



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

Aleksej Bašmakov

ANTRINIO ORO SRAUTO ĮTAKOS CIKLONO DARBO

EFEKTYVUMUI TYRIMAS

**RESEARCH OF SECONDARY FLOW INFLUENCE TO CYCLONE
EFFICIENCY**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa, valstybinis kodas 62409T111

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2009



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MAŠINŲ GAMYBOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

Doc. Dr. M. Jurevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Aleksej Bašmakov

**ANTRINIO ORO SRAUTO ĮTAKOS CIKLONO DARBO
EFEKTYVUMUI TYRIMAS**

**RESEARCH OF SECONDARY FLOW INFLUENCE TO
CYCLONE EFFICIENCY**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos studijų programa , valstybinis kodas 62409T111

Aplinkos apsaugos įrenginių projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas: Doc. Dr. Vytautas Striška

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas: Lekt. A. Petrėtienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2009

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS	6
	8
IVADAS	9
1. TYRIMO OBJEKTAS	11
1.1 Darbo tikslas	11
2. ANALITINĖ DALIS	12
2.1 Veiksniai, lemiantys dulkėto oro išvalymo laipsnį	12
2.2 Faktoriai, skatinantys dalelių nusodinimą	15
2.3 Išcentrinio dalelių nusodinimo proceso teoriniai pagrindai	16
2.3.1 Antrinio srauto teoriniai pagrindai	18
2.3.2 Antrinio srauto įtaka išcentriniam dalelių nusodinimui	21
3. ESAMOS PADĖTIES ANALIZĖ	23
3.1 Naudojamų valymo įrenginių įvairovė	23
3.2 Inerciniai oro valymo įrenginiai	23
3.3 Išcentriniai oro valymo įrenginiai	24
3.4 Dinaminės dalelių gaudyklės	26
3.5 Sūkuriniai dalelių gaudytuvai	27
3.6 Žinomų konstrukcijų ciklonų trūkumai	27
3.7 Analitiniai ciklono parametrų skaičiavimai	28
3.7.1 Dalelių duomenys, būtini ciklonų efektyvumo skaičiavimams atlikti	32
3.7.2 Ciklonų efektyvumo skaičiavimas	34
3.8 Išvalymo efektyvumo didinimo kryptių analizė	36
4. EKSPERIMENTAS IR JO REZULTATŲ ĮVERTINIMAS	37
4.1 Tiriamojo stendo aprašymas	37
4.2 Tyrimų darbo metodika	38
4.2.1 Matavimo priemonės	41
4.2.2 Bandymų atlikimo eiga	43
4.3 Tyrimo rezultatų analizė	45
IŠVADOS	48
LITERATŪROS ŠALTINIAI	49

PRIEDAI:

Priedas Nr 1. Ciklono horizontalios slėgio epiūros

Priedas Nr 2. Ciklono, kai antrinis srautas nesutampa su pirminiu, horizontalios slėgio epiūros

Priedas Nr 3. Ciklono , kai antrinis srautas sutampa su pirminiu, horizontalios slėgio epiūros

Priedas Nr 4. Ciklono vertikalios slėgio epiūros

Priedas Nr 5. Ciklono, kai antrinis srautas nesutampa su pirminiu, vertikalios slėgio epiūros

Priedas Nr 6. Ciklono, kai antrinis srautas sutampa su pirminiu, vertikalios slėgio epiūros

Priedas Nr 7. Straipsnis konferencijoje 2009 04 14 Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities

PAVEIKSLŲ IR LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 pav. Ciklono veikimo principas	10
2 pav. Dalelės judėjimo trajektorijos	13
3 pav. Vienos dalelės judėjimo trajektorija	14
4 pav. Srauto judėjimas su kliūtimi	16
5 pav. Ciklono darbo principas	17
6 pav. Tornado schema	18
7 pav. Ranko vamzdelis	19
8 pav. Antrinio srauto tiekimo schema	21
9 pav. Dalelės judėjimo trajektorija	22
10 pav. Inerciniai oro valymo įrenginiai	23
11 pav. Klasikiniai ciklonai	24
12 pav. Dinaminės dalelių gaudyklės	26
13 pav. Sūkurinių dalelių gaudytuvų papildomo oro tiekimo schemas	27
14 pav. Bendro išvalymo efektyvumo nomograma	32
15 pav. Frakcinis išvalymo laipsnis	34
16 pav. Tiriamojo stendo schema	37
17 pav. Tiriamasis stendas	38
18 pav. Ašinio ventiliatoriaus tvirtinimo vieta	39
19 pav. Eksperimentinis stendas	40
20 pav. Daugiafunkcis matavimo prietaisas „Testo 435“	41
21 pav. Diferencialinis monometras „Testo 506“	42
22 pav. Pito vamzdelis	42
23 pav. Matavimo procesas	42
24 pav. Svarstyklės „Daewoo Int. DI-8274“	43
25 pav. Išvalymo efektyvumas pagal frakcijas	45
26 pav. Horizontalios slėgio epiūros	46
27 pav. Vertikalios slėgio epiūros	47
1 lentelė. Galingumo atsargos koeficientas K_{at}	30
2 lentelė. Normalios funkcijos pasiskirstymo reikšmės	31
3 lentelė. Išvalymo parametrai	35
4 lentelė. Prietaiso „Testo 435“ techniniai parametrai	41

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Mechanikos fakultetas
Mašinų gamybos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 2
Data 2009-06-03

Magistrantūros studijų **Mechanikos** programos baigiamasis darbas
Pavadinimas **Antrinio oro srauto įtakos ciklono darbo efektyvumui tyrimas**
Autorius **Aleksej Bašmakov**
Vadovas **doc. dr. Vytautas Striška**

Kalba: Lietuvių

Anotacija

Šiuo metu efektyviausi ir plačiausiai naudojami yra išcentriniai dalelių nusodinimo metodai. Tačiau jų išvalymo efektyvumas nėra pakankamai didelis. Todėl išcentriniai valymo įrenginiai naudojami grubiam ir vidutiniam dulkėtam oro srautui valyti. Švariam valymui papildomai naudojami rankoviniai ir elektrostatiniai filtrai.

Norint atsikratyti filtrų, kurie turi daug trūkumų (didelis hidraulinis pasipriešinimas, nepastovus užsikimšimas bei dėmesinga priežiūra) – tikslinga didinti išcentrinių oro valymo įrenginių išvalymo efektyvumą.

Baigiamajame magistro darbe pateikiama išcentrinio valymo būdo apžvalga bei antrinio srauto įtakos ciklono darbo efektyvumui medžiaga.

Darbą sudaro 4 dalys: įvadas, analitinė dalis, esamos padėties analizė bei eksperimentas ir jo rezultatų įvertinimas.

Prasminiai žodžiai: išvalymo efektyvumas, pirminis srautas, antrinis srautas, dulkėtas oras, ciklonas.

Vilniaus Gediminas technical university
Faculty of Mechanics
Department of Machine Engineering

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date 2009-06-03

Master Degree Studies **Mechanics** study programme Master's Thesis
Title: **Research of secondary flow influence to cyclone efficiency**
Author: **Aleksej Bašmakov**
Academic supervisor: **Assoc Prof Dr Vytautas Striška**

Thesis language:
English

The summary

Currently, the most effective and most widely used is the centrifugal particle deposition methods. However, their efficiency is not clean enough strong. Therefore, centrifugal cleaning equipment used to clean air flow of (coarse and medium) dust. Clean water treatment used in addition of sieve filters.

In order to get rid of the filters which have many disadvantages (high hydraulic resistance, irregular clogging, and the supervision of care) - need to increase the centrifugal air cleaning equipment cleaning efficiency.

The final master's work provides an overview centrifugal cleaning method and the secondary flow effect on the cyclone in the working efficiency of the material.

Job consists of 4 parts: introduction, analytical part of the current situation analysis and the results of the experiment and its evaluation.

Key words: cleaning efficiency, the primary flow, secondary flow, dusty air, the cyclone.

IVADAS

Atmosferos teršimas tapo viena iš aktualiausių šiuolaikinių problemų. Labiausiai teršianti medžiaga yra dujinės prigimties ir kietosios dalelės, kurios gali būti perneštos dideliais atstumais ir lokalizuotis. Vilniuje oro dulkėtumas viršija 2 - 3 kartus leistiną normą [4].

Didelės koncentracijos ant žemės paviršių turi įtakos augalų ir gyvūnų gyvenimui vietiniu ir globaliniu mastu. Todėl daugelio šakų gamybos plėtimas veikia gyvūniją ir augaliją, turi įtakos jos išteklių panaudojimui ir yra tiesiogiai susijęs su dulkėto oro srautų atskyrimo problemomis.

Šios problemos sprendimas tampa kasdien aktualesnis, kadangi vis didėja pramoninių įmonių gamybinės teritorijos.

Dulkių mažinimo problema, atitiktis leistinoms dulkių koncentracijoms atmosferoje, gali būti išspręsta, jeigu yra teisingai suprojektuotas ekonomiškai ir gana efektyvus dulkių gaudytuvas konkrečiam atvejui. Tokiu būdu reikia atsižvelgti ne tik į racionalios technologijos sąlygas, tinkamą dulkių gaudytuvų eksploataciją, bet taip pat į pačią dulkių išsklaidymo galimybę atmosferoje [4].

Yra naudojamos kelios dulkių valymo technologijos:

- mechaninis valymas vyksta dėl išorinių jėgų, valymas ciklonuose – išcentrinėmis jėgomis;
- šlapusis valymas – dalelių savybė reaguoti su vandeniu ar emulsija;
- valymas filtrais – dalelių nusodinimas ant porėtos medžiagos;
- valymas panaudojant elektrą.

Kietoms dalelėms iš oro išvalyti dažniausiai yra naudojami ciklonai arba filtrai. Medienos apdirbimo pramonėje plačiausiai naudojami išcentriniai dalelių nusodinimo metodai, daugiausia – ciklonai [33].

Ciklonai (graik. *cyclon* – pasuktas) – tai vieni iš populiariausių dispersinės taršos valymo įrenginių. Jų platų naudojimą lemia jų konstrukcijos paprastumas, patikimumas eksploataavimo metu, reikalaujantis nedidelių išlaidų [31].

Vokietijos tyrėjo Matiasa Bonata apžvalginiame straipsnyje „Dujų cikloninis valymas nuo kietų dalelių“, publikuoto 1982 žurnale „Chemijos inžinerijos technika“, pristatyta pirmų ciklonų sukūrimo istorija:

1886 amerikiečių O. M. Merse įmonės “Knickerboker” atstovas pateikė paraišką užpatentuoti dulkių surinktuvą ir gavo autorystės teisių pažymėjimą pirmam cikloninio tipo valymo įrenginiui [19].

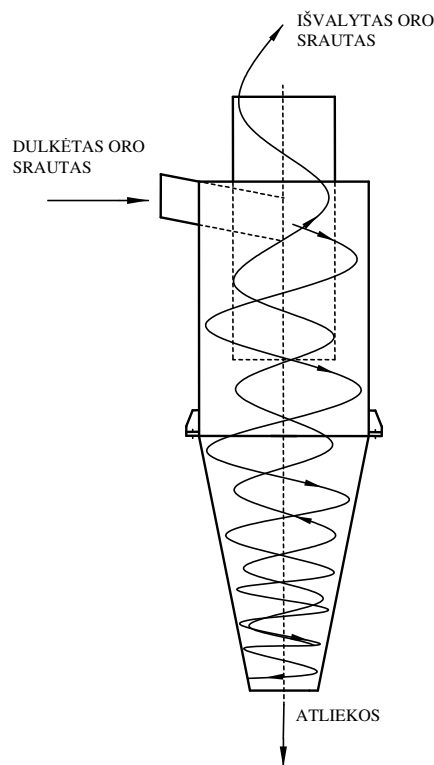
Nors ciklonai jau naudojami apie 100 metų, iki šiol nenustatytas srautų judėjimo

režimas šituose valymo įrenginiuose. Daug mokslininkų dalyvavo kuriant cikloninį prietaisą. Tikrai nedaugelis turbūt žino, kad L. Prandl, kuris savo išvadomis apie susikirtimo linijos teoriją įrodė šiuolaikinę srovės mechaniką, taip pat tyrinėjo cikloniniais valymo įrenginiais.

Įmonė MAN Niurnberge 1901 m. pateikė paraišką patentui, kurio išradėjas buvo L. Prandl. Tačiau darbas, kuris išaiškino aerodinaminius ciklono procesus, kurie apibrėžia valymo būdą, buvo publikuotas 1956 m. [19].

Ciklonų veikimo principas yra pagrįstas dispersinės fazės atskyrimu nuo dujinės fazės išsentrinių jėgų, atsirandančių dėl dujų srauto sukurių ciklone.

Ciklone suformuotas sukurys su dalelėmis nusileidžia žemyn, palikdamas daleles, ir priešinga kryptimi su dalimi smulkios frakcijos dalelių kyla į viršų. Taip formuojasi pirminis ir antrinis srautai (**1 pav**). Ciklonai yra palyginti nedidelių matmenų, jų konstrukcija paprasta ir pigi eksploatacija. Tačiau juose sunku atskirti smulkias daleles, kurių skersmuo mažesnis nei 40 μm . Todėl papildomai orą reikia valyti sausuose filtruose ar šlapio valymo atskirtuvuose [30].



1 pav. Ciklono veikimo principas

1. TYRIMO OBJEKTAS

Bandant eksploatuoti Lietuvos įmonėse sukonstruotus ir pagamintus išcentrinių jėgų veikiančius dulkių gaudytuvus – ciklonus, išaiškėjo keletas jų darbo trūkumų, kurie trukdo plačiau taikyti ir realizuoti juos valymo technologijose.

Vienas iš pagrindinių trūkumų – ne visada užtikrinama dujų srauto išvalymo kokybė, kurios reikalauja aplinkosauga. Todėl baigiamojo darbo tyrimo objektu pasirinktas ciklonas.

Ciklono išvalymo efektyvumas 0,85. Todėl ciklonai naudojami tik grubiam dulkėtam oro srautui valyti, o švariam valymui papildomai naudojami rankoviniai filtrai, kurių išvalymo efektyvumas siekia 0,99 [30].

1.1 Darbo tikslas

Daugelyje technologinių procesų medienos perdirbimo pramonėje į aplinką išsiskiria dulkėtas oras. Medienos pramonėje – tai medienos dulkės, žievė ir pan. Jų dispersiškumas yra nuo 1 μm .

