

A study on the improvement of uniformity of dust extraction from multicyclone dust collectors

The paper presents a possible improvement of uniformity of dust extraction from individual cyclones of a multi-cyclone air filter with modifications of the dust collector design. The suggested dust collector model is divided into segments, with insulated extraction ducts, assigned to a specific number of individual cyclones. The concept of the division into extraction ducts and segments is presented based on the air filter multicyclone of a special tracked vehicle. A physical and mathematical model of the dust collector segment is presented, and the heights of individual extraction ducts are calculated.

Key words: *internal combustion engine, air filtration, multicyclone, dust collector, extraction rate, extraction uniformity, extraction efficiency*

Analiza możliwości poprawy równomierności odsysania pyłu z odpylacza multicyklonowego

W artykule przedstawiono możliwość poprawy równomierności odsysania pyłu z pojedynczych cyklonów multicyklonowego filtra powietrza, polegającą na zmianie formy konstrukcyjnej osadnika pyłu. Zaproponowano model osadnika pyłu podzielonego na segmenty mające odizolowane od siebie kanały odsysania, którym przyporządkowano określoną liczbę cyklonów. Ideę podziału na segmenty i kanały odsysania przedstawiono na przykładzie multicyklonu filtra powietrza gąsienicowego pojazdu specjalnego. Przedstawiono model fizyczny i matematyczny konstrukcji segmentu osadnika pyłu. Wykonano obliczenia wysokości kanałów odsysania.

Słowa kluczowe: *silniki spalinowe, filtracja powietrza, multicyklon, osadnik pyłu, stopień odsysania, równomierność odsysania, skuteczność odpylania*

1. Introduction

Engine intake systems of many off-road vehicles and machines operated in high air dustiness ($> 1 \text{ g/m}^3$) are fitted with two-stage filters, where the first air filtration stage includes a multi-cyclone. Multi-cyclones include several to a few dozen filter elements (cyclones) in parallel and are mainly used in intake air filters of tank engines (domestic: PT-91, T-72, and T-55AM and foreign: Leopard 2 and Abrams), trucks (Volvo, Scania), off-road trucks (Star 266) and machines (Bizon harvester). The dust separated by individual cyclones is collected in a common receptacle (dust collector) and removed, most often in a constant extraction process.

Dust extraction from a cyclone dust collector significantly improves the dust extraction efficiency. As results from available studies, multi-cyclone performance as a unit at the same flow parameters and suction rates are considerably inferior to the total performance of individual cyclones. Many years of experience have shown that the simplest solution to remove the dust from a multi-cyclone dust collector to a single, common receptacle, where the stream is extracted via a single port, results in a significant reduction of dust collector efficiency, even by 10% compared to a single cyclone [1, 2, 4, 5].

The reduction is due to backflow-caused non-uniform gas distribution between individual cyclones. The studies of ejector dust extracting systems from multicyclones in various air filters showed high variation in Q_{sc} stream values extracted from individual cyclones with a common dust collector [6, 9, and 10]. The conclusion is simple – an extraction system

1. Wstęp

Układy dolotowe silników napędowych wielu terenowych pojazdów mechanicznych, a także maszyn roboczych, eksploatowanych w warunkach dużego (powyżej 1 g/m^3) zapylenia powietrza wyposaża się w filtry dwustopniowe, w których pierwszym stopniu oczyszczania powietrza są multicyklony. Są to zazwyczaj zespoły składające się z kilku do kilkudziesięciu elementów filtracyjnych (cyklonów) połączonych równolegle. Multicyklony stosuje się głównie w filtrach powietrza wlotowego silników czołgowych (na przykład krajowych: PT-91, T-72, T-55AM i za granicą: Leopard 2 i Abrams), a także w samochodach ciężarowych (Volvo oraz Scania) i ciężarowo-terenowych (Star 266) oraz w maszynach roboczych (kombajn Bizon). Odseparowany w każdym z pojedynczych cyklonów pył jest gromadzony we wspólnym kolektorze (pojemniku), zwanym osadnikiem pyłu, skąd następnie jest usuwany najczęściej przez ciągłe odsysanie.

Zastosowanie odsysania pyłu z osadnika cyklonu powoduje zauważalny wzrost jego skuteczności odpylania. Z prac poświęconych temu problemowi wynika, że przy zachowaniu jednakowych kryteriów przepływu i tym samym stopniu odsysania, osiągi multicyklonu jako całości bywają jednak znacznie gorsze od osiągnięć pojedynczych cyklonów, z których jest on zbudowany. Liczne doświadczenia wykazały, że najprostsze rozwiązanie odprowadzania zanieczyszczeń z odpylacza multicyklonowego do jednego, wspólnego dla wszystkich cyklonów osadnika, z którego strumień odsysany jest jednym króćcem, powoduje wyraźny spadek

with common dust collector does not provide uniform extraction rate for each cyclone in a multi-cyclone, and more efficient solution is required.

2. The effect of multi-cyclone design on uniform dust extraction from individual cyclones

The dust is extracted by an air stream Q_s , a part of an intake air stream (contaminated) Q_0 to the multi-cyclone (Fig. 1).

$$Q_0 = Q_G + Q_s, \quad (1)$$

where: Q_G – engine intake filter outlet air stream.

As results from the analysis of available multicyclone and dust extraction systems designs, if a dust collector is common for several dozen cyclones, and the dust is extracted via one or two ports the following occurs [2, 4, 6, 10 and 13]:

- extracted stream values differ between individual cyclones,
- whirling streams from cyclones entering a common dust collector interact with each other,
- backflow in cyclones at the multi-cyclone perimeter is possible.

The analysis of the effect of the multicyclone and dust collector design on Q_{sc} stream values extracted from a single cyclone of a special vehicle air filter was conducted on three multi-cyclones under working names: T1, T2 and T3 [7].

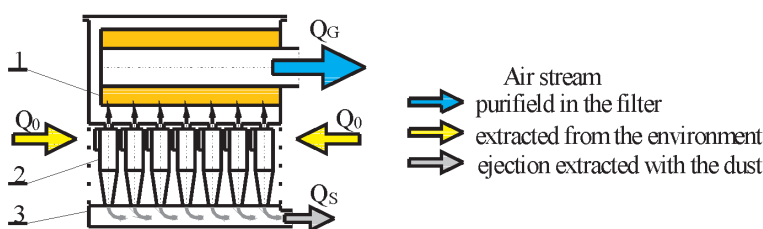


Fig. 1. Air stream flow in a two-stage filter with ejection dust extraction in a multicyclone – porous screen system

Rys. 1. Przepływ strumieni powietrza w filtrze dwustopniowym z efekcyjnym odsysaniem pyłu i działającym w systemie: multicyclon–przełota porowata

The general design of the engine air filter multi-cyclones selected for research (T1, T2 and T3) is similar. The cyclones, arranged in rows and columns are mounted on a rectangular plate (Fig. 2), which is the top wall of a dust collector. The T1 and T2 multicyclones are made of respectively 96 and 54 identical, vertically arranged D-40 cyclones (return with tangential inlet) with internal diameter $D = 40$ mm at the cylindrical section. The T3 multicyclone is made of 39, horizontally arranged return cyclones with tangential inlet with internal diameter $D = 35$ mm.

The tested multi-cyclones' dust collector is an empty chamber shaped like a flat cuboid. Dust is extracted via one (T3) or two (T1, T2) extraction ports at the front

skuteczności odpylacza, niekiedy o około 10% w stosunku do pojedynczego cyklonu [1, 2, 4, 5].

