, H. S. KIM, K. W. LEE, *Characteristics of the collection efficiency for a cyclone with different vortex finder shapes*, Journal Aerosol Science, vol. 35, no 6, 2004.
- [13] K. S. LIM, S. B. KWON, K. W. LEE, *Characteristics of the collection efficiency for a double cyclone with clean air inlet*, Journal Aerosol Science, vol. 34, no 8, 2003.
- [14] P. SWIFT, *An Empirical Approach to Cyclone Design and Application*, Filtration & Separation, vol. 23, no 1, 1986.
- [15] L. MA, D. B. INGHAM, X. WEN, *Numerical modelling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones*, Journal of Aerosol Science, vol. 31, no 9, 2000.
- [16] J. WARYCH, *Oczyszczanie gazów — procesy i aparatura*, WNT, Warszawa, 1998.
- [17] H. YOSHIDA, K. ONO, K. FUKUI, *The effect of a new method of fluid flow control on submicron particle classification in gas-cyclones*, Powder Technology, vol. 149, no 2-3, 2005.
- [18] B. ZHAO, H. SHEN, Y. KANG, *Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance*, Powder Technology, vol. 145, no 1, 2004.
- [19] Y. ZHU, M. C. KIM, K. W. LEE, Y. O. PARK, M. R. KUHLMAN, *Design and Performance Evaluation of a Novel Double Cyclone*, Aerosol Science and Technology, vol. 34, no 4, 2001.

T. DZIUBAK

Modification of returnable cyclone with a tangent inlet construction

Abstract. Influence of main dimensions of returnable cyclone with tangent inlet on air purification efficiency is presented. There are given some examples of cyclones construction modifications. The assessment of their applications in cyclones of motor vehicle air filter was carried out. It was made through modification of construction of D-40 air filter cyclone of terrain vehicle. Experimental assessment of influence of cyclone constructional changes on characteristics of purification efficiency and flow drag was done. The size and number of dust particles in after-cyclone air were determined before and after is modifications using particles counter.

Keywords: air filter, cyclones, air purification efficiency, flow drag, dust particles size, particles counter

Universal Decimal Classification: 621.432.001.5