Pagrindiniai taršos šaltiniai šiose įmonėse: ten, kur vyksta mechaniniai medienos apdorojimo procesai, tokie kaip pjovimas, šlifavimas ir t. t.

Pramoninių patalpų dulkėtumas išmatuojamas svoriniu būdu, kuriuo nustatomos dulkių koncentracijos darbo zonoje. Siekiant sumažinti oro dulkėtumą, projektuojamos aspiracinės sistemos su atliekų kaupimo rezervuarais [3].

Medienos apdirbimo pramonėje plačiausiai yra taikomas išcentrinis dalelių atskyrimo principas. Šiam tikslui taikomi įvairiausi ciklonai.

Ciklonų trūkumas yra nepakankamas iki 40 μm skirtingo dispersiškumo dujų išvalymo laipsnio, ypač, jei dominuoja mažesnės nei 40 μm dalelės.

Norint atsikratyti filtrų, kurie turi pakankamai trūkumų, tokių kaip didelis hidraulinis pasipriešinimas, nepastovus užsikimšimas ir dėmesinga priežiūra, reikia didinti ciklono smulkių dalelių išvalymo efektyvumą. Dėl to tikslinga sustiprinti antrinį srautą. Vienas iš būdų galėtų būti antrinio srauto įtakos didinimas, į jį papildomai įvedant užsuktą oro srautą.

Savo tiriamajame darbe bandysiu pagerinti ciklono smulkesnių nei 40 μm dalelių išvalymo efektyvumą.

Nustatomi tokie pagrindiniai tikslai ir uždaviniai:

Ištirti ciklono darbo efektyvumą, valant dujas, užterštas dulkėmis nuo šlifavimo staklių:

a) sustiprinant antrinį srautą, papildomai užsuktu srautu, nesutampančiu su pirminiu.

b) sustiprinant antrinį srautą, papildomai užsuktu srautu, sutampančiu su pirminiu.

2. ANALITINĖ DALIS

2.1 Veiksniai, lemiantys dulkėto oro išvalymo laipsnį

Nagrinėjant išcentrinį dalelių nusodinimo metodą buvo nustatyta, kad pagrindinę įtaką išcentriniam dalelių nusodinimo procesui turi dalelių masė, dujų tankis bei greitis, dalelių koaguliacija [3].

Kadangi dalelės tankis yra didesnis už oro tankį, dalelę veikia išcentrinės jėgos, užsuktame srovės judėjime dalelės prispaudžiamos prie ciklono sienelių ir krenta į atliekų kaupimo rezervuarą.

Viena iš būtinų sąlygų išcentriniam dalelių nusodinimo procesui – srauto greitis. Todėl dulkių valymo procesas turi būti tiksliai suprojektuotas, atsižvelgiant į visus gamybos technologinius procesus bei naudojamus įrenginius [1].

Sustiprinus antrinį oro srautą valymo įrenginyje, žymiai didėja išcentrinė jėga, kuri veikia dalelę. O tai reiškia, kad dalelė lengviau judės ciklono sienelių link. Tokiu būdu antrinis srautas pagerina ir pagreitina valymo procesą bei padidina įrenginio našumą. Taip sumažėja įrenginio hidrauliniai nuostoliai bei padidėja išvalymo efektyvumas.

Ciklone dujų srovės judėjimas yra turbulentinis. Judėjimo būdas yra charakterizuotas Re skaičiumi:

$$Re_q = \frac{v_t D_k}{\nu}; \quad (3.8)$$

Apskaičiuoti išorinius srovės parametrus:

ν – dujinės aplinkos kinematinis klampumas;

v_t – dujinės srovės tangentinis greitis;

D_k – išmetimo vamzdžio skersmuo.

Skaičiuodami Re srovės greičiams nuo 3 iki 18 m/s, tuo metu gauname $Re > 10^5$, o turbulencija jau prasideda nuo $Re > 10^4$.

Nusodintų dalelių kiekių analizei reikia nustatyti dalelės radialinį poslinkį. Tam tikslui reikia analizuoti vienos dalelės judėjimą, veikiant visoms apkrovoms (**3 pav.**).

Kadangi dalelės tankis ρ_s yra didesnis už oro tankį, dalelė, pasiekdama cikloną su tam tikru pasireiškiančios srovės greičiu, inerciškai stengiasi judėti tiesiai pagal kryptį (**2 pav.**, 1 trajektorija), tokiu būdu yra nukreipiama į ciklono vidinę sienelę (**2 pav.**, 2 trajektorija). Pagal priimtinas prielaidas, tangentinis dalelės greičio komponentas yra lygus srovės greičiui. Radialinis dalelės nukreipimas su greičiu v_r priešinasi aplinkos pasipriešinimo jėgai.

Dalelės judėjimui pasipriešinimo jėga yra apskaičiuojama pagal Stokso formulę:

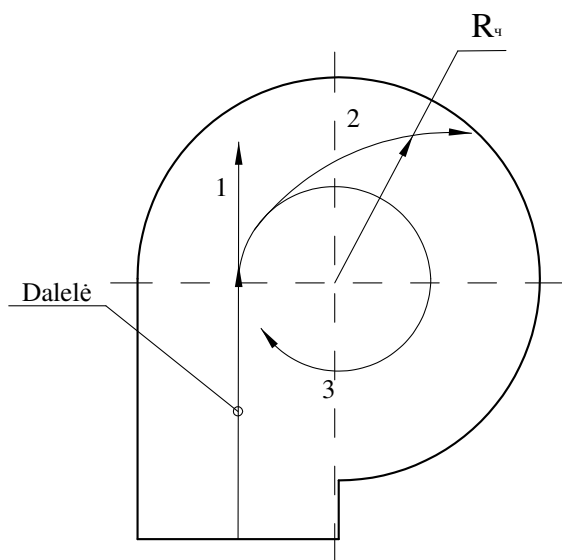
$$F_c = 3\pi\mu v_r d; \quad (3.9)$$

čia μ – dujinės aplinkos dinamiškas klampumas;

v_r – radialinis dalelės greitis;

d – dalelės skersmuo.

Todėl dalelė juda kreivalinijine trajektorija (**2 pav., 2 ir 3 trajektorijos**). Matoma, kad kuo mažesnis dalelės svoris ir didesnis dujinės aplinkos klampumas (o todėl ir inercija), tuo jos judėjimo trajektorija bus arčiau centro (**2 pav., 3 trajektorija**).



2 pav. Dalelės judėjimo trajektorijos

Kreivalinijinės dalelės judėjimo trajektorija atitinka įcentrinio pagreičio jėgą:

$$F_y = \frac{\pi}{6R_q} v_t^2 p d^3; \quad (3.10)$$

čia, ρ – dalelės tankumas,

V_t – tangentinis dalelės greitis,

R_q – dalelės trajektorijos išlinkimo spindulys.

Kadangi pasipriešinimo jėga (F_n) yra vienintelis įcentrinio dalelės pagreičio (F_c) šaltinis, galima užrašyti taip $F_n = F_c$

$$\frac{\pi}{6} * \frac{v_t^2}{R_q} p_s d^3 = 3\pi\mu d v_R; \quad (3.11)$$

Galima manyti, kad po dalelės judėjimo tam tikro laiko ciklone, dalelė juda radialine kryptimi pastoviu greičiu. Tada šis greitis bus apibrėžtas taip:

$$v_R = \frac{v_t^2}{18R_q} p_s \frac{d^2}{\mu}; \quad (3.12)$$

Galimybė pritaikyti Stokso formulę šiam skaičiavimui išreiškiama suskaičiavus Re dalelių skersmens atžvilgiu:

$$\text{Re}_q = \frac{v_R d}{v}; \quad (3.8)$$

čia v – dujinės aplinkos kinematinis klampumas; d – dalelės skersmuo.

Vadinasi, jėgos skaičiavimui, nuo kurio aplinka priešinasi į radialinį dalelės pakeitimą, galima pritaikyti Stokso formulę. Dalelė juda kreivine trajektorija su išlinkimo spinduliu. Kelio apibrėžimui, kuris perduodamas per T , mes priimame dalelės trajektoriją ratui spindulyje, su centru, sutampančiu su ciklono ašimi. $R = R_q$ tada yra laikas, kurį dalelė įveiks atstumu palei ratą, lygus $L = \pi R_q$ lygiui:

$$T = \frac{L}{v_t} = \frac{\pi R_q}{v_t}; \quad (3.13)$$

Šiuo laiku dalelė pakeis padėtį ir radialine kryptimi bus pakeista nuo ciklono centro. Radialinio dalelės pakeitimo skaičiavimui reikia įsitikinti, kad dalelių atsipalaidavimo laikas, per kurį dalelė įgauna dujinės srovės greitį, perleidžiančios tai, yra daug mažiau, negu laikas T , kuriam dalelė bus paleista į ciklono sieną po įcentrinio pagreičio jėgos įtakos.

$$t_{real} \leq T \quad (3.14)$$

Iš čia gauname:

$$\frac{w}{g} \leq \frac{\pi R_q}{v_t}; \quad (3.15)$$

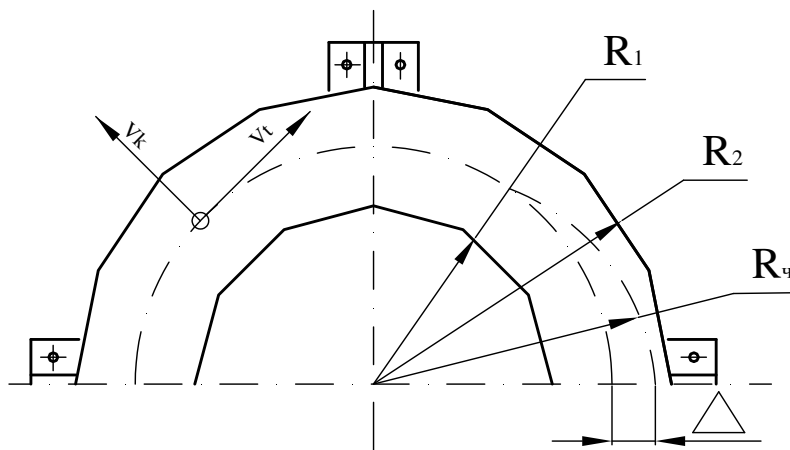
Jei sąlyga yra išlaikyta, galima apskaičiuoti radialinį dalelės pakeitimą maksimalaus dydžio dalelėms (100μ).

Dalelės pakeitimas (**3 pav.**) radialine kryptimi per T bus lygus:

$$\Delta = v_R T = v_R \frac{\pi R_q}{v_t}; \quad (3.16)$$

arba,

$$\Delta = \frac{v_t^2}{18 R_q} p \frac{d^2}{\mu} \frac{\pi R_q}{v_t} = \frac{\pi p}{18 \mu} v_t d^2; \quad (3.17)$$



3 pav. Vienos dalelės judėjimo trajektorija.

2.2 Faktoriai, skatinantys dalelių nusodinimą

Dalelių nusodinimą įtakoja dalelių judėjimo greitis $w(m/s)$, dalelių masė $m (kg)$, dalelių koncentracija, dalelių dydis bei tankis.

Be išvardintų veiksnių, įtakos turi aplinkos temperatūra bei oro klampa, turbulentiškumas, taip pat ir dalelių savybės.

Dalelių tankis. Skiriamos trys tankio sąvokos: faktinė, išpylimo ir menama. Išpylimo tankis, priešingai nuo faktinio, įvertina visas tuštumas, susiformavusius oro tarpus tarp atskirų dalelių. Nuo susigulėjimo šis tankis sumažėja nuo 1,2 iki 1,5 karto. Menamas tankis yra dalelių masės ir jos užimamo tūrio santykis.

Dalelių dispersiškumas tai pagrindinis dalelių iki $100\mu m$ parametras, iš esmės lemiantis oro išvalymo būdo pasirinkimą. Koaguliacijos procese dalelės jungiasi į aglomeratus, tai yra stambėja.

Adhezija – tai dalelių sukibimas su paviršiumi. Ji priklauso nuo molekulinės, elektrinės ir kapiliarinės jėgos.

Dalelių abrazyvumas – tai dalelių mechaninis, abrazyvinis poveikis ortakių ir įrenginių sienelėms. Jis charakterizuojamas metalo dilimo intensyvumu, esant vienodam oro srauto judėjimo greičiui. Ši dalelių savybė yra įvertinama, parenkant sienelių storį, kuriomis teka užterštas oro srautas, taip pat ir medžiagos.

Dalelių abrazyvumas – tai dalelių mechaninis, abrazyvinis poveikis ortakių ir įrenginių sienelėms. Jis charakterizuojamas metalo dilimo intensyvumu, esant vienodam oro srauto judėjimo greičiui.

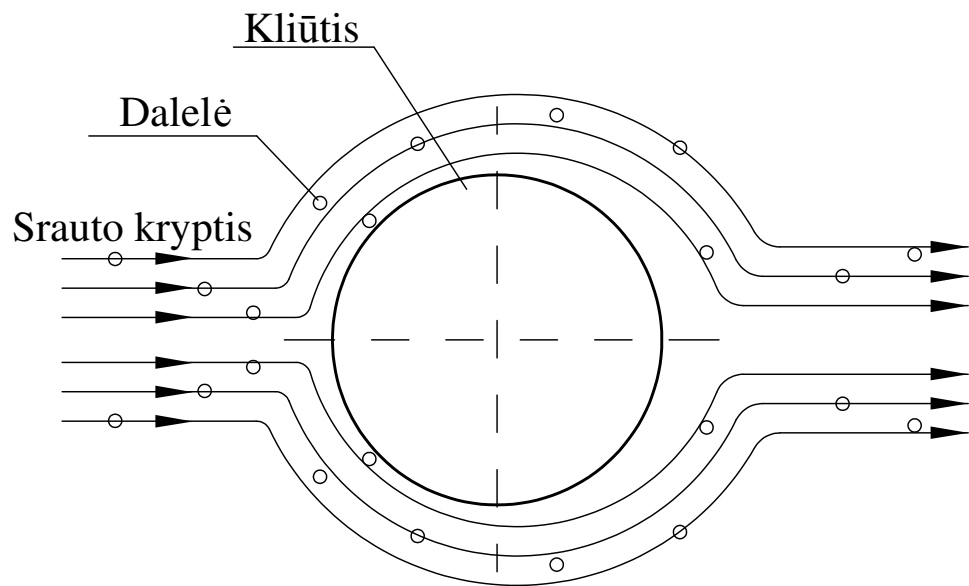
Dalelių vilgumas. Ši dalelių charakteristika nusako dalelių sulaikymą drėgnuose dulkių gaudytuvuose. Pagal vilgumą dalelės skirstomos į 3 grupes:

- hidrofilinės medžiagos – tai tokios, kurios gerai drėkinasi vandeniu (kalis, kvarcas, dauguma silikatų, oksiduoti mineralai);

- hidrofobinės medžiagos – tai tokios medžiagos, kurios blogai drėkinasi vandeniu (grafitas, anglis, siera);

Degamumas ir sprogumas. Besioksiduojančios ore dalelės gali sudaryti sprogius mišinius. Didėjant dulkių temperatūrai, gali įvykti savaiminis užsidegimas. Tai priklauso nuo dulkių cheminės sudėties, jų koncentracijos. Savaiminio užsidegimo savybę turi dauguma organinės kilmės dulkių, taip pat metalų, tokių kaip magnis, aliuminis, cinkas, titanas. Minimali dulkių koncentracija, kuriai esant gali įvykti sproginimas, apytiksliai yra $20-500 g/m^3$, maksimali siekia – $700-800 g/m^3$. Šią ribą lemia ir dujose esančio deguonies kiekis. Kai deguonies mažiau kaip 16 %, dulkių srautas nesprogsta [32].