Przyczyną spadku efektywności odpylania multicyclonów jest, spowodowany zwrotnymi przepływami, nierównomierny rozdział gazu na poszczególne cyklony. Przeprowadzone badania eksperymentalne efekcyjnych układów odsysania pyłu z multicyclonu w różnych filtrach powietrza wykazały duże zróżnicowanie wartości strumieni odsysanych Q_{sc} z pojedynczych cyklonów, a mających wspólny osadnik pyłu [6, 9, 10]. Nasuwa się stąd prosty wniosek, że system odprowadzania zanieczyszczeń do jednego wspólnego osadnika nie zapewnia jednakowego stopnia odsysania z każdego cyklonu wchodzącego w skład multicyclonu. Wynika stąd konieczność poszukiwania doskonalszych rozwiązań sposobu odprowadzenia strumienia odsysania.

2. Wpływ konstrukcji multicyclonu na równomierność odsysania pyłu z pojedynczych cyklonów

Odsysanie pyłu odbywa się dzięki wytworzeniu strumienia powietrza Q_s , stanowiącego część strumienia powietrza wlotowego (zanieczyszczonego) Q_0 do multicyclonu (rys. 1) i wzór (1), gdzie: Q_G – strumień powietrza wylotowego z filtra wlotowego do silnika.

Z analizy dostępnych rozwiązań konstrukcyjnych multicyclonów i ich układów odsysania pyłu z osadnika wynika, że jeżeli osadnik pyłu obejmuje swym zasięgiem kilkadziesiąt cyklonów, a odsysanie pyłu z osadnika następuje dwoma lub jednym króćcem, to występuje wtedy [2, 4, 6, 10, 13]:

- zróżnicowanie wartości strumieni odsysania z poszczególnych cyklonów,
- wzajemne oddziaływanie zawirowanych strumieni wypływających z cyklonów i wpływających do wspólnej komory osadnika pyłu,
- możliwość przepływów zwrotnych w cyklonach umiejscowionych na obrzeżu multicyclonu.

Analizę wpływu konstrukcji multicyclonu i jego osadnika pyłu na wartości strumieni odsysanych Q_{sc} z pojedynczych cyklonów filtrów powietrza silników pojazdów specjalnych wykonano na trzech multicyclonach o roboczych nazwach T1, T2, T3 [7].

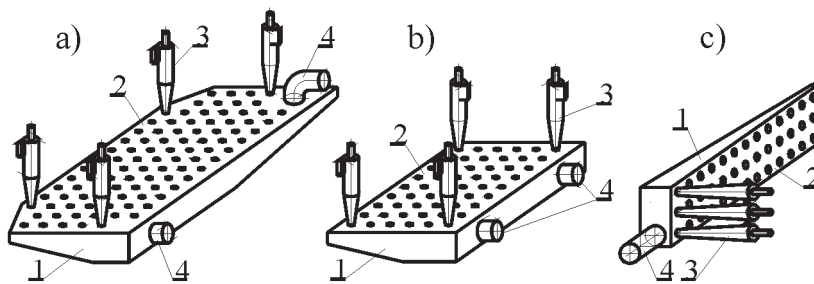


Fig. 2. Air filter multi-cyclone designs: a) T1 multicyclone, b) T2 multicyclone, c) T3 multicyclone, 1 – dust collector, 2 – cyclone mounting plate, 3 – cyclone, 4 – extraction port

Rys. 2. Konstrukcje multicyclonów filtrów powietrza: a) multicyclon T1, b) multicyclon T2, c) multicyclon T3, 1 – osadnik pyłu, 2 – płyta mocująca cyklony, 3 – cyklon, 4 – króćce odsysania

wall of the multi-cyclone dust collector (T2, T3) – Fig. 2. The cyclones are arranged in varying distances from the outlet extraction port. The last cyclone is 5 to 8 times farther from the outlet extraction port than the first cyclone, which affects the extraction stream value for the individual cyclones. This design of the dust collector and the dust extraction system results from limited space for air filter installation in a vehicle.

The Q_{SC} streams extracted from a single cyclone of the T1 multi-cyclone have different values (Fig. 3). Irrespective of the extracted Q_{SF} stream value, for cyclones with the extraction stream outlet situated near the extraction ports of the multicyclone dust collector the Q_{SC} values are the highest: $Q_{SC} = 2.5\text{--}5.95 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0.89\text{--}2.13 \text{ g/s}$) (Fig. 3). The Q_{SC} streams extracted from the middle cyclones of the tested row that are situated in a specific distance from the extraction

Ogólna konstrukcja wybranych do badań multicyklonów (T1, T2, T3) filtrów powietrza silników jest taka sama. Na prostokątnej płycie (rys. 2), będącej górną ścianą osadnika pyłu umocowane są cyklony, rozmieszczone w rzędach i kolumnach. Multicyklony T1, T2 zbudowane są z tych samych, pionowo ustawionych cyklonów D-40 (zwrótny z wlotem stycznym) o średnicy wewnętrznej części cylindrycznej $D = 40 \text{ mm}$, których liczba wynosi odpowiednio: 96 i 54. Multicyklon T3 zbudowany jest z 39. poziomo zamocowanych cyklonów zwrótnych z wlotem stycznym o średnicy wewnętrznej $D = 35 \text{ mm}$.

Osadnik pyłu badanych multicyklonów jest pustą wewnątrz komorą o kształcie zbliżonym do płaskiego prostopadłościanu. Odsysanie pyłu realizowane jest punktowo jednym (T3) lub dwoma (T1, T2) króćcami umieszczonymi na ścianie czołowej osadnika pyłu multicyklonu (T2, T3)