2.3 Išcentrinio dalelių nusodinimo proceso teoriniai pagrindai

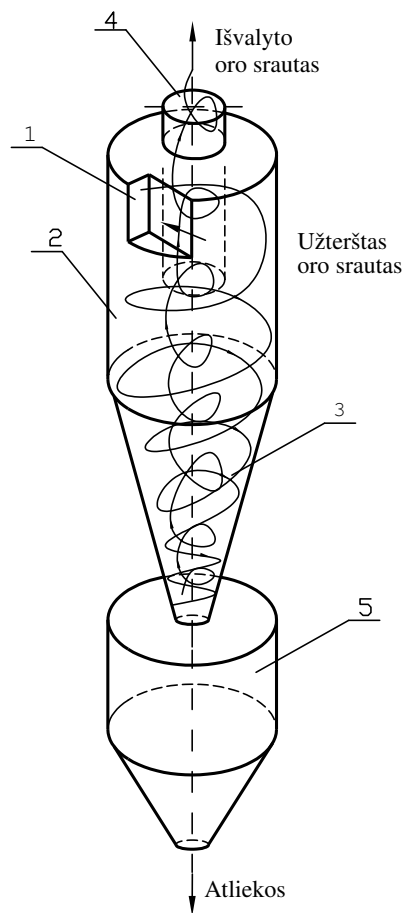


4 pav. Srauto judėjimas su kliūtimi

Dujų srautas su kietomis dalelėmis aplenkia kliūtį (**4 pav.**), dalelės dėl inercijos stengiasi judėti skersai išlenktų dujų trajektorijos linijų ir susiduria su kieto kūno paviršiumi. Toks nusodinimo metodas vadinamas inerciniu [33].

Dulkių nusodinimas ciklonuose yra pagrįstas išcentrinių jėgų dėka. Dulkėtas oras dideliu greičiu tiekiamas į cilindrinę ciklono dalį, kur juda žemyn spiralės pavidalu.

Kadangi dalelės tankis p_s yra didesnis už oro tankį, dalelę veikia išcentrinės jėgos, užsuktame srovės judėjime dalelės prispaudžiamos prie ciklono sienelių ir krenta į bunkerį.



5 pav. Ciklono darbo principas

1 – pirminio srauto tiekimo vamzdis, 2 – cilindrinė ciklono dalis, 3 – kūginė ciklono dalis, 4 - antrinio srauto išėjimo vamzdis, 5 – atliekų kaupimo rezervuaras

Procesai, įvykstantys ciklonuose, yra gana sudėtingi ir priklauso nuo daugelio faktorių [1, 17, 34].

Todėl skaičiuojant pagal teoriją reikia priimti daug prielaidų:

Dispersinė tarša, tiekiamą su oro srove į cikloną, turi sferinės formos pavidalą.

Dalelės tolygiai pasiskirsto ciklono skerspjūvyje.

Dalelės, kurios pasiekia ciklono sienelės, yra prispaudžiamos prie sienelės ir nukrenta į bunkerį (iš tikrųjų, prispaustų dalelių dalis bus atmetama nuo sienelės dujinės srovės turbulentiškumo dėka).

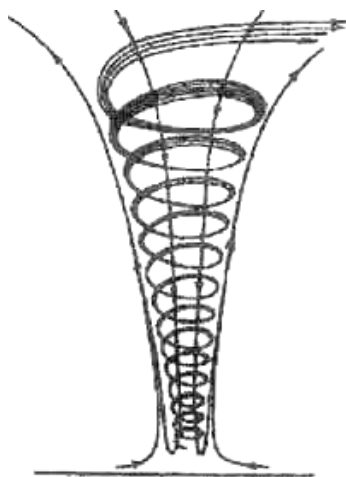
Dulkėtų dalelių koaguliacija ciklone neįvertinama.

2.3.1 Antrinio srauto teoriniai pagrindai

Su sūkuriniais dujų ar skysčių judėjimais susitinkame kiekvieną dieną. Patys didžiausi sūkuriai – tai atmosferos ciklonai ir tornadas, kurie kartu su anticiklonais nustato orus žemėje. Ciklonų diametras siekia net keletą tūkstančių kilometrų. Dujos ciklone juda sudėtingos spiralės pavidalu. Ciklonų centre oro slėgis žymiai mažesnis negu kraštuose, tai įtakoja išcentrinių jėgų veikimas.

Tornado – Šiaurinės pasaulio dalies aplinkos veiksnys (**6 pav.**). Jo veikimas yra pagrįstas tuo, kad piltuvo „sienelės“ – tai besisukančių dideliu greičiu prieš laikrodžio rodyklę dujų srautas. Kur didėjant greičiui statinis slėgis mažėja, „sienelės“ įsiurbia šiltą orą prie žemės paviršiaus kartu su įvairiais daiktais kaip dulkių siurblys [42].

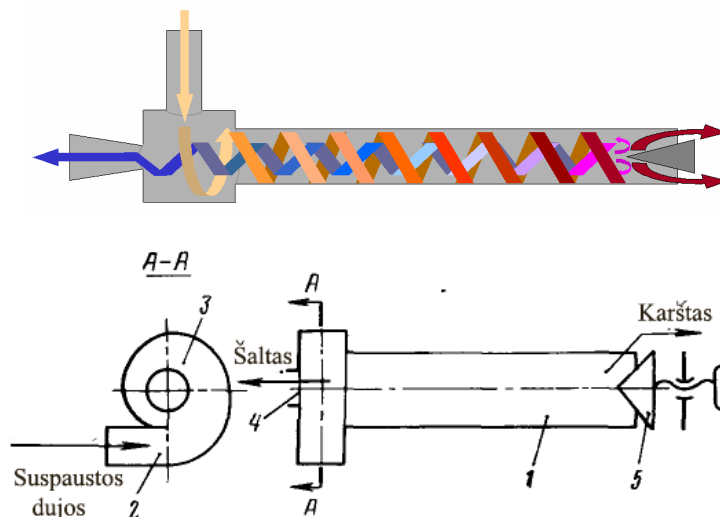
Tornado pakėlimo jėga yra labai didelė, nes pakelia į orą pakankamai didelius daiktus, tokius kaip automobilius, namus ir pan.



6 pav. Tornado schema.

Sūkurio efektas (angl. *Ranque-Hilsch Effect*) – tai dujų ar skysčių atskyrimo efektas cilindrineje ar kūginėje dalyje. Prie sienelių sukasi srautas su aukštesne temperatūra negu centre (užsuktas šaltas priešpriešinys srautas).

Pirmas šį efektą nustatė H. Ranke 1931 m. O 1934 Ranke Amerikoje užpatentavo (patento Nr. 1952281) savo pirmą įrenginį, kurio pavadinimas „Sūkurinis vamzdis“ arba literatūroje „Ranko vamzdelis“ (**7 pav.**) [42].



7 pav. Ranko vamzdelis

1 – tai cilindrinis vamzdelis, kur tangentiškai įvedamas srautas pro įėjimo vamzdį. 2 – įrenginio viduje srautas užsukamas sraigėje. 3 – kreipiamas į cilindrinę dalį, kur ir prasideda atskyrimas (šiltesnės dujos prispaudžiamos prie sienelių, o šaltesnės arčiau centro), pasiekus droselį – 5, šiltos dujos išeina į lauką, o šaltos atsimuša ir grįžta atgal (išmetamos į lauką pro išėjimo vamzdį – 4).

Dabar egzistuoja daug įvairių įrenginių, kurių pagrindą sudaro sūkurio efektas, pvz. sūkuriniai gaudytuvai. Tai įrenginiai, kurie skirti dispersinės fazės atskyrimui išcentrinėmis jėgomis.

Sūkurinis judėjimas – tai dujų ar skysčių judėjimas, kurio tūrio aplinkos apskritiminių greitis nelygus nuliui. Daugeliu atveju tai turbulentinis judėjimas, kuriame dominuoja inercinės jėgos. Gali būti ir laminarinis, bet tik tada, kai dujos ar skystis juda apvalaus skerspjūvio vamzdyje paraboliniu dėsnio, susidaro aptekant lengvai aptekančiu kūnu ar prieš blogai aptekantį kūną.

Projektuojant ciklonus, atkreipiamas dėmesys į bandomuosius duomenis ir eksperimentavimo patirtis gamybos sąlygomis. Teoriškai pagrįsto dulkių valymo proceso esmė ciklonuose iki šiol dar visiškai neišaiškinta, todėl negali atitikti šiuolaikinių reikalavimų.

Paprastai ciklonuose išcentrinis dalelių pagreitis kelis kartus didesnis už laisvo kritimo pagreitį. Todėl, net gana mažos dulkių dalelės negali sekti dujų srovės trajektorijos linijų ir po išcentrinės jėgos veikimo yra nukreipiamos iš dujų judėjimo kreivės sienos kryptimi.

Kadangi dulkių dalelių tankumas didesnis, negu oro tankis ρ , dalelę veikia išcentrinė jėga:

$$F_c = \frac{mv^2}{R}; \quad (3.20)$$

čia m – svoris dalelės [kg], R – atstumas nuo dalelės į ciklono ašį [m].

Po išcentrinės jėgos veikimo dulkių dalelė juda radialine kryptimi link ciklono sienos, gaudama pasipriešinimą šiam judėjimui klampumo pajėgų dėka. Šio pasipriešinimo jėga gali būti apibūdinta Stokso formule (manoma, kad dalelių srautas laminarinis).

$$F = 3\pi v_R \mu d; \quad (3.21)$$

čia v_R – judėjimo dalelės greitis radialine kryptimi [m/s]

d – skersmes dalelės, [m];

μ – dujų klampumas, [Pa s].

$$\frac{mv_T^2}{R} = 3\pi v_R \mu d; \quad (3.22)$$

Radialinio dalelės judėjimo greičio vertė:

$$v_R = \frac{mv_T^2}{3R\pi\mu d} = \frac{d^2 v_T^2 p}{18R\mu}; \quad (3.23)$$

Iš visų judančių sraute dalelių didesnę atstumą praeis ta dalelė, kuri įeidama į cikloną buvo artimiausia ciklono išmetimo vamzdžiui (ciklono centre).

Jo kelias bus lygus: $R_2 - R_1$

Čia:

R_1 – išmetimo vamzdžio ciklono spindulys, [m];

R_2 – cilindrinės dalies ciklono spindulys, [m].

Laikas, per kurį dalelė praeina šį atstumą:

$$\tau = \frac{R_2 - R_1}{v_p}, \quad (3.24)$$

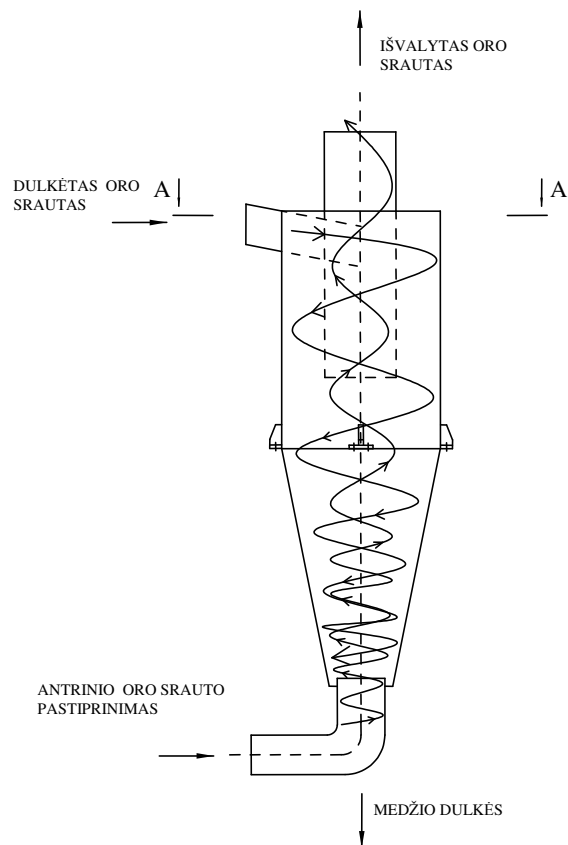
$$d_{\min} = \frac{R_2 - R_1}{v_R} = \frac{18(R_2 - R_1)(R_2 + R_1)\mu}{2v_T^2 d^2 p} = \frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2v_T^2 d^2 p}; \quad (3.26)$$

Iš šios formulės galima surasti minimalų dalelių skersmenį, sugautų ciklone. Pagal prielaidą, visos dalelės, kurios buvo prispaustos prie ciklono sienelės, kurios suspėjo praeiti kelią $R_2 - R_1$, per laiką kai dujinis srautas praeina per cikloną, buvo atskirtos

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{pv_T^2 \tau}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{2\pi p v_T R n}} = \sqrt{\frac{9\mu(R_2^2 - R_1^2)}{\pi p v_T n}} \quad (3.27)$$

Kur n – posūkių skaičius, kuriuos sukuria dujinė srovė ciklone. Paprastai manoma, kad $n=2$.

Duomenys, gauti iš formulių, paprastai skiriasi nuo bandomųjų tyrimų rezultatų. Bandymų rezultatai rodo, kad dalelės su mažesniu dydžiu negu $d_{\min}$ yra nepakankamai sugaunamos ciklone. Tai yra aiškinama padarytomis prielaidomis ir turbulentiškumo įtaka. Tuo tarpu sugaunamos dalelės yra su skersmeniu, didesniu negu $d_{\min}$.