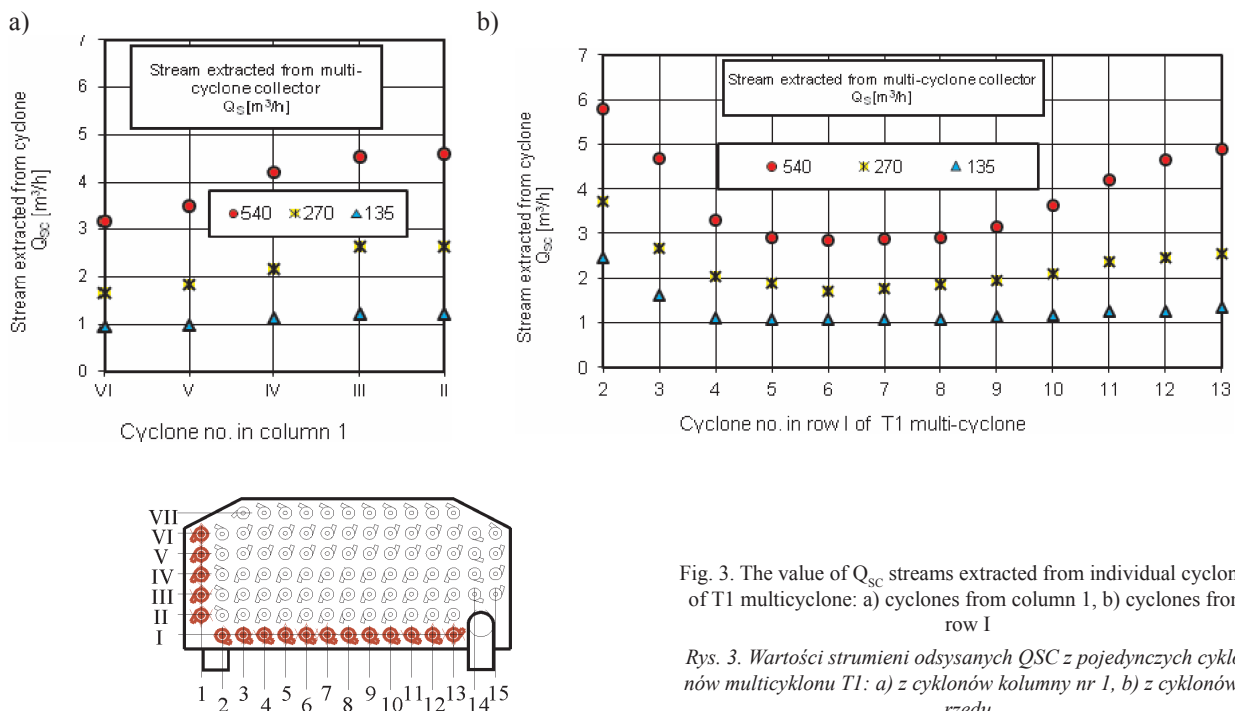


Fig. 3. The value of Q_{SC} streams extracted from individual cyclones of T1 multicyclone: a) cyclones from column 1, b) cyclones from row I

Rys. 3. Wartości strumieni odsysanych Q_{SC} z pojedynczych cyklonów multicyklonu T1: a) z cyklonów kolumny nr 1, b) z cyklonów I rzędu

ports are $Q_{SC} = 1.05\text{--}2.95 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0.38\text{--}1.06 \text{ g/s}$), these values are more than 50% lower.

With the increase of the distance from the front of the dust collector (extraction ports) to the rear wall of the multicyclone, a systematic decrease of the extracted Q_{SC} stream values is observed (Fig. 3a). In the last (VII) row of cyclones, the streams extracted from individual cyclones have half the value compared to the cyclones in the first (I) row of the multi-cyclone.

The results of identical tests carried out for the T2 and T3 multicyclones confirm that the highest Q_{SC} values occur, regardless of the main extraction Q_{SF} stream value, for the cyclones which are the nearest to the extraction port outlet of the multicyclone dust collector, and the value decreases systematically with the distance, affecting the dust extraction efficiency.

The main reason for extraction stream non-uniformity is

– rys. 2. Cyklony względem otworu wylotowego króćca odsysania są rozmieszczone w różnej odległości. Ostatni w rzędzie cyklon znajduje się w odległości 5 do 8 razy większej niż cyklon położony najbliżej otworu wylotowego króćca odsysania. Ma to niewątpliwie wpływ na wartość strumienia odsysania z poszczególnych cyklonów. Takie rozwiązania konstrukcyjne osadników oraz układów odprowadzenia pyłu wynikają z ograniczonej przestrzeni przeznaczanej na zabudowę filtra powietrza w pojeździe.

Strumienie odsysane Q_{SC} z pojedynczych cyklonów multicyklonu T1 przyjmują bardzo różnicowane wartości (rys. 3). Niezależnie od wartości strumienia odsysania Q_{SF} dla cyklonów, których wylot strumienia odsysania znajduje się blisko króćców odsysania z osadnika multicyklonu, wartości Q_{SC} są największe i zawierają się w zakresie $Q_{SC} = 2,5\text{--}5,95 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,89\text{--}2,13 \text{ g/s}$). Strumienie Q_{SC} odsysane

the diversification of the flow resistance of the streams in the dust collector, at the cyclone – extraction port section for each cyclone. It is due to varying section lengths, determined by the position of the cyclone in relation to the extraction port and the effect of the collector walls on the streams extracted from the cyclones adjacent to the walls, and also the whirls in the total stream extracted from the collector.

3. Possible designs for the dust extraction process for a multicyclone dust collector

Three basic methods to obtain a uniform stream extracted from individual cyclones are available [4, 8, 11, 13]:

- maintaining position symmetry – the design of the collector shall maintain the symmetry of all cyclones in relation to the extraction port,
- creating uniform flow resistance of extracted streams by throttling the flow for the cyclones in which the flow resistance is higher in comparison to the other cyclones,
- combined method – a combination of both methods.

The only method of maintaining the symmetry of the position of the cyclones is if they are arranged on the circumference of a circle. This results in unused area being left in the centre the size of which depends on the number of cyclones used. Fig. 4 Since no extra space is usually available in the engine compartment, this design of the dust collector is impractical.

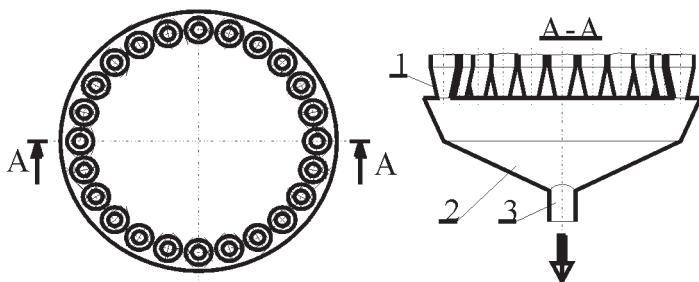


Fig. 4. Diagram of a dust collector with symmetrical position of all cyclones in relation to the extraction port: 1 – cyclone, 2 – collector, 3 – extraction line port
 Rys. 4. Schemat osadnika z zachowaniem symetrii położenia wszystkich cyklonów w odniesieniu do króćca odsysania: 1 – cyklon, 2 – osadnik, 3 – króćciec przewodu odsysania

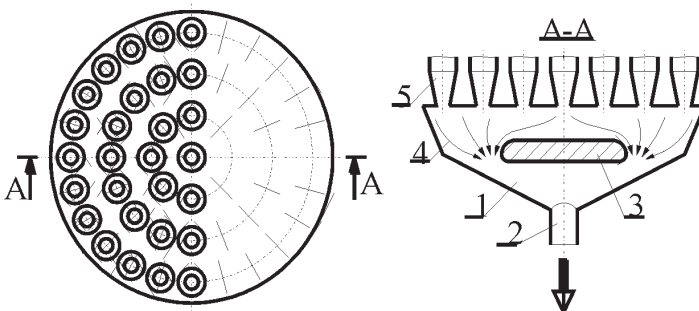


Fig. 5. Dust collector with an intermediate inlet: 1 – collector, 2 – extraction line port, 3 – deflector, 4 – stream lines, 5 – cyclone
 Rys. 5. Schemat osadnika z wlotem pośrednim do przewodu odsysania: 1 – osadnik, 2 – króćciec przewodu odsysania, 3 – przegroda (deflektor), 4 – linie prądu strumienia, 5 – cyklon

z cyklonów środkowych badanego rzędu, a znajdujących się w pewnym oddaleniu od króćców odsysania, przyjmują wartości w granicach $Q_{sc} = 1,05-2,95 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,38-1,06 \text{ g/s}$), a więc są o ponad 50% mniejsze.

Wraz z oddalaniem się położenia cyklonów od czoła osadnika pyłu (od króćców odsysania) ku tylnej ścianie multicyklonu, następuje systematyczny spadek wartości strumieni odsysanych Q_{sc} (rys. 3a). W ostatnim rzędzie (VII) cyklonów strumienie odsysane z pojedynczych cyklonów przyjmują wartości o połowę mniejsze niż w rzędzie pierwszym (I) multicyklonu.

Wyniki takich badań przeprowadzonych dla multicyklonu T2 i T3 potwierdzają zaobserwowane wcześniej zjawisko, że największe wartości Q_{sc} występują, niezależnie od wartości głównego strumienia odsysania Q_{SP} dla cyklonów znajdujących się najbliżej otworu wylotowego króćca odsysania osadnika pyłu multicyklonu, a wraz z oddalaniem się położenia cyklonów od tego miejsca następuje ich systematyczny spadek, co wpływa niewątpliwie na skuteczność odpylania cyklonów.

Zasadniczą przyczyną nierównomierności strumieni odsysających z cyklonów jest zróżnicowanie oporów przepływu tych strumieni w osadniku odpylacza, na odcinku cyklon – króćciec odsysania, dla poszczególnych cyklonów. Wynika ono przede wszystkim z niejednakowych długości wspomnianych odcinków, zdeterminowanych położeniem cyklonu względem króćca odsysania oraz oddziaływaniem ścian osadnika na strumienie odsysane z cyklonów położonych w ich pobliżu, a także ewentualnym występowaniem obszarów zawirowań w sumarycznym strumieniu odsysanym w osadniku.

3. Możliwości organizacji procesu odsysania pyłu z odpylaczy multicyklonowych

Można wyróżnić trzy podstawowe sposoby prowadzące do uzyskania względnej równomierności strumieni odsysanych z pojedynczych cyklonów [4, 8, 11, 13]:

- zachowanie symetrii położenia – sposób ten polega na wykonaniu konstrukcji osadnika, tak aby zachowana była symetria położenia wszystkich cyklonów w odniesieniu do króćca odsysania,
- wytworzenie jednakowych oporów przepływu strumieni odsysanych przez celowe, odpowiednio dobrane ich dławienie z tych cyklonów, dla których opory przepływu są mniejsze niż dla pozostałych,
- sposób kombinowany – będący odpowiednim konstrukcyjnym połączeniem obu wymienionych zabiegów.

Jedyną możliwością uzyskania symetrii położenia jest umieszczenie wszystkich cyklonów wzdłuż obwodu koła. To sprawia, że w środkowej części płyty pozostaje niewykorzystana powierzchnia, tym większa, im więcej cyklonów wchodzi w skład odpylacza – rys. 4. W komorach silnikowych pojazdów nie ma zwykle nadmiaru wolnej przestrzeni i stąd wynika mała praktyczna przydatność tego rodzaju budowy odpylacza.

Maintaining a uniform extraction stream flow resistance by throttling and directing the streams can be achieved with the following methods:

- an intermediate inlet to the extraction port in a multi-cyclone collector,
- collector divided into independent ducts,
- components throttling the extraction stream flow at the outlet of selected cyclones.

Intermediate inlet for the extraction stream from the cyclones in a dust collector may be created with a special deflector inside the collector over the extraction port inlet. It should provide the required distribution of the extraction streams from the individual cyclones (Fig. 5). This solution is very difficult to implement since it requires a complex calculation model and complex and time-consuming experiments.

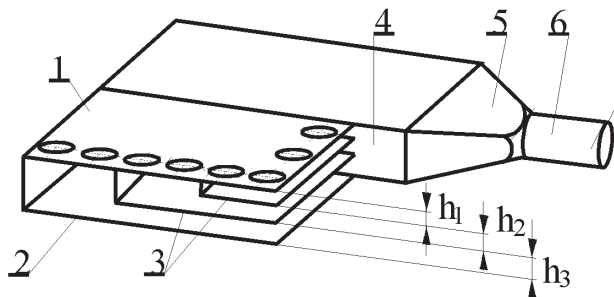


Fig. 6. Schematic diagram of a collector divided into individual ducts:
1 – cyclone mounting plate, 2 – collector bottom, 3 – deflectors,
4 – horizontal wall, 5 – intermediate duct, 6 – extraction port

Rys. 6. Schemat ideowy podziału osadnika na niezależne kanały:
1 – płyta mocowania cyklonów, 2 – dno osadnika, 3 – przegrody,
4 – ściana pionowa, 5 – kanał przejściowy, 6 – króciec odsysania

The other method of maintaining a uniform stream value for the individual cyclones is to divide the collector with several deflectors and to create independent, isolated extraction ducts inside the collector assigned to specific groups of individual cyclones (Fig. 6). The heights h_1 , h_2 , h_3 of ducts created by the deflectors inside the collector must be calculated to maintain a uniform resistance of flow through the ducts. These heights are determined by experimental studies.

Each individual extraction duct inside the collector should include a small group of cyclones. The width may include 3 to 4 cyclones, and the length 1 to 4 cyclones depending on the duct height at the extraction point. If the width includes more cyclones, the chamber must be divided (Fig. 6) with a vertical wall 4 to fit the required number of cyclones. Each segment should have an individual extraction port. This method can be used to modify dust collectors in existing filters, which does not provide required efficiency.

In cyclone dust collectors consisting of dozens of cyclones, various ejection extraction methods are available. The specific method and the means of providing uniform extraction stream values for all individual cyclones depend not only on their efficiency, but also on the multi-cyclone

Wyrównywanie oporów przepływu strumieni odsysających cyklonów przez dławienie i ukierunkowanie strumieni wybranych można realizować następującymi sposobami:

- przez umieszczenie w osadniku multicyklonu pośredniego wlotu do króćca odsysania,
- przez podział komory osadczej na niezależne kanały,
- za pomocą elementów dławiących przepływ strumienia odsysania umieszczonych na wylotach wybranych cyklonów.

Wlot pośredni strumieni odsysania z cyklonów w osadniku pyłu można utworzyć przez wprowadzenie do osadnika ukształtowanej przegrody – deflektora nad wlotem króćca odsysania. Powinien on zapewnić pożądany rozkład linii prądu strumieni odsysania wypływających z pojedynczych cyklonów – rys. 5. Rozwiązanie to jest trudne do opracowania, gdyż wymaga zastosowania złożonego modelu obliczeniowego, a następnie skomplikowanych i czasochłonnych badań eksperymentalnych.

Kolejny sposób prowadzący do urownomierzenia wartości strumienia odsysania z pojedynczych cyklonów polega na podziale osadnika kilkoma przegrodami i utworzeniu w ten sposób niezależnych, odizolowanych od siebie kanałów odsysania wewnątrz osadnika, przyporządkowanych określonym grupom pojedynczych cyklonów – rys. 6. Wysokości kanałów h_1 , h_2 , h_3 , utworzonych przez przegrody w osadniku, należy dobrać pod względem uzyskania jednakowych oporów przepływu przez kanały na drodze obliczeniowej. Ostatecznego doboru wysokości kanałów należy dokonać podczas badań eksperymentalnych.

Każdy z indywidualnych kanałów odsysania w osadniku powinien obejmować niezbyt liczną grupę cyklonów. Na szerokości kanału mogą być 3...4 cyklony, a na długości 1...4, w zależności od wysokości kanału w miejscu, w którym następuje odsysanie z cyklonów. Jeżeli na szerokości odpylacza jest więcej cyklonów, to należy komorę osadnika podzielić (rys. 6) szczelną ścianą pionową 4, tak by w segmentach powstałych z podziału szerokości mieściła się wymagana liczba cyklonów. Każdemu segmentowi powinien być przyporządkowany oddzielny króciec odsysania. Ten sposób kształtowania osadnika nadaje się w szczególności do modyfikowania osadników w istniejących, już eksploatowanych filtrach, które nie zapewniają spodziewanej skuteczności odpylania.