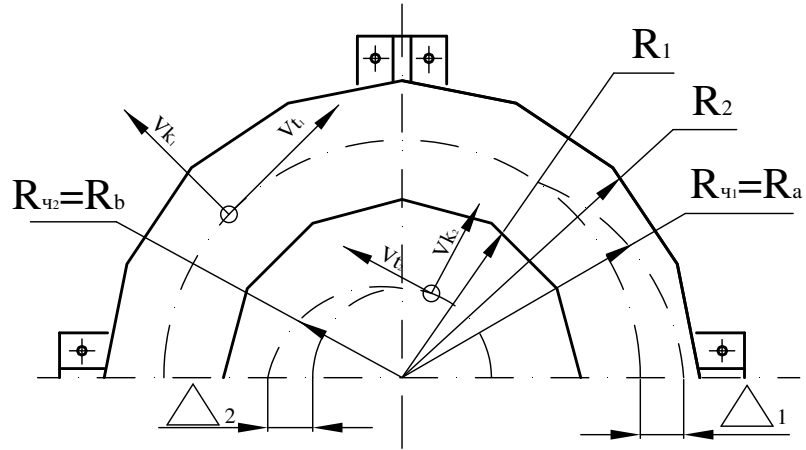
8 pav. Antrinio srauto tiekimo schema.

2.3.2 Antrinio srauto įtakos išcentriniam dalelių nusodinimui

Sustiprinus antrinį priešpriešinį oro srautą valymo įrenginyje, tikiuosiu gauti žymiai didesnę išcentrinę jėgą, kuri veikia dalelę. Tai reiškia, kad dalelė lengviau judės link ciklono sienelių. Tokiu būdu tikiuosiu pagerinti ir pagreitinti valymo procesą bei padidinti įrenginio našumą. Sumažės įrenginio hidrauliniai nuostoliai, kartu ir išvalymo efektyvumas.

Pagrindiniai privalumai, panaudojant antrinį srautą:

- 1) Intensyvesnis dalelių separavimas per visą valymo įrenginio ilgį.
- 2) Efektyvesnis smulkių dalelių išvalymo efektyvumas (iki 40 μm).
- 3) Platus dujų ir dispersinės fazės apkrovos diapazonas.



9 pav. Dalelės judėjimo trajektorija.

Kreivalinijinės dalelės judėjimo trajektorija atitinka įcentrinio pagreičio jėgą:

$$F_{c1} = \frac{\pi}{6R_{q1}} v_{t1}^2 p D^3; \quad (3.40)$$

$$F_{c2} = \frac{\pi}{6R_{q2}} v_{t2}^2 p d^3; \quad (3.41)$$

$$F_c = F_{c1} + F_{c2}; \quad (3.42)$$

Čia,

ρ – dalelės tankumas;

V_{t1} – tangentinis dalelės greitis pirmame dujų sraute;

R_{q1} – dalelės trajektorijos išlinkimo spindulys pirmame dujų sraute;

D – sūkurinio gaudytuvo diametras;

V_{t2} – tangentinis dalelės greitis antriniame dujų sraute;

R_{q2} – dalelės trajektorijos išlinkimo spindulys antriniame dujų sraute;

d – antrinio srauto diametras.

3. ESAMOS PADĖTIES ANALIZĖ

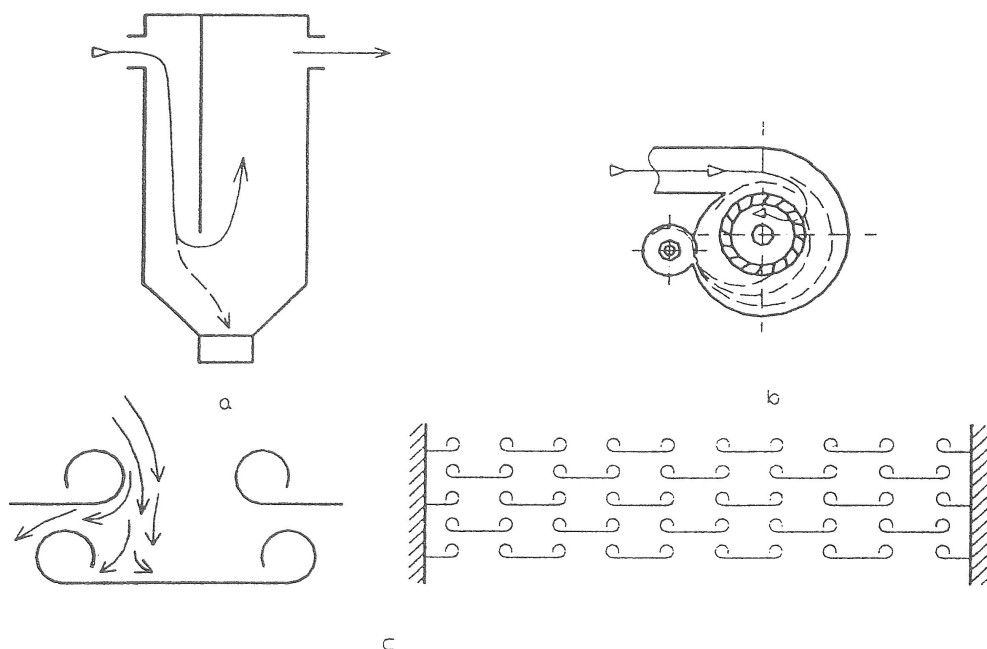
3.1 Naudojamų valymo įrenginių įvairovė

Dulkėtam orui valyti sukurta įvairių būdų ir įrenginių. Atsižvelgiant į dulkių fizines ir chemines savybes, reikalingą išvalymo lygį, dulkių tolesnio naudojimo galimybes, pasirenkami metodai – sausieji arba šlapieji.

Sausieji pirminio valymo įrenginiai pagal dulkių surinkimo būdą skirstomi į gravitacinius ir inercinius, o inerciniai dar būna cikloniniai, žaliuziniai, išcentriniai ir sūkuriniai dalelių sulaikymo įrenginiai bei išcentrinės orapūtės [31].

Sausieji švariojo valymo įrenginiai skirstomi į mechaninius ir elektrinius filtrus. Mechaniniai dar būna pluoštiniai, akytieji ir grūdėtieji, o elektriniai skirstomi į išlydžio ir elektrostatinius.

3.2 Inerciniai oro valymo įrenginiai:



10 pav. Inerciniai oro valymo įrenginiai

a – kamera su pertvara; b – cilindrinės konstrukcijos su žaliuzėmis;

c – su ekranuojančiomis pertvarėlėmis

Labiau yra paplitę žaliuziniai gaudytuvai. Jie gali dirbti esant daug didesniems greičiams – 12 – 15 m/s, hidraulinis pasipriešinimas siekia 100...500 Pa. Dažniausiai jie naudojami dalelėms sulaikyti, kurių dydžiai daugiau kaip 20 μm .

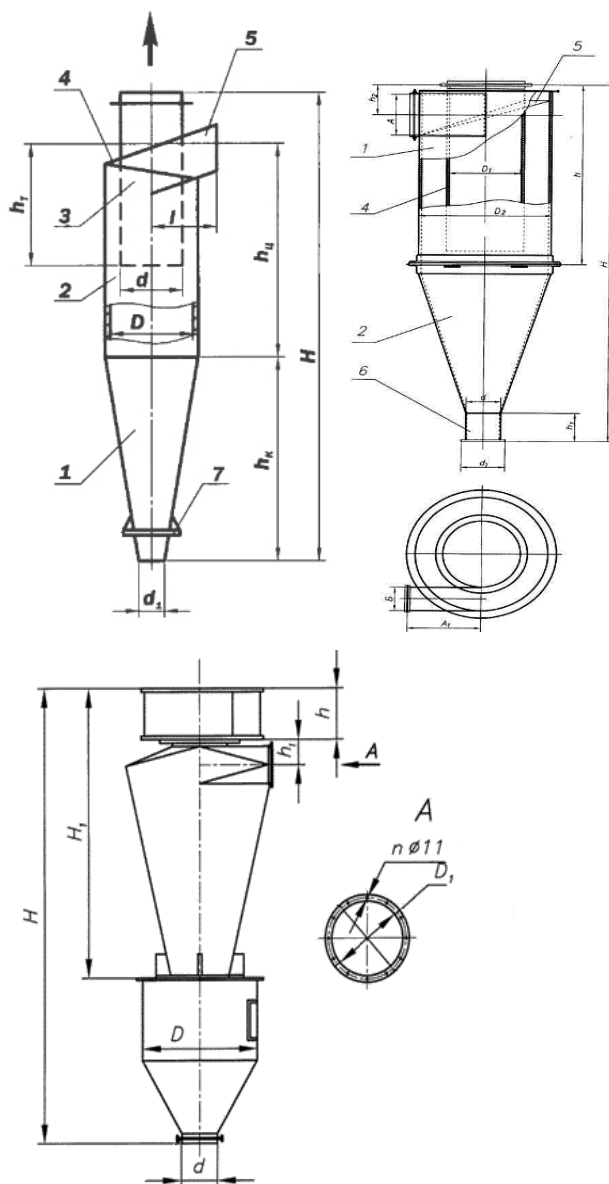
Paprastesnė yra dulkių gaudytuvo su ekranuojamomis pertvarėlėmis (atspindžiais) konstrukcija (**10c pav.**). Pagrindinis šio aparato elementas yra V raidės pavidalo profiliai. Viena iš šio įrenginio teigiamų savybių yra ta, kad jį galima naudoti esant aukštomis darbinėms temperatūroms ir agresyvioms terpėms [33].

3.3 Išcentriniai oro valymo įrenginiai

Labiausiai paplitę ciklonai yra normalizuoti. Bet kuris iš kiekvienų dydžių gali būti išreikštas priklausomai nuo ciklono skersmens D , pagal GOST P 51708-2001 [11].

Dažniausiai naudojamų ciklonų konstrukcijos yra parodytos **6 pav.** Įvairiose šalyse daug mokslinių organizacijų yra užsiėmusios ciklonų projektais: NiIoGaz (Maskva), Sverdlovsko instituto darbo saugumas (Jekaterinburgas), Rostovo valstybinio statybos universiteto (Rostovas prie Dono) ir kiti [31].

Institute NiIoGaz yra išvystyta daug cilindrinį ir kūginių ciklonų (**11 pav.**). Pramonėje plačiai naudojami ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15y, ЦН-24 ciklonai. Skaitmeninis ciklono pažymėjimas atitinka kampą α – polinkis vamzdžio, atnešančio dulkėtą srovę. Šitie ciklonai gali būti pastatyti atskirai arba sugrupuoti – du, keturi, šeši, aštuoni ciklonai [31].



11 pav. Klasikiniai ciklonai

Ciklonai СИОТ (Sverdlovsko darbinio saugumo institutas) yra numatyti sausam dujų valymui, ne pluoštiniam ir ne liekančio tarpusavyje dulkių valymui. Ciklonai СИОТ truputį blogiau valo dujas negu НННІОГаз ciklonai, bet turi tam tikrus pranašumus, tokius kaip dydžių sumažėjimas.

Ciklonai ВІННІООТ prisitaiko prie neliekančių, abrazyvinių dulkių ir taip pat mažai liekančių dulkių (suodžiai, talkas).

Ciklonai su apatinio oro išvedimu. Ciklonai НВГ yra išvystyti ciklonų ІQH – 15 ir СДК – ІQH – 33 pagrindu ir pritaikyti besimaudančių viršuje skysčių gamyboj ir gaudymo kokso dulkių liejyklos gamyboje.

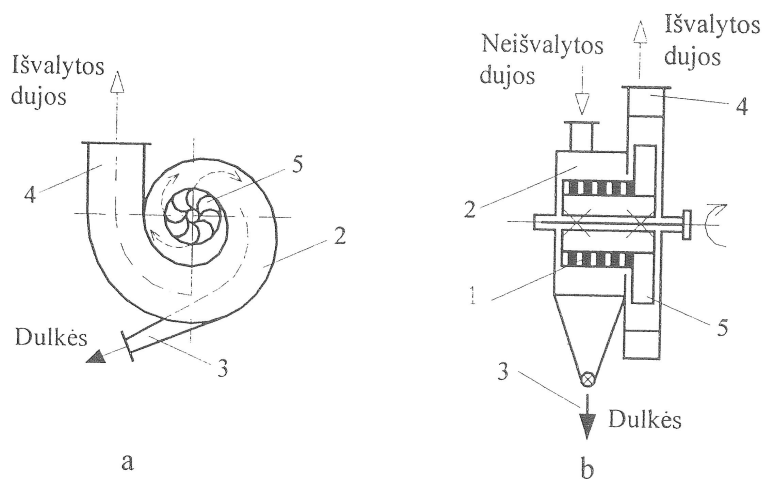
Ciklonas su kūginiu koagulatoriumi (ІКК) naudojamas tam, kad sugautų pluoštines dulkes medvilnės sėklų apdirbime. Taip pat ІКК naudojami medžio apdirbimo pramonėje. Ciklono ypatybė yra papildomas kūginis elementas – kūgis-koagulatorius. Koagulatoriuje koaguliuojasi dulkių dalelės, formuodamos pastovius elementus, todėl ciklono efektyvumas siekia 99% [31].

Reguliuojamas ciklonas ПІ – naudojamas tam, kad sugautų liekančių ir aliejinių dulkių daleles. Tai yra ciklonas su spiraliniu įsiurbiamuoju oru, kuris susisuka spiralės pagalba. Įrenginio ypatumas yra tas, kad jis turi reguliavimo galimybes. Leidžia reguliuoti tiekiamo oro kiekį darbo metu. Tokia konstrukcija leidžia sumažinti didelių dalelių išnešimą iš ciklono, leidžia atlikti dulkių koaguliaciją.

Ciklonas su vidaus recirkuliacija (ІВК) – yra naudojamas tam, kad sugautų sojos ir kitų rūšių neliekančias dulkes. Tai išvystoma ІQH–15 ciklono pagrindu ir skiriasi tuo, kad išmetimo vamzdyje yra plyšio duobės skylė ir spiruoklinis nukreipimo transporteris. To dėka ciklono efektyvumas siekia 99% [31].

3.4 Dinaminės dalelių gaudyklės

Šio tipo gaudyklės dar vadinamos besisukančiais separatoriais, rotacinėmis dulkių gaudyklėmis. Jos irgi yra priskiriamos prie išcentrinio veikimo įrenginių, tačiau yra daug kompaktiškesnės negu ciklonai [33].