W odpylaczach cyklonowych zbudowanych z kilkudziesięciu cyklonów możliwe jest stosowanie różnych sposobów organizowania eiekcyjnego odsysania. Wybór określonej metody i zastosowanego sposobu, zmierzającego do zapewnienia jednakowych wartości strumieni odsysania ze wszystkich pojedynczych cyklonów, zależy nie tylko od ich efektywności, ale także od formy multicyklonu, liczby cyklonów i konfiguracji odpylacza, ograniczeń przestrzennych w miejscu jego zainstalowania.

4. Koncepcja układu odsysania pyłu z multicyklonu

Dla zapewnienia równomiernego odsysania strumieni z pojedynczych cyklonów multicyklonu T1 najbardziej

design, the number of cyclones, the dust extractor design, and spatial limitations.

4. The concept of multi-cyclone dust extraction system

To provide uniform extraction of streams from the individual cyclones of the T1 multicyclone, the design of a dust collector must be modified: it is divided into segments with deflectors, and the segments are divided into individual, separated extraction ducts assigned to a specific number of individual cyclones. (Fig. 7)

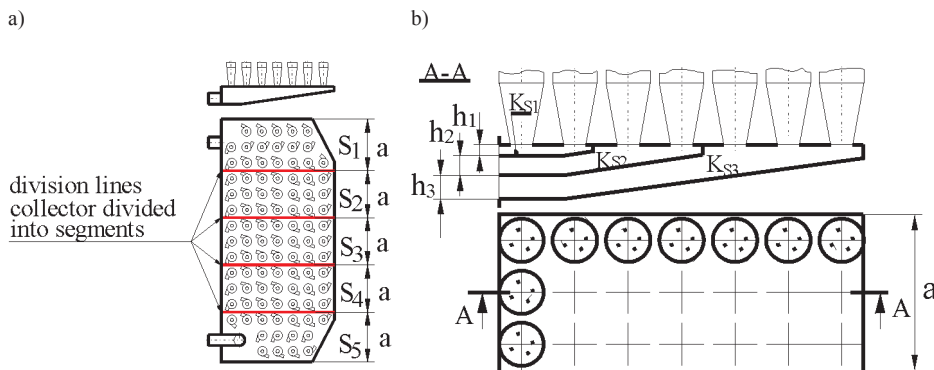


Fig. 7. The concept of dust extraction from T1 multi-cyclone: a) schematic diagram of multicyclone dust collector divided into segments, b) method of dividing segments into extraction ducts

Rys. 7. Koncepcja odsysania pyłu z multicyklonu T1: a) schemat ideowy podziału osadnika pyłu multicyklonu na segmenty, b) zasada podziału komory osadnika pyłu segmentu na kanały odsysania

The T1 multi-cyclone dust collector was divided at its width with deflectors into five identical and individual segments S with the width of a. Each segment includes 3 cyclone columns (seven cyclones in a column) and constitutes a single module. The segments (Fig. 7b) were divided with horizontal parallel deflectors into three separate extraction ducts (K_{S1} , K_{S2} , K_{S3}) with different heights h_1 , h_2 , h_3 . Each segment may include a different number of extraction ducts and cyclones. In a similar way, the T3 multi-cyclone dust collector was divided into three segments, each with a column of 13 cyclones.

The main issue when dividing a segment into extraction ducts is determining the proper height of each horizontal partition h_1 , h_2 , ... h_i . The height of an extraction duct must be calculated and verified with the tests of an actual dust collector segment.

A schematic diagram of a multicyclone dust collector of a mechanical vehicle air filter (Fig. 8) can be applied for calculations of various dust collectors, with the same design, i.e. divided into segments and extraction ducts.

The following assumptions were made:

- duct walls are parallel,
- duct 1 extracts air from the six cyclones from the first two rows, duct 2 extracts air from the six cyclones from the next two rows, duct 3 extract air from the last three rows,

odpowiedni wydaje się sposób polegający na zmianie struktury osadnika pyłu multicyklonu przez podział przestrzeni osadnika pyłu przegrodami na segmenty, a segmentu na niezależne, odizolowane od siebie kanały odsysania, którym należy przyporządkować określone grupy pojedynczych cyklonów – rys. 7.

Komorę osadnika pyłu multicyklonu T1 podzielono na szerokości ścianami wewnętrznymi (przegrodami) na pięć jednakowych i niezależnych części (segmentów S) o szerokości a. Każda z nich obejmuje 3 kolumny cyklonów (siedem cyklonów w kolumnie) i stanowi segment – moduł. Komory osadników segmentów (rys. 7b) podzielono poziomymi (równoległymi do siebie) przegrodami na trzy odrębne kanały odsysania (K_{S1} , K_{S2} , K_{S3}) o różnych wysokościach h_1 , h_2 , h_3 . Segment może zawierać różne liczby kanałów odsysania, a do każdego może być przypisana inna liczba cyklonów. W podobny sposób z osadnika pyłu multicyklonu T3 wyodrębniono 3 segmenty. Każdemu przyporządkowano kolumnę 13 cyklonów.

Podstawowym problemem przy podziale komory osadnika segmentu na kanały odsysania jest ustawienie poziomych przegród na odpowiednich wysokościach h_1 , h_2 , ... h_i . Wysokości kanałów segmentu osadnika pyłu należy określić na drodze obliczeniowej, a następnie zweryfikować je eksperymentalnie podczas badań rzeczywistego segmentu osadnika pyłu.

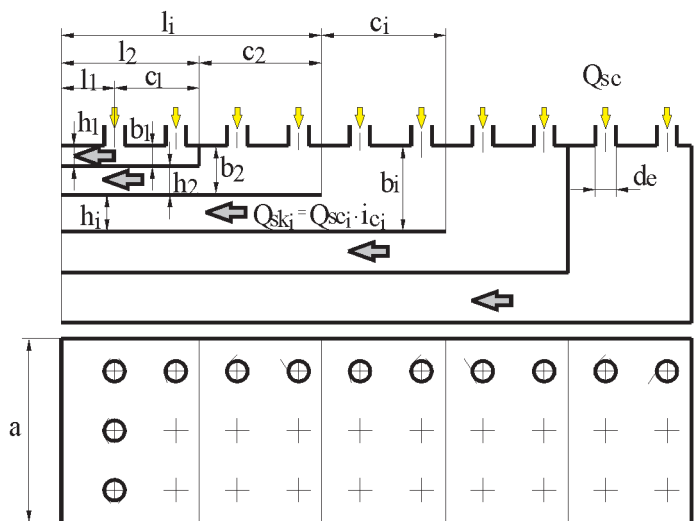


Fig. 8. Schematic diagram of a dust collector segment: a – segment width, b – chamber height, c – chamber length, l – outlet duct length, d_e – relief port diameter, h – total collector height, h_i – height of i duct, i – consecutive duct number

Rys. 8. Schemat ideowy segmentu osadnika pyłu: a – szerokość segmentu, b – wysokość komory, c – długość komory, l – długość kanału wylotowego, d_e – średnica otworu upustowego, h – wysokość całkowita osadnika, h_i – wysokość i-tego kanału, i – numer kolejny kanału

- extraction duct includes a chamber with length c_i and outlet duct with length l_i , where i is the consecutive duct number,
- the chamber and the inlet duct are divided with the plane where the chamber area ends with an offset in the flow direction from the chamber height h_1 to the duct height h_i ,
- in the first duct, due to the lack of an offset (duct and chamber height are identical $h_1 = b_1$), the division plane is a cross-section of the extraction chamber in the plane of the axis of the first row of cyclones,
- an inclination of a lower segment walls is not allowed for, due to the low angle ($\alpha = 6^\circ$), so that the chamber is a cuboid.
- due to low flow rate in the extraction ducts (below 4 m/s) and very small relative pressure loss in relation to the environment, the air density is uniform and equal to the surrounding air density.

The air stream (with separated dust) flows directly to the chamber of each extraction duct from the cyclones via the extraction ports with a diameter of d_e :

$$Q_{ski} = Q_{sci} \cdot i_{ci} \quad (2)$$

where: Q_{sci} – the air stream extracted from an individual cyclone of the i duct, i_{ci} – number of cyclones in a specific extraction duct.

The main issue is to determine the pressure loss at the extraction ducts of the collector segment. Two main reasons for pressure loss in the actual design (extraction duct) were considered: the air stream whirls due to the change in the duct cross-section and the friction between the air stream and the duct wall.

Three types of pressure loss were considered for the air stream flow via the extraction duct of a dust collector segment (Fig. 9):

Δp_e – local pressure loss due to the reduction of the stream flow rate and the mixing of the streams and due to the flow of Q_{sc} streams from the cyclones to the segment chamber.

Δp_w – local flow pressure loss of Q_{sk} stream flowing to the duct via an inlet on the side wall of the chamber. In this case we can assume that the flow is via a duct with a reduced cross-section.

Δp_k – pressure loss due to friction during the stream flow via a duct with a uniform cross-section.

Total pressure loss due to air stream flow via i duct is expressed as:

$$\Delta p_{KSi} = \Delta p_{ei} + \Delta p_{wi} + \Delta p_{ki} \quad (3)$$

The local pressure loss Δp_{ei} due to the Q_{sci} air stream flow to the chamber of i duct is expressed as:

$$\Delta p_{ei} = \zeta_e \frac{\rho}{2} v_e^2 \quad (4)$$

where: ρ – air density, ζ_e – coefficient of flow resistance, v_e – air flow rate from the extraction duct chamber – air flow rate at the outlet (discharge) of a cyclone with diameter d_e is calculated as follows:

Schemat ideowy segmentu osadnika multicyklonu filtra powietrza pojazdu mechanicznego (rys. 8) może mieć zastosowanie do obliczeń różnych osadników, ale o tej samej zasadzie konstrukcji, to znaczy z podziałem na segmenty i kanały odsysania.

Podczas obliczeń stosowano następujące zasady:

- odpowiednie ściany kanałów są w stosunku do siebie równoległe,
- kanał nr 1 odsysa powietrze z sześciu cyklonów ustawionych w dwóch pierwszych rzędach, kanał nr 2 odsysa powietrze z sześciu cyklonów z następnymi dwoma rzędami, a kanałowi nr 3 przyporządkowano trzy ostatnie rzędy cyklonów,
- w kanale odsysania wyodrębniono komorę o długości c_i i kanał wylotowy o długości l_i , gdzie i oznacza numer kolejny kanału,
- granicą podziału komory i kanału wlotowego jest płaszczyzna, gdzie przestrzeń komory kończy się uskokiem przekroju w kierunku przepływu od wysokości komory b_i do wysokości kanału h_i ,
- w kanale pierwszym, ze względu na brak uskoku (wysokości kanału i komory są jednakowe $h_1 = b_1$), jako granicę podziału komory i kanału wylotowego przyjęto przekrój kanału odsysania w płaszczyźnie osi cyklonów pierwszego rzędu,
- nie uwzględniono pochylenia fragmentów dolnych ścian segmentów mających mały kąt pochylenia dolnych ścian ($\alpha = 6^\circ$), w związku z czym komora ma formę prostopadłościenną,
- z uwagi na niewielkie prędkości przepływu występujące w kanałach odsysania (poniżej 4 m/s) oraz bardzo małe względne spadki ciśnienia w stosunku do otoczenia, wartość gęstości powietrza można przyjąć jednakową, równą gęstości powietrza w otoczeniu.

Do komory każdego kanału odsysania dopływa bezpośrednio z cyklonów otworami odsysania o średnicy d_e strumień powietrza (z odseparowanymi cząstkami pyłu) o wielkości (2), gdzie: Q_{sci} – strumień powietrza odsysany z pojedynczego cyklonu i -tego kanału odsysającego, i_{ci} – liczba cyklonów objęta kanałem odsysania.

Podstawowym zagadnieniem w obliczeniach przepływowych osadnika jest ustalenie strat ciśnienia w kanałach odsysania segmentu osadnika. Podczas obliczeń uwzględniono dwie zasadnicze przyczyny strat ciśnienia występu-

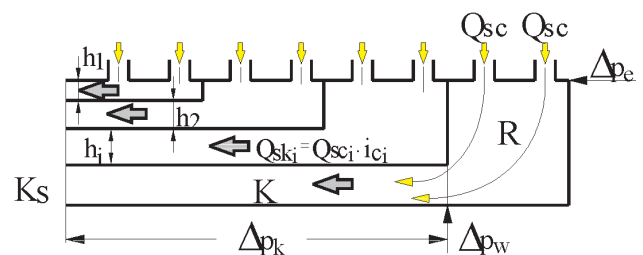


Fig. 9. Schematic diagram of a collector segment of the air filter multicyclone: K_s – extraction duct R – chamber, K – outlet duct

Rys. 9. Schemat ideowy segmentu osadnika multicyklonu filtra powietrza: K_s – kanał odsysania, R – komora, K – kanał wylotowy

$$v_e = \frac{Q_{SC}}{A_e} \quad (5)$$

The coefficient of flow resistance ζ_e is calculated as follows:

$$\zeta_{ei} = (1 - \frac{A_e}{A_{ci}}) \quad (6)$$

where: A_e – cross-sectional area of a cyclone discharge port (diameter d_e), A_{ci} – area of the top chamber wall (Fig. 10) where the cyclones are installed, calculated as follows:

$$A_{ci} = a \cdot c_i \quad (7)$$

Local pressure loss due to the Q_{Ski} extraction stream flow via a rectangular duct with dimensions of a and h_i (Fig. 10) is expressed as follows:

$$\Delta p_{wi} = \zeta_{wi} \frac{\rho}{2} v_{ki}^2 \quad (8)$$

where: v_{ki} – air flow rate in the duct with height h_i and width a , ζ_{wi} – coefficient of flow resistance, depending on the ratio of cross-section area of the outlet duct A_{hi} and the area of a front chamber wall A_{bi} [12]:

$$\zeta_{wi} = \frac{1}{2} (1 - \frac{A_{hi}}{A_{bi}}) \quad (9)$$

The air flow rate v_{ki} inside a duct with height h_i and width a is calculated as follows:

$$v_{ki} = \frac{Q_{Ski}}{h_i \cdot a} \quad (10)$$

The pressure loss in the outlet duct is expressed as follows:

$$\Delta p_{ki} = \lambda_{ki} \frac{\rho}{2} v_{ki}^2 \frac{l_i}{d_{ri}} \quad (11)$$

where: λ_{ki} – coefficient of pressure loss inside the duct, l_i – duct length, d_{ri} – equivalent duct diameter.

The Mises equation was used to calculate the coefficient λ_{ki} , where the value depends on the lateral dimensions of a duct, flow pattern and material roughness of the duct walls [3]:

$$\lambda_{ki} = 0.0096 + 4 \sqrt{\frac{2 \cdot K_S}{d_{ri}}} + 1.2 \sqrt{\frac{2}{Re_{ki}}} \quad (12)$$

where: K_S – coefficient of duct wall roughness, Re_{ki} – Reynolds number in accordance with the following dependence:

$$Re_{ki} = \frac{d_{ri} \cdot v_{ki}}{\nu} \quad (13)$$

where: ν – air kinematic viscosity.