12 pav. Dinaminės dalelių gaudyklės:

a – ventiliatoriaus tipo; b – priešingų srautų centrifūgos tipo.

1 – rotorius, 2 – gaubtas, 3 – dalelių surinkimo vamzdis, 4 – išvalyto oro išėjimo vamzdis, 5 – sparnuotė

Ventiliatoriaus tipo dinaminė dulkių gaudyklė (**12a pav.**) yra paprasčiausias dinaminės dulkių gaudyklės tipas. Dirbant ventiliatoriaus sparnuotei – 5, dėl išcentrinio jėgų dalelės yra prispaudžiamos prie gaubto sienelių – 2 ir juda link išvalyto oro išėjimo vamzdžio – 4, oro srauto dalis su didele dalelių koncentracija yra pašalinama per dalelių surinkimo vamzdį – 3. Išvalytas oras yra šalinamas per išvalyto oro išėjimo vamzdį – 4. Šis įrenginys, be dujų valymo funkcijos, dar atlieka ir oro srauto sudarymo įtaiso funkciją, tačiau sunaudoja gerokai daugiau energijos negu paprasti ventiliatoriai. Dulkių sulaikymo efektyvumas yra patenkinamas, kai dalelės dydis viršija $5\ \mu\text{m}$ [32].

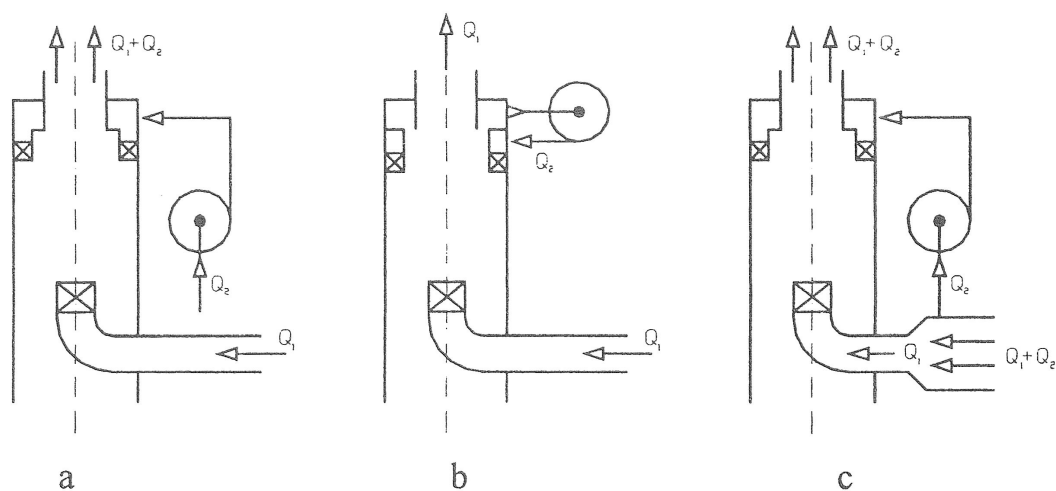
3.5 Sūkuriniai dalelių gaudytuvai

Jų pagrindinis skirtumas nuo ciklonų yra tas, kad juose vietoje grįžtamo srauto yra tiekiamas papildomas įsuktas oro srautas [30].

Sūkurinių dulkių gaudytuvų privalumai lyginant su ciklonais yra šie:

didesnis išvalymo efektyvumas pagal dispersiškumą, jais galima valyti daleles iki $1\ \mu\text{m}$, tai kartais jiems leidžia konkuruoti net su filtrais;

- labai mažas abrazyvinis paviršių dilimas;
- galima valyti aukštos temperatūros dujas, nes papildomu oro srautu jas galima ataušinti;
- galima keisti separacijos dydį, keičiant tiekiamo antrinio oro srauto kiekį.



13 pav. Sūkurinių dalelių gaudytuvų papildomo oro tiekimo schemas:

a – švaraus oro padavimas; b – išvalyto oro padavimas; c – užteršto oro padavimas

Prie trūkumų reiktų priskirti: papildomas įrengimas oro tiekimui, dėl papildomo srauto padidėja oro kiekis, sudėtingesnis aparato valdymas ir eksploatacija.

Papildomas oro srautas gali būti tiekiamas keliais būdais. Ekonominė prasme naudingiausia yra papildomą orą tiekti užterštą dalelėmis. Tuo atveju įrenginio našumas padidėja iki 40 – 65 %, be žymaus išvalymo kokybės sumažėjimo [33].

3.6 Žinomų konstrukcijų ciklonų trūkumai.

Ciklonų trūkumas yra nepakankamas skirtingo dispersiškumo dujų valymo laipsnis, ypač, jei dominuoja mažos dalelės mažiau kaip $40\ \mu\text{m}$.

Ciklono išvalymo laipsnis taip pat smarkiai sumažėja dėl papildomo oro paėmimo iš bunkerio, kur jungiamas su ciklono kūgių ir dulkių išėmimo prietaisuose.

Didelis trūkumas yra hidraulinis pasipriešinimas, atsirandantis dėl galingo sūkurių sudarymo centriniame vamzdyje, kuris padidina energijos sąnaudas ir riboja prietaiso produktyvumą [31].

3.7 Analitiniai ciklono parametrų skaičiavimai

Ciklonų skaičiavimams reikalingi tokie išieities duomenys [1]:

- išvalomų dujų kiekis prie darbo sąlygų L , m^3/h ;
- dujų tankis prie darbo sąlygų ρ_d , kg/m^3 ;
- dinaminė dujų klampa prie darbo temperatūros μ , $Pa \cdot s$
- dispersinė dujų sudėtis, užduodama dviem parametrais δ_{50} (mkm) ir $lg\sigma$ (arba σ);
- pradinis dujų sudulkinimas S_{pr} , g/m^3 ;
- dalelių tankis ρ_m kg/m^3 ;
- reikalingas bendras dujų išvalymo efektyvumas η_0 .

Skaičiavimai gali parodyti, kad prie užduotų sąlygų negalima aprūpinti reikalingo dujų gaudymo efektyvumo arba tam reikalingi per dideli slėgio nuostoliai (t.p. energijos sunaudojimas). Paskutiniame atvejuje tikrai skirtingus schemų dulkių gaudymo ekonominius skaičiavimus gali apibrėžti optimalūs aparatai [27].

Ciklonų skaičiavimas lydimas nuoseklių metodų šia tvarka:

1. Užduodamas ciklono tipas ir priimamas optimalus greitis pagal jo dujų charakteristiką aparate V_c^{opt} (m/s).

2. Nustatomas reikalingas ciklono skerspjuvio plotis:

$$F_c = L / 3600 V_c^{opt}, m^2. \quad (27.4.4)$$

3. Nustatomas ciklono diametras, užduodant ciklonų kiekį n :

$$D = 1000 \sqrt{\frac{F_c}{0,785n}}, mm. \quad (27.4.5)$$

Ciklono diametras apvalinamas iki artimiausios reikšmės iš vienodų rūšių priimto ciklono tipo.

4. Skaičiuoja tikrą dujų greitį ciklone: $V_c = 353,86L/nD^2$. Dujų greitis ciklone neturi skirtis nuo optimalaus daugiau negu 15%.

5. Pagal ciklono charakteristiką priimamas hidraulinio pasipriešinimo koeficientas, atitinkantis užduoto tipo ir ciklono atlikimą - ζ_c .

6. Nustato slėgio nuostolį ciklone $\Delta p = \zeta_c \rho_g V_c^2 / 2$, Pa. Jeigu slėgio nuostoliai pasirodo priimami, pereina prie bendro dujų išvalymo efektyvumo skaičiavimo ciklone. Laikoma, kad išvalymo efektyvumas vienodas tiek vientisame ciklone, tiek ir ciklonų grupėje.

7. Priimant pagal charakteristiką užduoto ciklono tipo parametrus $\delta_{\eta=50}^*$ ir $\lg \sigma_{\eta}$, charakterizuojančius jo efektyvumą, nustatomas reikšmės parametras $\delta_{\eta=50}$ prie darbo sąlygų

$$\delta_{\eta=50} = \delta_{\eta=50}^* \cdot \sqrt{\frac{V_c^*}{V_c} \cdot \frac{D}{D^*} \cdot \frac{\mu}{\mu^*} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_m^*}}, \quad (27.4.6)$$

kur $\delta_{\eta=50}^*$ dalelių dydis, gaudant su 50%, mkm, ciklono diametras $D^*=600$ mm, dujų greitis $V_c^*=3,5$ m/s, dujų klampa $\mu^*=22,2 \cdot 10^{-6}$ Pa·s ir dalelių tankis $\rho_m^*=1930 \text{ kg/m}^3$ - parametrai prie standartinių ciklono darbo sąlygų;

$\delta_{\eta=50}$, D , V_c , μ ir ρ_m - parametrai prie darbinių, skirtingų nuo standartinių ciklono darbo sąlygų.

8. Nustato parametą x pagal formulę
$$x = \frac{\lg(\delta_{50} / \delta_{\eta=50})}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta=50} + \lg^2 \sigma}}. \quad (27.4.7)$$

9. $\Phi(x)$ parametą nustato pagal **lentelę 2**, nusakančią bendrą dujų išvalymo efektyvumą.

Baigiant skaičiuoti gautą reikšmę, η_o sugretina su užduotąja. Jeigu η_o pasirodo mažesnė užduotosios, verta priimti kitą ciklono tipą su didesniu hidraulinio nuostolio koeficientu. Orientaciniais skaičiavimams reikalingos ζ_c reikšmės, siūloma kita priklausomybė:

$$\zeta_{c2} = \zeta_{c1} \cdot \left(\frac{100 - \eta_{o1}}{100 - \eta_{o2}} \right)^2 \cdot \frac{V_{c1}}{V_{c2}} \cdot \frac{D_2}{D_1}, \quad (27.4.8)$$

kur indeksas „1“ priskiriamas prie skaičiuojamųjų, o indeksas „2“ – prie užduotų ciklono parametrų reikšmių.

Keleto įrengtų ciklonų skaičiavimas [1].

Dujų išvalymo efektyvumas įrenginyje, susidedantis iš dviejų arba daugiau nuosekliai įrengtų ciklonų, kuri patogiu nustatyti pagal parcialinį pranerimo grafiką per kiekvieną iš ciklonų, prineštų ant tikimybinės-logaritminės koordinatų sistemos. Skaičiavimas pradedamas tokia tvarka:

1. Nustato $\delta_{\eta=50}$ reikšmę pagal 7 ciklono skaičiavimo punktą kiekvienam iš nuosekliai įrengtų aparatų.

2. Nustato $\delta_{\eta=15,9}$ reikšmę kiekvienam iš ciklonų: $\lg \delta_{\eta=15,9} = \lg \sigma_{\eta} + \lg \delta_{\eta=50}$.

3. Tikimybinije-logaritminėje koordinatinių sistemoje (tinklo ordinatės turi būti pateiktos santykinėmis dalimis) pažymi kiekvieno iš ciklono taškus $\delta_{\eta=50}$ ir $\delta_{\eta=15,9}$. Taškai $\delta_{\eta=50}$ ir $\delta_{\eta=15,9}$ sujungia parcialinėmis tiesėmis pranerimą per ciklonus.

4. Nustato bendrą parcialinį pranerimą per sistemą iš dviejų lygiagrečių įrengtų ciklonų pagal lygybę $\varepsilon_{1,2} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$, kur $\varepsilon_{1,2}$ - bendras parcialinis pranerimas; ε_1 - parcialinis pranerimas pirmam ciklonui; ε_2 - parcialinis pranerimas antram ciklonui. Kreivė $\varepsilon_{1,2}$ - pažymi tą patį grafiką.

5. Nubrėžia tiesią liniją, aproksimojančią kreivę $\varepsilon_{1,2}$ ir randa reikšmes $\delta_{\eta=50}$ ir $\lg \sigma_{\eta}$, charakterizuojančias šią tiesę.

6. Nustato η_o pagal 2 lentelę.

Ventiliatoriaus ir dumsiurblio elektrovarklio veleno galingumas, aprūpinantis ciklono darbą (kVt), nustatomas pagal formulę [2]:

$$N_{\text{var}} = L \cdot \Delta p / (3600 \cdot 1000 \eta_{\text{ven}}^* \eta_{\text{pir}}^*) = L \cdot \Delta p / (3,6 \cdot 10^6 \eta_{\text{ven}}^* \eta_{\text{pir}}^*) \text{ (kVtm)}, \quad (27.4.9)$$

kur L – sistemos našumas, m^3 / h ;

Δp - apskaičiuotas įrenginio pasipriešinimas, Pa;

η_{ven}^* – ventiliatoriaus NPK (priimamas pagal ventiliatoriaus charakteristiką);

η_{pir}^* – perdavimo NPK (prie tiesioginio pasodinimo ant ventiliatoriaus darbinio rato ar ant elektrovarklio veleno $\eta_{\text{pir}}^* = 1$; prie movinės ir pleišdiržinės perdavos $\eta_{\text{pir}}^* = 0,96$).

Elektrovarklio įrengiamas galingumas nustatomas pagal formulę:

$$N_{\text{ir}} = K_{\text{at}} \cdot N_{\text{var}} \text{ (kVt)}, \quad (27.4.10)$$

kur K_{at} – galingumo atsargos koeficientas, priimamas pagal lentelę:

1 lentelė: Galingumo atsargos koeficientas K_{at}

Elektrovarklio ant veleno	Galingumo atsargos koeficientas K_{at}	
	Išcentriniam ventiliatoriams	Ašiniams ventiliatoriams
iki 0,5	1,5	1,2
0,51 - 1	1,3	1,15
1,01 - 2	1,2	1,1
2,01 - 5	1,15	1,05
daugiau 5	1,1	1,05

Jeigu ventiliatorius skirtas transportavimo aplinkai su parametrais, skiriančiais jį nuo normalinių, tai reikia nustatyti sąlyginį slėgį Δp_{sql} :

$$\Delta p_{sql} = \Delta p \cdot \frac{273 + t_d}{293} \cdot \frac{760}{p_{bar}} \cdot \frac{\rho_o}{\rho_d} \text{ Pa}, \quad (27.4.11)$$

čia Δp - apskaičiuojamas įrenginio pasipriešinimas, Pa;

t_d - oro temperatūra, °C;

p_{bar} - barometrinis slėgis vietoje, kurioje įrengtas ventiliatorius, mm gyv. st.;

ρ_o ir ρ_d - oro ir dujų tankis, kg/m³.