Due to the rectangular shape of the outlet duct, its equivalent diameter d_r should be calculated with the following formula:

$$d_{ri} = \frac{2 \cdot a \cdot h_i}{a + h_i} \quad (14)$$

jące w obiekcie rzeczywistym – kanale odsysania. Są nimi zawirowania strumienia powietrza, które pojawiają się przy nagłych zmianach przekroju kanału przepływowego oraz tarcie powietrza o ściany kanału.

Podczas przepływu strumienia powietrza przez kanał odsysania z segmentu osadnika pyłu przyjęto trzy rodzaje strat ciśnienia – rys. 9:

Δp_e – lokalna strata ciśnienia powstająca na skutek zmniejszenia prędkości strumienia oraz mieszanie strumieni i występująca przy napływie strumieni Q_{SC} z cyklonów do komory segmentu,

Δp_w – lokalna strata ciśnienia przepływu strumienia Q_{Sk} wpływającego do kanału przez wlot umieszczony w ścianie bocznej komory. W tym przypadku można uznać, że występuje przepływ przez kanał o nagłym zwężeniu przekroju,

Δp_k – strata ciśnienia wynikła z tarcia podczas przepływu strumienia przez kanał o stałym przekroju.

Sumaryczną stratę ciśnienia podczas przepływu strumienia powietrza przez i-ty kanał odsysania określa zależność (3).

Lokalną stratę ciśnienia Δp_{ei} przy napływie strumienia powietrza Q_{Ski} do komory i-tego kanału można przedstawić wyrażeniem (4), gdzie: ρ – gęstość powietrza, ζ_e – współczynnik oporu przepływu, v_e – prędkość dopływu powietrza do komory kanału odsysania – prędkość powietrza w otworze odprowadzenia strumienia odsysania (upustowym) cyklonu o średnicy d_e obliczona z zależności (5).

Współczynnik oporu przepływu ζ_e należy określić z zależności (6), gdzie: A_e – pole przekroju poprzecznego otworu (o średnicy d_e) odprowadzenia strumienia odsysania z cyklonu, A_{ci} – pole powierzchni górnej ściany komory (rys. 10), w której zamocowane są cyklony obliczone z zależności (7).

Lokalną stratę ciśnienia podczas przepływu strumienia odsysania Q_{Ski} przez prostokątny otwór kanału o wymiarach a i h_i (rys. 10) przedstawia zależność (8), gdzie: v_{ki} – prędkość powietrza w kanale o wysokości h_i i szerokości a , ζ_{wi} – współczynnik oporu przepływu zależny od stosunku pola poprzecznego otworu kanału wylotowego A_{hi} do pola ściany czołowej komory A_{bi} [12] – wzór (9).

Prędkość v_{ki} powietrza w kanale o wysokości h_i i szerokości a należy obliczyć z zależności (10).

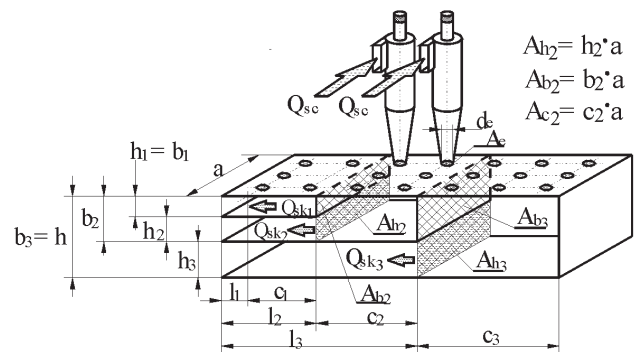


Fig. 10. Schematic diagram (for numerical calculations) of a dust collector segment with three extraction ducts

Rys. 10. Schemat ideowy (do obliczeń numerycznych) segmentu osadnika pyłu o trzech kanałach odsysania

The flow calculations are based on the relation between the total pressure loss at each extraction duct, assuming initially the number of ducts k and their uniform height h_i :

$$h_1 = h_2 = h_3 = \dots = \frac{h}{k} \quad (15)$$

The task is to calculate such heights $h_1, h_2, h_3, \dots, h_i$ of the extraction ducts (with constant segment width a and constant collector chamber height h) so that the total pressure losses in the extraction ducts at the section between the cyclone outlets and the extraction duct outlet are similar:

$$\Delta p_{KS1} = \Delta p_{KS2} = \Delta p_{KS3} = \dots = \Delta p_{KSi} \quad (16)$$

A method of successive approximation was used with a custom calculation program [6] for the following data – Table 1.

The heights h_i of the ducts at the dust collector segment outlet of the T1 multi-cyclone are as follows: $h_1 = 12$ mm, $h_2 = 19$ mm, $h_3 = 26$ mm.

Stratę ciśnienia w kanale wylotowym ujmuję zależność (11), gdzie: λ_{ki} – współczynnik strat ciśnienia w kanale, l_i – długość kanału, d_{ri} – średnica równoważna kanału.

Do obliczenia współczynnika λ_{ki} zastosowano wzór Misesa, który uzależnia jego wartość od wymiarów poprzecznych kanału, rodzaju przepływu i szorstkości materiałów, z których wykonane są ściany kanału [3] – wzór (12), gdzie: K_s – współczynnik charakteryzujący szorstkość ścian kanału, Re_{ki} – liczba Reynoldsa określona zależnością (13), gdzie: ν – lepkość kinematyczna powietrza.

Ze względu na prostokątny kształt przekroju kanału wylotowego należy obliczyć jego średnicę równoważną d_r według zależności (14).

Obliczenia przepływowe polegają na obliczeniu z wykorzystaniem przedstawionych zależności sumarycznych strat ciśnienia osobno w każdym kanale odsysania, przy wstępnym założeniu liczby k kanałów i jednakowych ich wysokości h_i – wzór (15).

Zadanie sprowadza się do obliczenia takich wysokości $h_1, h_2, h_3, \dots, h_i$ kanałów odsysania segmentu (przy stałej szerokości

Table 1. Calculation data for the dust collector segment of a T1 multicyclone
Tabela 1. Dane do obliczeń numerycznych dla segmentu osadnika pyłu multicyklonu T1

Air flow at the multicyclone outlet/strumień powietrza wyphywający z multicyklonu		$Q_{Gr} = 3400$ m ³ /h,
Air density/gęstość powietrza		$\rho = 1.29$ kg/m ³
Number of cyclones in the multicyclone/liczba cyklonów w multicyklonie		$i_{em} = 96$
Extraction rate/stopień odsysania		$m_0 = 8\%$
Segment width szerokość segmentu		$a = 0.095$ m
Assumed number of ducts/założona liczba kanałów		$k = 3$
Number of cyclones assigned to each duct/liczba cyklonów przyporządkowana kanałom	no. 1	$i_{c1} = 6$
	no. 2	$i_{c2} = 6$
	no. 3	$i_{c3} = 9$

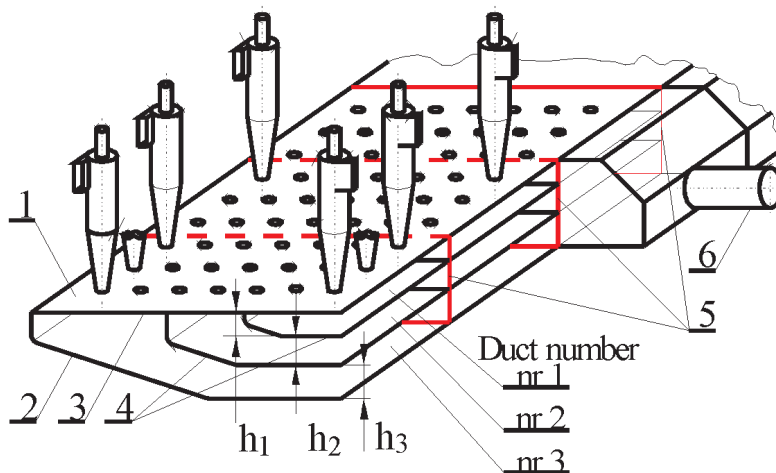


Fig. 11. Schematic diagram of a T1 multicyclone dust collector: 1 – segment, 2 – collector bottom, 3 – collector top plate, 4 – horizontal duct deflectors, 5 – segment deflectors, 6 – extraction port, h_1, h_2, h_3 – extraction duct height at the outlet

Rys. 11. Schemat ideowy osadnika pyłu multicyklonu T1: 1 – segment, 2 – dno osadnika, 3 – płyta górna osadnika, 4 – przegrody poziome rozdzielające kanały, 5 – przegrody rozdzielające segmenty, 6 – króciec odsysania, h_1, h_2, h_3 – wysokości kanałów odsysających na wylocie

kości segmentu a i stałej wysokości h komory osadnika), aby sumaryczne straty ciśnienia w kanałach odsysania na odcinku pomiędzy wylotami z cyklonów a wylotem z kanału odsysania były zbliżone – wzór (16).

Obliczenia wykonano metodą kolejnych przybliżeń, specjalnie w tym celu zbudowanym programem obliczeniowym [6] dla danych podanych w tabeli 1.

Otrzymane wysokości h_i kanałów na wylocie segmentu osadnika pyłu multicyklonu T1 przyjmują odpowiednio wartości: $h_1 = 12$ mm, $h_2 = 19$ mm, $h_3 = 26$ mm.

Tak ustalone wymiary segmentu posłużyły do zbudowania konstrukcji osadnika multicyklonu T1 przeznaczonej do dalszych (eksperymentalnych) badań przepływowych – rys. 11.

5. Podsumowanie

Opracowany algorytm obliczeń umożliwił wstępny dobór wysokości na wylocie h_i ,

These dimensions were used to design a T1 multi-cyclone collector for further studies – Fig. 11.

5. Summary

The developed algorithm enables a preliminary determination of the outlet heights h_1, h_2, \dots, h_i of the individual extraction ducts of a dust collector segment so that the air stream flow resistance is uniform. The final determination of the number and the heights h_1, h_2, \dots, h_i of ducts must be carried out in experimental studies of a specific multi-cyclone segment.

The calculation algorithm for the multicyclone dust collector segment of a mechanical vehicle engine air filter may be used for the calculations of various duct collectors sharing the same design, i.e. divided into segments and extraction ducts. Each segment may include a different number of extraction ducts and cyclones.

The structure of the dust extractors with segments facilitates their design and allows shaping them as desired. The number of segments in a dust extractor may be adapted to the specific requirements of the engine. The basic tests are then limited to the segment, and are easy to conduct and less expensive. Dust extractor tests as a whole, usually at the final stage, concern the possible adjustment of the arrangement and the shape of the extraction ducts and the method of connecting them to the extraction stream collector.

h_2, \dots, h_i , kolejnych kanałów odsysających segmentu osadnika pyłu pod względem jednakowych oporów przepływu strumieni powietrza przez kanały. Ostateczny dobór liczby i wysokości h_1, h_2, \dots, h_i kanałów należy przeprowadzić podczas badań eksperymentalnych wydzielonego segmentu multicyklonu.

Algorytm obliczeń segmentu osadnika multicyklonu filtra powietrza silnika pojazdu mechanicznego może mieć zastosowanie do obliczeń różnych osadników, ale o tej samej zasadzie konstrukcji, tzn. z podziałem na segmenty i kanały odsysania. Segment może zawierać różne liczby kanałów odsysania, a do każdego może być przypisana inna liczba cyklonów.

Konstrukcja odpylacza zbudowanego z segmentów ułatwia znacznie proces jego projektowania oraz pozwala nadać mu najbardziej dogodny kształt. Liczbę segmentów w odpylaczu można dostosować do potrzeb wynikających z właściwości silnika. Podstawowe badania ograniczają się wówczas do segmentu, przez co są znacznie prostsze i mniej kosztowne. Badania odpylacza jako całości (z reguły końcowe) dotyczą ewentualnych korekt rozmieszczenia i kształtu przewodów odsysających oraz sposobu połączenia ich z kolektorem strumienia odsysania.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Bibliography/Literatura

- [1] Cenrtisep Air Cleaner.: Materiały informacyjne firmy PALL Corporation, USA 2004.
- [2] Baczewski K., Hebda M.: Filtracja płynów eksploatacyjnych. MCNEMT, Radom 1991/92.
- [3] Bukowski J.: Mechanika płynów, PWN, Warszawa 1968.
- [4] Dzierżanowski P., Miller Z.: Poszukiwania konstrukcyjnych sposobów podwyższenia skuteczności bezwładnościowego odpylacza płaskiego. Biuletyn WAT, XL, 9 (469), 1991.
- [5] Dzierżanowski P.: Bezwładnościowy odpylacz modułowy. Biuletyn WAT, XXXV, 2 (402), 1986.
- [6] Dziubak T.: Analiza procesu filtracji powietrza wlotowego do silników pojazdów specjalnych. Rozprawa habilitacyjna. WAT, Warszawa 2008.
- [7] Dziubak T.: Model osadnika pyłu multicyklonu filtra powietrza silnika pojazdu terenowego eksploatowanego w warunkach dużego zapylenia powietrza. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, Z. 2 (130) 2002.
- [8] Dziubak T.: Problemy odsysania pyłu z multicyklonu filtra powietrza silnika pojazdu mechanicznego eksploatowanego w warunkach dużego zapylenia powietrza. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn PAN, Z. 1(125), 2001.
- [9] Dziubak T.: Badania eksperymentalne efekcyjnego układu odsysania pyłu z multicyklonu filtra powietrza silnika czołowego, VII Międzynarodowe Sympozjum IPM „Doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych”, Rynia 1999.
- [10] Dziubak T.: Badania eksperymentalne efekcyjnego układu odsysania zanieczyszczeń z filtra powietrza, Biul. WAT, XLVII, 10 (554) 1998.
- [11] Dziubak T.: Możliwości poprawy efektywności odsysania pyłu z odpylacza multicyklonowego filtra powietrza wlotowego silnika pojazdu wojskowego, 26 Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silników Spalinowych KONES 2000 – Nałęczów 2000.
- [12] Malicki M.: Tablice do obliczania przewodów wentylacyjnych, Arkady, Warszawa 1977.
- [13] Warych J.: Oczyszczanie gazów – procesy i aparatura, WNT, Warszawa 1998.

Tadeusz Dziubak, DSc., DEng. – Professor at the Faculty of Mechanics Military University of Technology, Warsaw, Poland.

Dr hab. inż. Tadeusz Dziubak – profesor na Wydziale Mechanicznym Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie.

e-mail: tdziubak@wat.edu.pl