Tam, kad būtų galimybė naudoti formules (27.4.4) – (27.4.11), o taip pat nomogramas (**14 pav.**) reikia, kad pagrindinės sąlygos, kurioms buvo rastos frakcinės arba parcialinės išvalymo efektyvumo reikšmės, sutaptų su eksploatuojamo aparato sąlygomis, kurios apibrėžiamos išvalymo efektyvumo reikšmėmis.

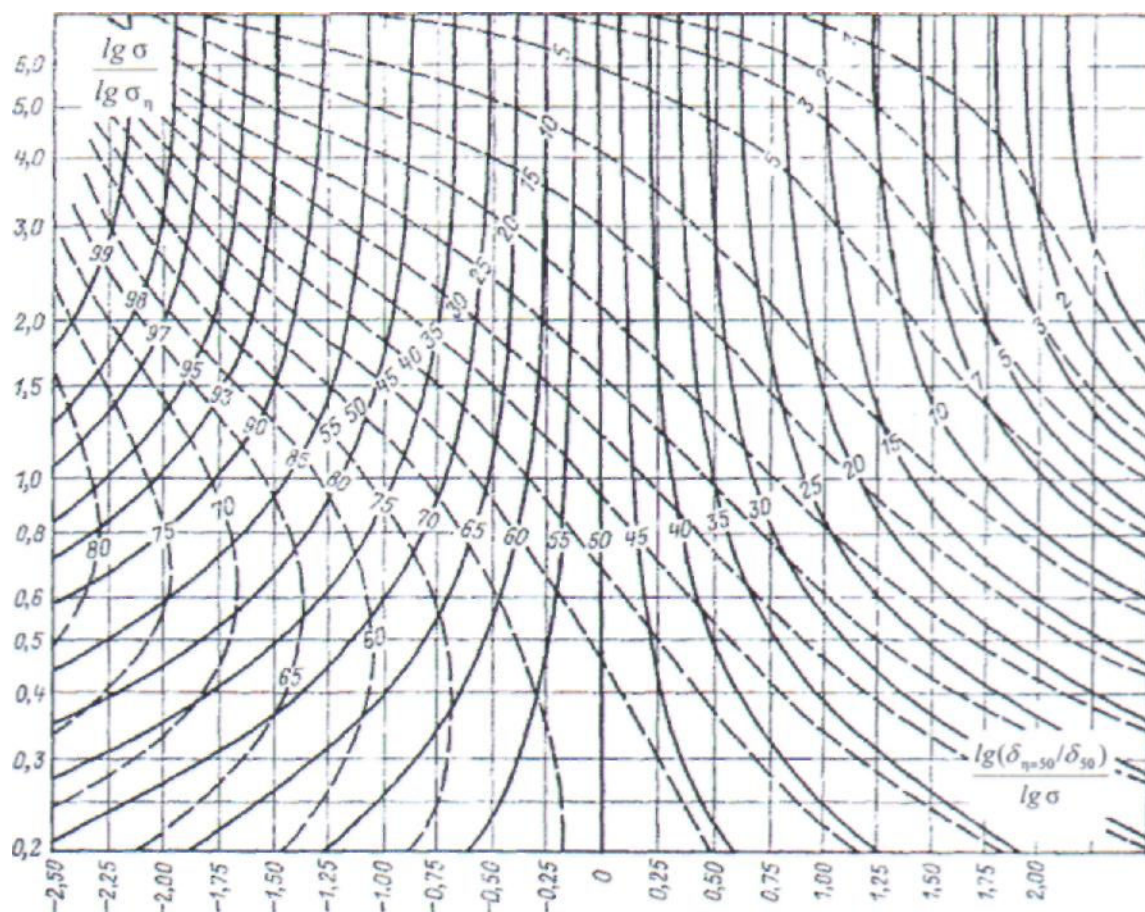
2 lentelė: Normalios funkcijos pasiskirstymo reikšmės

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
-2,70	0,0035	-1,42	0,0778	1 -0,70	0,2420	0,00	0,5000	0,72	0,7642	1,44	0,9251
-2,60	0,0047	-1,40	0,0808	1 -0,68	0,2483	0,02	0,5080	0,74	0,7703	1,46	0,9279
-2,50	0,0062	-1,38	0,0838	-0,66	0,2546	0,04	0,5160	0,76	0,7764	1,48	0,9306
-2,40	0,0082	-1,36	0,0869	-0,64	0,2611	0,06	0,5239	0,78	0,7823	1,50	0,9332
-2,30	0,0107	-1,34	0,0901	-0,62	0,2676	0,08	0,5319	0,80	0,7881	1,52	0,9357
-2,20	0,0139	-1,32	0,0934	-0,60	0,2743	0,10	0,5398	0,82	0,7939	1,54	0,9382
-2,10	0,0179	-1,30	0,0968	-0,58	0,2810	0,12	0,5478	0,84	0,7995	1,56	0,9406
-2,00	0,0228	-1,28	0,1003	-0,56	0,2877	0,14	0,5557	0,86	0,8051	1,58	0,9429
-1,98	0,0239	-1,26	0,1038	-0,54	0,2946	0,16	0,5636	0,88	0,8106	1,60	0,945
-1,96	0,0250	-1,24	0,1075	-0,52	0,3015	0,18	0,5714	0,90	0,8159	1,62	0,947
-1,94	0,0262	-1,22	0,1112	-0,50	0,3085	0,20	0,5793	0,92	0,8212	1,64	0,949
-1,92	0,0274	-1,20	0,1151	-0,48	0,3156	0,22	0,5871	0,94	0,8264	1,66	0,951
-1,90	0,0288	-1,18	0,1190	-0,46	0,3228	0,24	0,5948	0,96	0,8315	1,68	0,953
-1,88	0,0301	-1,16	0,1230	-0,44	0,3300	0,26	0,6026	0,98	0,8365	1,70	0,955
-1,86	0,0314	-1,14	0,1271	-0,42	0,3372	0,28	0,6103	1,00	0,8413	1,72	0,957
-1,84	0,0329	-1,12	0,1314	-0,40	0,3446	0,30	0,6179	1,02	0,8461	1,74	0,959
-1,82	0,0344	-1,10	0,1357	-0,38	0,3520	0,32	0,6255	1,04	0,8508	1,76	0,960
-1,80	0,0359	-1,08	0,1401	-0,36	0,3594	0,34	0,6331	1,06	0,8554	1,78	0,962
-1,78	0,0375	-1,06	0,1446	-0,34	0,3669	0,36	0,6406	1,08	0,8599	1,80	0,964
-1,76	0,0392	-1,04	0,1492	-0,32	0,3745	0,38	0,6480	1,10	0,8643	1,82	0,965
-1,74	0,0409	-1,02	0,1539	-0,30	0,3821	0,40	0,6554	1,12	0,8686	1,84	0,967
-1,72	0,0427	-1,00	0,1587	-0,28	0,3897	0,42	0,6628	1,14	0,8729	1,86	0,968
-1,70	0,0446	-0,98	0,1635	-0,26	0,3974	0,44	0,6700	1,16	0,8770	1,88	0,969
-1,68	0,0465	-0,96	0,1685	-0,24	0,4052	0,46	0,6772	1,18	0,8810	1,90	0,971
-1,66	0,0485	-0,94	0,1736	-0,22	0,4129	0,48	0,6844	1,20	0,8849	1,92	0,972
-1,64	0,0505	-0,92	0,1788	-0,20	0,4207	0,50	0,6915	1,22	0,8888	1,94	0,973
-1,62	0,0526	-0,90	0,1841	-0,18	0,4286	0,52	0,6985	1,24	0,8925	1,96	0,975
-1,60	0,0548	-0,88	0,1894	-0,16	0,4364	0,54	0,7054	1,26	0,8962	1,98	0,976
-1,58	0,0571	-0,86	0,1949	-0,14	0,4443	0,56	0,7123	1,28	0,8997	2,00	0,977
-1,56	0,0594	-0,84	0,2005	-0,12	0,4522	0,58	0,7190	1,30	0,9032	2,10	0,9821
-1,54	0,0618	-0,82	0,2061	-0,10	0,4602	0,60	0,7257	1,32	0,9066	2,20	0,9861
-1,52	0,0643	-0,80	0,2119	-0,08	0,4681	0,62	0,7324	1,34	0,9099	2,30	0,989
-1,50	0,0668	-0,78	0,2177	-0,06	0,4761	0,64	0,7389	1,36	0,9131	2,40	0,991
-1,48	0,0694	-0,76	0,2236	-0,04	0,4840	0,66	0,7454	1,38	0,9162	2,50	0,993
-1,46	0,0721	-0,74	0,2297	-0,02	0,4920	0,68	0,7517	1,40	0,9192	2,60	0,995
-1,44	0,0749	-0,72	0,2358	-0,00	0,5000	0,70	0,7580	1,42	0,9222	2,70	0,996

Sausiems išcentriniamis dulkių gaudytuvams reikšmių intervale $8,5 \leq \zeta_{is} \leq 289$

$$\delta_{\eta=50} = 14,5 \cdot 10^5 \zeta_{is}^{-0,51} \sqrt{\frac{D\mu}{V_{is}\rho_m}}, \text{ čia } D, m \quad (27.4.12)$$

Gaunant formulę (27.4.11) apdirbami duomenys, priklausantys paprastiems ciklonams, taip pat ir prie baterinių ciklonų (multiciklonai) elementų, sūkurinių aparatų, dūminių-dulkių gaudytuvų, liudijančių apie universalų charakterį.



14 pav. Bendro išvalymo efektyvumo nomograma.

3.7.1 Dalelių duomenys, būtini ciklonų efektyvumo skaičiavimams atlikti

Būtina žinoti šiuos dalelių duomenis:

- Dalelės dispersinė sudėtis;
- Dulkėtos medžiagos tankis g/cm^3 .

Dulkės dispersinė sudėtis, dažniausiai pateikiama lentelėje, kurioje pateiktos atskiros dulkėtos medžiagos frakcijų masės ΔD , kurias būtina perskačiuoti į dalelių svorį D , turinčias mažesnę dydį δ . Pagal šiuos D duomenis, reikia sudėti taškus ant logoritminių galimybių koordinačių tinklelio, kur gausime dalelių pasiskirstymo kreivę. Iš ten nustatome dalelių skersmenis δ_{50} ir $\delta_{15,9}$ [28].

Jeigu nėra duomenų apie dispersinę dalelės sudėtį, prieš pateikiant užduotį, dalelių analizė bus tokia: būtina rekomenduoti svorio bandymų arba nuosėdų kaupimosi metodus. Jei nėra galimybės panaudoti sedimentacijos metodo, skystoje aplinkoje galima naudoti oro separacijos metodą (išcentrinis separatorius БАКО).

Jei dalelės yra lipnios arba linkusios sudaryti vientisą kūną, rekomenduojama naudotis tais metodais, kurie nereikalauja būtino dalelės nusodinimo ir antrinės dispergacijos.

Tokiais atvejais geriausia būtų naudotis čiurkšliniais separatoriais-impaktoriais (šių konstrukciją naudoja L.E Karpovo arba НИИОГ АЗ institutai) [28].

Tais atvejais, kai dispersinė dalelių sudėtis pateikta frakcijų pavidalu, pagal dalelių skaičių, tuomet reikia perskaičiuoti jas pagal dalelių frakcijų masę, naudojantis šia formule:

$$\Delta D_i = \frac{n_i \rho_{cp-i}^3}{\sum_{L=1}^i n \cdot \rho_{cp-i}^3} 100, \quad (28.7)$$

dalelių suma n , tenkanti vienam kubiniam vidutiniam dalelės skersmeniui, pradedant pirmąja $i=1/$ ir baigiant paskutiniąja frakcija $i=k/$.

Išnešamą iš ciklono, frakcinę dalelių sudėtį sprendžiame pagal formulę:

$$\Delta D_y = \Delta D \cdot \frac{100 - \eta_\phi}{100 - \eta}, \quad (28.8)$$

Čia,

ΔD_y – dulkių frakcija pagal dalelių masę išnešamų iš ciklonų kartu su oru.

Visų frakcijų masių suma $\sum \Delta D_y$, išskaičiuota iš (8) formulės, turi sudaryti 100%. Jeigu skaičiavimų eigoje reikšmės η_ϕ suma nesudarys 100%, tai į dydį ΔD_y yra įtraukiami atitinkami pataisymai.

Frakcinio išvalymo laipsnis η_ϕ yra randamas pagalbiniam grafike, kuris piešiamas ant logoritmimo galimybių koordinačių tinklelio tiesės pavidalu per du taškus, turinčius šiasordinates:

$$\eta_\phi = 50\% \text{ prie } \delta_\eta = 50 \text{ ir } \eta_\phi = 15,9\% \text{ prie } \frac{\delta_\eta = 50}{1,8},$$

Čia, $\delta_\eta = 50$ – dalelių, gaunamų ciklone su 50% skersmuo nustatomas atsižvelgiant į G.Z paragrafą.

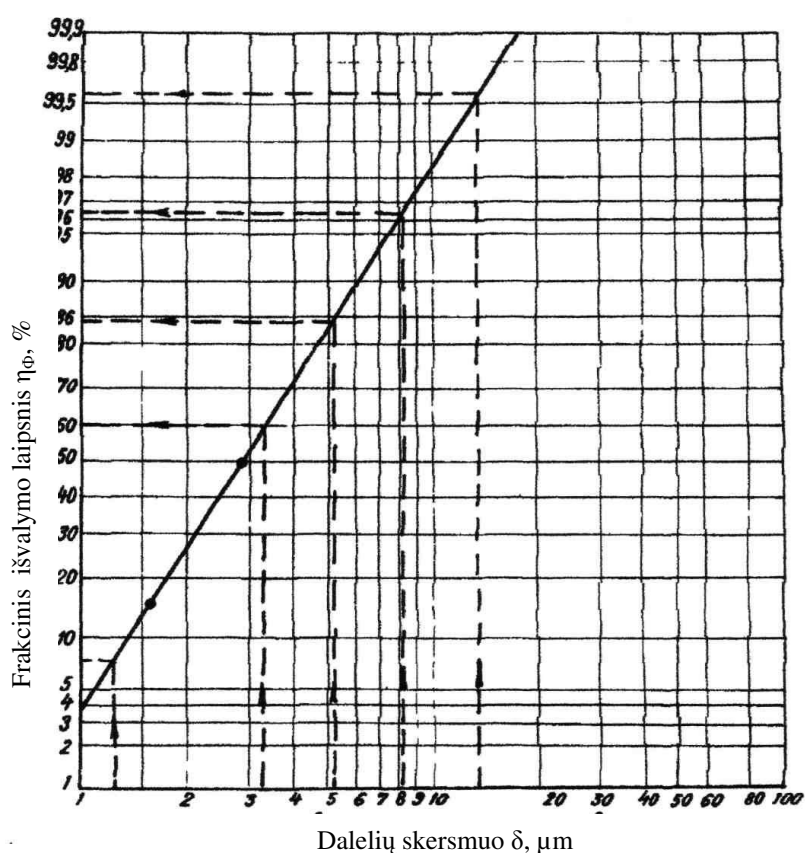
Dydžiai η_ϕ yra randami iš pagalbinio grafiko, pagal atitinkamas vidutinio dalelių frakcijų skersmens reikšmes:

$$\delta_{cp1} = \frac{o + \delta_1}{2} ; \delta_{cp2} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \dots \text{ir t.t.} \quad (28.9)$$

3.7.2 Ciklonų efektyvumo skaičiavimas

Skaičiuojant oro išvalymo laipsnį nuo dulkių pasirinktame ciklono tipe būtina turėti šiuos duomenis:

- Ciklono skersmenį;
- Priimtą hidraulinių nuostolių dydį;
- Oro temperatūrą;
- Dalelių tankį;
- Frakcinę dalelių sudėtį, nusakomą dviem parametrais δ_{50} ir σ ;
- Dalelės skersmenį, išgaudomų ciklone apie 50% ($\delta_{\eta} = 50$).



15 pav. Frakcinis išvalymo laipsnis

Dalelių skersmenys, išgaudomų apie 50% ($\delta_{\eta} = 50$), skirtingiems ciklonams pavaizduoti grafike. Grafikai sudaryti pagal gautus duomenis iš tyrinėjimų, kuriuose buvo naudotos kvarcinės dulkės su tankiu $2,65 \text{ g/cm}^3$, kai aplinkos temperatūra 20°C [29].

Tais atvejais, kai dalelių tankis nėra lygus $2,65 \text{ g/cm}^3$, būtina perskaičiuoti gautus

$$\text{dydžius iš grafiko pagal formulę } \tilde{\delta}_{\eta=50} = \sqrt{\frac{2,65}{\rho_T}} \cdot \delta_{\eta=50}, \quad (29.10)$$

Čia, $\tilde{\delta}_{\eta=50}$ – dalelių skersmuo išgaudomų ciklone 50%, kai dalelių tankis ρ_T .

Kai aplinkos temperatūra nėra lygi 20^0 , gautą dydį $\tilde{\delta}_{\eta=50}$ būtina perskaičiuoti pagal

$$\text{formulę } \tilde{\tilde{\delta}}_{\eta=50} = \sqrt{\frac{M}{183,10^6}} \cdot \tilde{\delta}_{\eta=50}, \quad (29.11)$$

Kur $\tilde{\tilde{\delta}}_{\eta=50}$ – dalelių skersmuo išgaudomų ciklone 50%, kai dalelių tankis ρ_T ir oro klampumas M .

3 lentelė: Išvalymo parametrai

Dalelių skersmuo $\delta, \mu\text{m}$	2,5	2,5-4	4-6,3	6,3-10	10-16	16-25	25-40	40-63	63-100	>100	Viso
Vidiniai skersmenys pagal frakciją $\delta_{cp}, \mu\text{m}$	1,25	3,25	5,15	8,15	13,0	20,5	32,5	51,5	81,5	-	
Dalelių masė pagal frakciją $\Delta D, \%$	5,8	3,4	5,8	6,5	9,5	11,2	11,8	11,0	6,0	29	100
Frakciniai valymo laipsniai $\eta_\phi, \%$	8,5	60	85	96,6	99,5	100	100	100	100	100	
$\Delta D_y, \%$	68,0	17,4	11,15	2,83	0,62	0	0	0	0	0	100

Tam, kad nustatytume bendrą išvalomo oro laipsnį nuo dulkių logaritminiame galimybių tinkelyje, iš taško ant abscisės $\delta_{\eta=50}$ brėžiamas spindulys, atitinkantis reikšmę $\sigma = \frac{\delta_{50}}{\delta_{15,9}}$. Atstatome perpendikuliarą iš taško δ_{50} ant abscisės ašies, randame susikirtimo tašką su įvestu spinduliu. Šio taško ordinatė atitinka išvalomo oro laipsnį.

Nustatant ciklonų efektyvumą, galima naudotis logaritmine galimybių liniuote ЛИОТ, gaminama СК5 ЛИОТ (Sankt Peterburgas, 187, Furmanova).

Nustatant ciklonų efektyvumą СИОТ ir ВЦНИИОТ, naudojantis užduotais oro sunaudojimo kiekiais ir hidrauliniu pasipriešinimu, pagal **15 pav.** randame dalelių skersmenis, išgaudomų šiame aparate iki 50% ($\delta_{\eta=50}$). Pagal gautą dydį $\delta_{\eta=50}$, nustatome bendrą ciklono efektyvumą ЦН – 15, kuris lygus ieškomam išvalomo oro laipsniui ciklonuose СИОТ ir ВЦНИИОТ [38].

3.8 Išvalymo efektyvumo didinimo kryptų analizė

Labai svarbu yra tai, kad atliekami oro valymo tyrimai nuo dulkių. Analizuojant oro valymo būdus nuo dulkių panaudojant ciklonus buvo nustatyta, kad dabar esamos skaičiavimo metodikos yra netobulos.

Šiuo metu visi ciklonų parametrų skaičiavimai yra vykdomi tik pagal formules, teoriškai, neanalizuojant hidraulikos proceso įtakos.

Ciklono išvalymo efektyvumas 0,85. Todėl ciklonai naudojami tik grubiam dulkėtam oro srautui valyti, o švariam valymui papildomai naudojami rankoviniai filtrai, kurių išvalymo efektyvumas siekia 0,99. Norint atsisakyti filtrų, kurie turi pakankamai trūkumų, tokių kaip didelis hidraulinis pasipriešinimas, pastovus užsikimšimas ir dėmesinga priežiūra, yra tikslinga didinti smulkesnių negu 40 μm dispersiškumo dalelių ciklono išvalymo efektyvumą. Dėl to tikslinga sustiprinti antrinį srautą, įvedant papildomai į jį užsuktą oro srautą. Tam tikslui pasiekti buvo suprojektuotas eksperimentinis stendas.

4. EKSPERIMENTAS IR JO REZULTATŲ ĮVERTINIMAS

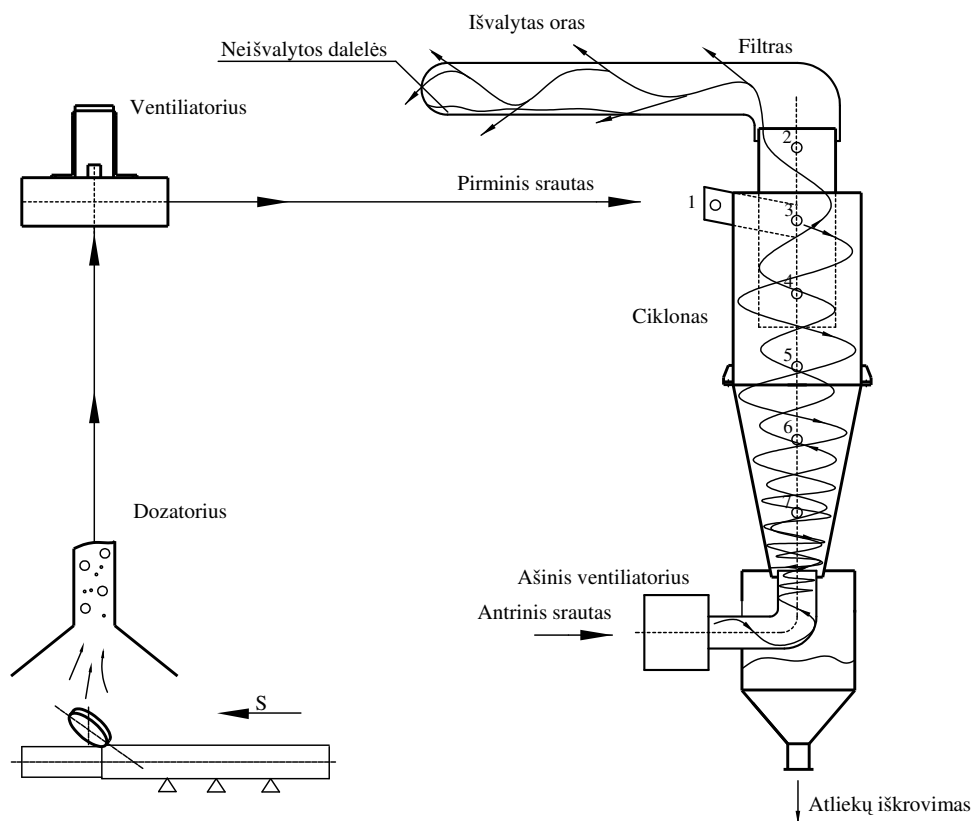
4.1 Tiriamojo stendo aprašymas

Analizuojamas ciklono išvalymo efektyvumas nuo medžio drožlių iš medienos šlifavimo staklių (16 pav.).

Oro srautų debitai: dulkėto oro srautas $Q_d = 500 \text{ m}^3/\text{val}$; antrinio oro srautas $Q_a = 171,5 \text{ m}^3/\text{val}$; dalelių dydis, priimtas iš statistinių duomenų (nuo šlifavimo staklių) – $1 - 40 \mu\text{m}$.

Tiriamojo darbo stendas susideda iš:

- Dozatoriaus, kur dozuojamos kietos dalelės.
- Ventiliatoriaus, formuojančio pirminį srautą į valymo įrenginį.
- Ašinio ventiliatoriaus, papildančio antrinį srautą.
- Valymo įrenginio – ciklono.
- Rankovinio filtro, kuris užtikrina $0,5 \mu\text{m}$ dalelių išvalymą.
- Atliekų iškrovimo rezervuaro.



16 pav. Tiriamojo stendo schema

Pagrindinis tyrimo objektas – tai ciklono antrinio srauto pokyčio įtaka išvalymo kokybei.

Antrinį srautą sustiprino papildomai tiekiamas užsuktas oro srautas ašiniu ventiliatoriumi iš apačios į ciklono centrinę dalį (stende yra numatyta galimybė keisti užsukimo kryptį). Išvalytas oras papildomai valomas filtre, kuriuo dėka buvo nusodinamos neišvalytos dalelės. Filtas užtikrina $0,5 \mu\text{m}$ dalelių išvalymą.

Išvalymo efektyvumas buvo nustatomas atsižvelgiant į visų dozuojamų kietų dalelių ir sugautų filtre dalelių masės skirtumą. Neišvalytos dalelės – tai tos, kurios buvo nusodintos filtre.



17 pav. Tiriamasis stendas

4.2 Tyrimų darbo metodika

1. **Tiriamąjo stendo projektavimas.** Buvo suprojektuotas dulkėto oro valymo įrenginys – ciklonas su galimybe sustiprinti antrinį oro srautą ciklone ir keisti užsukimo kryptį.
2. **Montavimas aplinkosaugos laboratorijos patalpoje.**
3. **Tyrimo eiga.**

Bandymai padalinti į keletą etapų:

1 bandymas: Ciklono išvalymo efektyvumo nustatymas be antrinio srauto pastiprinimo.

Ventiliatoriaus, tiekiančio pirminį, užteršto kietosiomis dalelėmis oro srautą, parametrai: $Q=500 \text{ m}^3/\text{val.}$; $P=2000 \text{ Pa}$.

2 bandymas: Ciklono išvalymo efektyvumo nustatymas, pastiprinant antrinį srautą ašiniu ventiliatoriumi, kuriuo tiekiamas nesutampantis su pirminiu antrinis srautas ($Q=171,5 \text{ m}^3/\text{val.}$, $P=0,2 \text{ kPa}$)

3 bandymas: Ciklono išvalymo efektyvumo nustatymas, pastiprinant antrinį srautą ašiniu ventiliatoriumi, kuriuo tiekiamas sutampantis su pirminiu antrinis srautas ($Q=171,5 \text{ m}^3/\text{val.}$, $P=0,2 \text{ kPa}$).



18 pav. Ašinio ventilatoriaus tvirtinimo vieta

Darbo metu kontroliuojamas aerodinaminis pasipriešinimas ir įrenginio darbo efektyvumas.

Įrenginio išvalymo efektyvumas

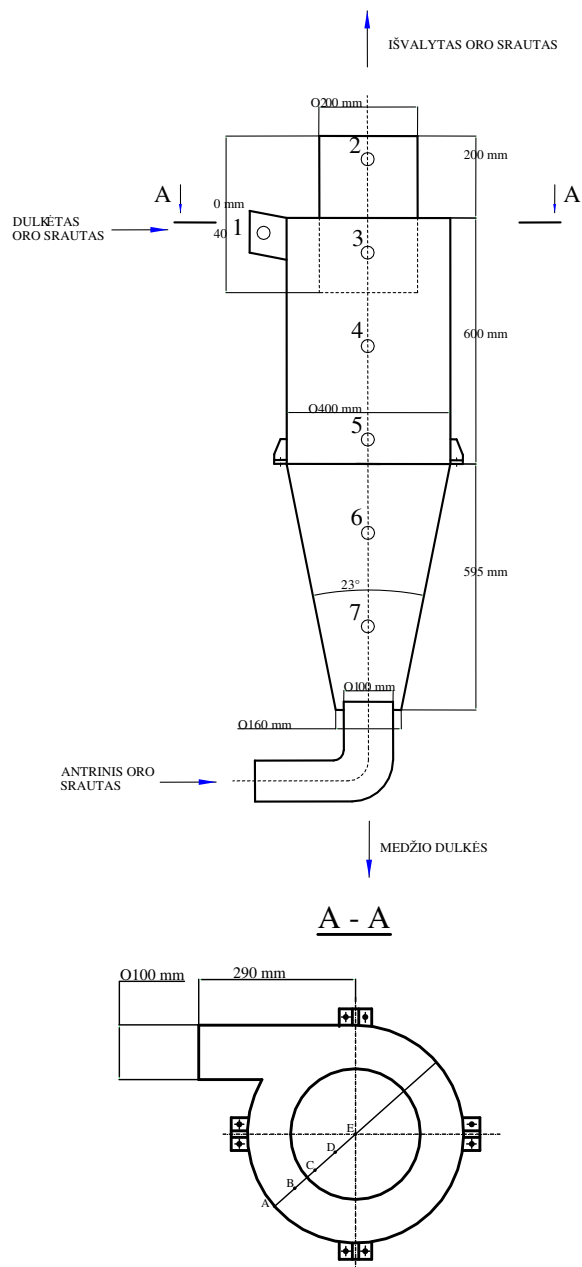
Nustatant įrenginio išvalymo laipsnį matuojamas oro dulkėtumas prieš ir po įrenginio valymo.

Dulkėtumas matuojamas filtravimo metodu, panaudojant UAB „Kadis“ rankovinį filtrą, kuris užtikrina 0,5 μm dalelių išvalymą, sveriant jį po kiekvieno bandymo. Tokiu būdu nustatomas svorių skirtumas – o tai neišvalytų dalelių masė.

Neišvalytų dalelių dydis buvo nustatytas iš žinytų (iki 40 μm).

Aerodinaminis pasipriešinimas nustatomas matuojant dinaminį ir statinį oro srauto slėgį eksperimentinio stendo (**19 pav.**) 1 – 7 taškuose prie sienelių ir įrenginio viduryje (A – E taškuose), kiekviename pjūvyje [29].

Matuojant ant įėjimo (1 taškas)/išėjimo (2 taškas) eksperimentinio stendo (**19 pav.**) vamzdžių nustatomas įrenginio hidraulinis pasipriešinimas.



19 pav. Eksperimentinis standas

4.2.1 Matavimo priemonės

Pagrindiniai oro srautų matavimai atliekami „Testo 435“ prietaiso pagalba.

„Testo 435“ – daugiavfunkcis matavimo prietaisas (**20 pav.**), skirtas oro srautų parametrams nustatyti.

4 lentelė: Prietaiso „Testo 435“ techniniai parametrai

Darbinė temperatūra	-20 ... +50 °C
Saugojimo temperatūra	-30 ... +70 °C
Maitinimo elementas	3xAA
Baterijos talpa	200 val.
Svoris	428 g.
Matmenys	220 x 74 x 46 mm
Korpusas	ABS/TPE/Metal
	Absoliutaus slėgio matavimas
Matavimo diapazonas	0 ... 2000 gPa
Matavimo tikslumas	0.1 gPa
	-
	Greičio matavimas
Matavimo diapazonas	0 ... 60 m/c
Matavimo tikslumas	0.01 m/c (D=60 mm), 0.1 m/c (D=16 mm)

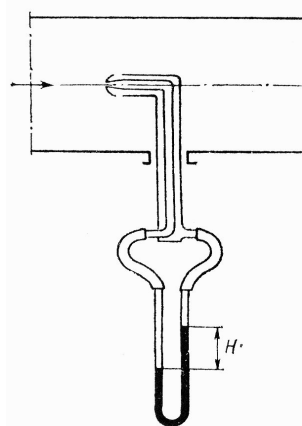


20 pav. Dagiavfunkcis matavimo prietaisas „Testo 435“

Slėgio matavimai atliekami klasikiniu metodu, panaudojant elektroninį monometrą „Testo 506“ (matavimo riba nuo 0 iki 200 hPa) (**21 pav.**) ir Pito vamzdelį (**22 pav.**), nukreipus jį vertikaliai z-ašies kryptimi ir horizontaliai – priešingai srauto judėjimo kryptčiai.



21 pav. Diferencialinis monometras „Testo 506“



22 pav. Pito vamzdelis



23 pav. Matavimo procesas

Dulkių masė bei išvalymo efektyvumas nustatomi sveriant filtrą prieš ir po bandymo. Tam tikslui naudojamos elektroninės svarstyklės „Daewoo Int. DI-8254“ (**24 pav.**) (matavimo ribos nuo 1 iki 7000 g).



24 pav. Svarstyklės „Daewoo Int. DI-8274“

4.2.2 Bandymų atlikimo eiga

1 bandymas:

- 1) Nustatoma UAB „Kadis“ rankovinio filtro masė m_{f1} prieš bandymą.
- 2) Paleidžiamas stendas su ciklonu be papildomo oro tiekimo ir nustatomi aerodinaminiai pasipriešinimai kiekviename anksčiau nurodytame taške (**19 pav**). Braižomos slėgio epiūros, pritaikant prie įrenginio skerspjūvio.
- 2) Dozuojamos dulkės nuo šlifavimo staklių, kurių bendra masė $m=3,0$ kg.
- 3) Eksperimento pabaigoje, išjungus pirminį srautą tiekiantį ventiliatorių, po bandymo fiksuojama rankovinio filtro masė m_{f2} .

- 4) Skaičiuojama neišvalytų dalelių masė: $m_{d1} = m_{f1} - m_{f2}; [g]$

- 5) Nustatomas ciklono išvalymo efektyvumas.

2 bandymas:

- 1) Nustatoma UAB „Kadis“ rankovinio filtro masė m_{f5} prieš bandymą.
- 2) Paleidžiamas stendas su ciklonu, pastiprinant antrinį srautą ašiniu ventiliatoriumi, kuriuo yra tiekiamas antrinis srautas, nesutampantis su pirminiu. Nustatomi aerodinaminiai pasipriešinimai kiekviename anksčiau nurodytame taške (**19 pav**). Braižomos slėgio epiūros, pritaikant prie įrenginio skerspjūvio.
- 2) Dozuojamos dulkės nuo šlifavimo staklių, kurių bendra masė $m=3,0$ kg.
- 3) Eksperimento pabaigoje, išjungus pirminį srautą tiekiantį ventiliatorių, po bandymo fiksuojama rankovinio filtro masė m_{f6} .

- 4) Skaičiuojama neišvalytų dalelių masė: $m_{d3} = m_{f5} - m_{f6}; [g]$

- 5) Nustatomas ciklono išvalymo efektyvumas.

3 bandymas:

- 1) Nustatoma UAB „Kadis“ rankovinio filtro masė m_{f3} prieš bandymą.
- 2) Paleidžiamas stendas, pastiprinant antrinį srautą ašiniu ventiliatoriumi, kuriuo tiekiamas antrinis srautas, sutampantis su pirminiu. Nustatomi aerodinaminiai pasipriešinimai kiekviename anksčiau nurodytame taške (**19 pav**). Braižomos slėgio epiūros, pritaikant prie įrenginio skerspjūvio.
- 2) Dozuojamos dulkės nuo šlifavimo staklių, kurių bendra masė $m=3,0$ kg.
- 3) Eksperimento pabaigoje, išjungus pirminį srautą tiekiantį ventiliatorių, po bandymo fiksuojama rankovinio filtro masė m_{f4} .
- 4) Skaičiuojama neišvalytų dalelių masė: $m_{d2} = m_{f3} - m_{f4}; [g]$
- 5) Nustatomas ciklono išvalymo efektyvumas.

Po trijų bandymo etapų gauti rezultatai apdorojami ir palyginami tarpusavyje, daromos atitinkamos išvados.

Atliekant tyrimus, bandant nustatyti antrinio srauto greičių ir išvalymo efektyvumo priklausomybę, buvo nustatyta, kad antrinio srauto slėgis $P=0,2$ kPa, o debitas $Q=171,5$ m³/val. Didinant slėgį bei debitą nebuvo parinktas šių parametų optimalus diapazonas. Dėl šios priežasties nenustatytas efektyviausias antrinio srauto slėgis bei debitas. Siekiant tiksliau apibrėžti antrinio srauto parametrus, reikalingi papildomi tyrimai.

4.3 Tyrimo rezultatų analizė

1-ojo bandymo rezultatai:

Prieš bandymą filtro svoris $m_{f1}=732$ g

Po bandymo $m_{f2}=779$ g

Neišvalytų dalelių masė: $m_{d1} = m_{f2} - m_{f1} = 779 - 732 = 47$ g.

Išvalymo efektyvumas siekia $\eta=98,43$ %

2-ojo bandymo rezultatai:

Prieš bandymą filtro svoris $m_{f3}=779$ g

Po bandymo $m_{f4}=785$ g

Neišvalytų dalelių masė: $m_{d2} = m_{f4} - m_{f3} = 785 - 779 = 6$ g.

Išvalymo efektyvumas siekia $\eta=99,8$ %

3-iojo bandymo rezultatai:

Prieš bandymą filtro svoris $m_{f5}=785$ g

Po bandymo $m_{f6}=787$ g

Neišvalytų dalelių masė: $m_{d3} = m_{f6} - m_{f5} = 787 - 785 = 2$ g.

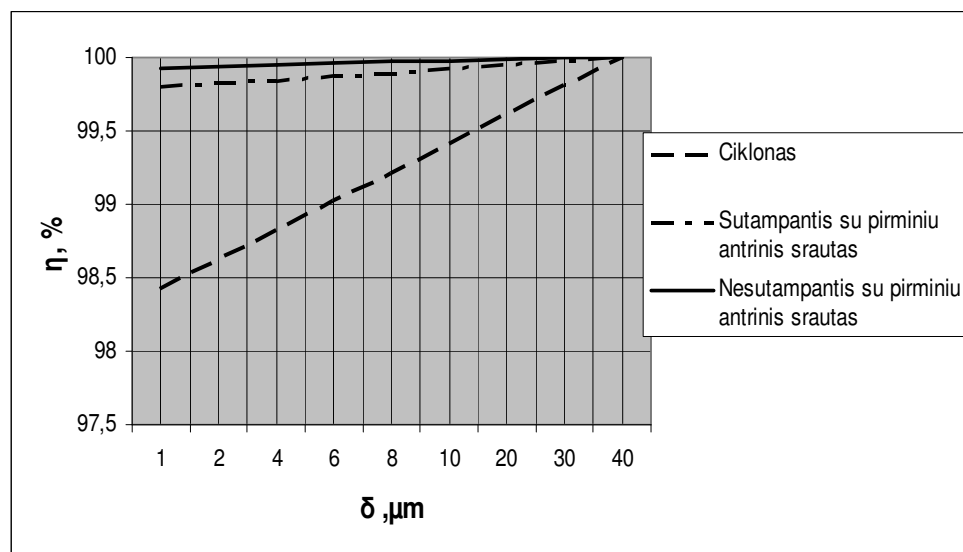
Išvalymo efektyvumas siekia $\eta=99,93$ %

Darbo metu buvo nustatyta, kad išvalymo kokybę įlemia dalelių charakteristikos, srautų užsukimo ir tiekimo kryptys bei srautų greičiai.

Sustiprinant arba sumažinant antrinį srautą įrenginyje buvo nustatytas išvalymo kokybės pokytis.

Sutampantis antrinis srautas neženkiai gerina išvalymo efektyvumą, o panaudojant nesutampantį su pirminiu antrinį srautą, jo išvalymo efektyvumas siekia 99,93 %.

Išvalymo efektyvumas pagal frakcijas pavaizduotas **25 pav.**

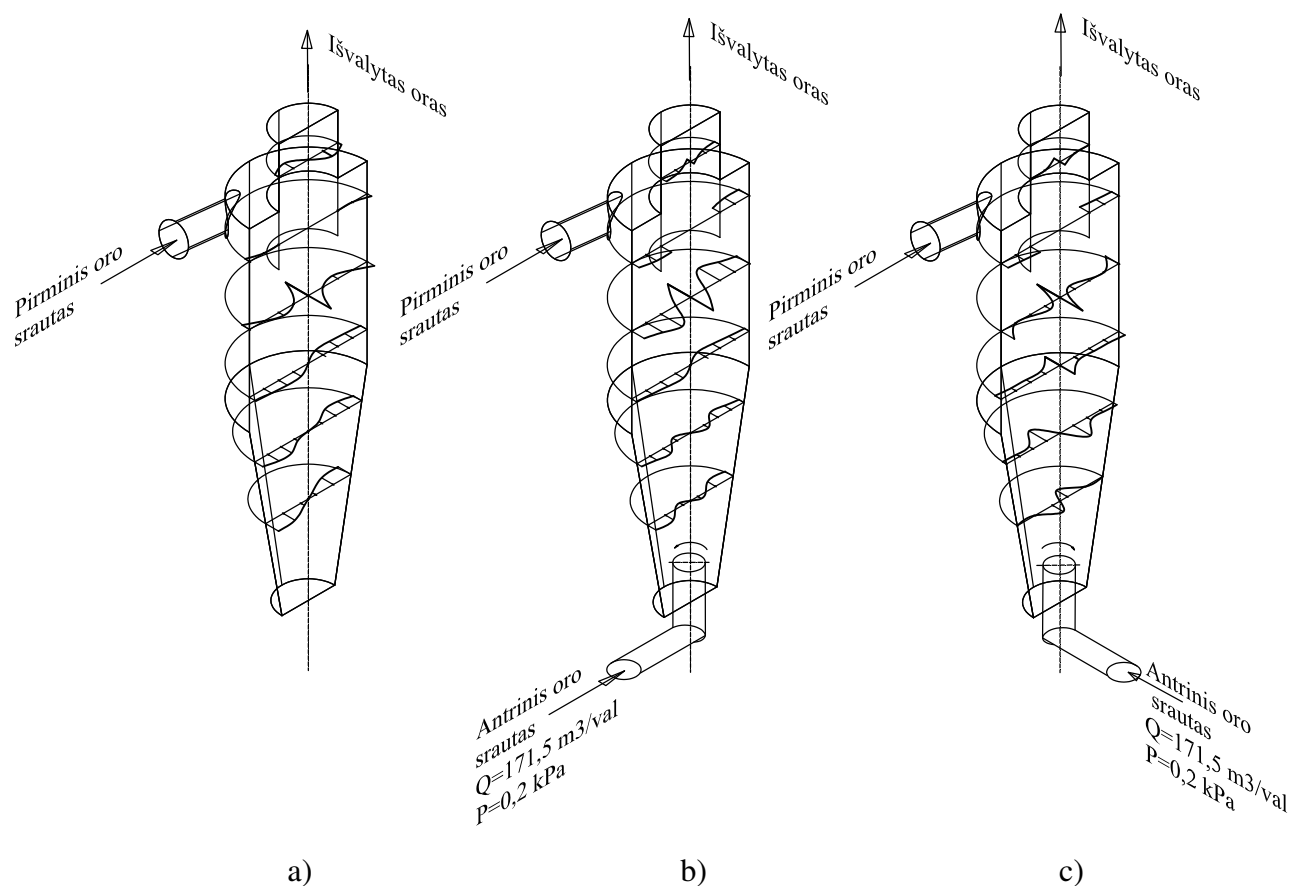


25 pav. Išvalymo efektyvumas pagal frakcijas

Iš diagramos matome, kad ciklono su antriniu srautu, užsukto priešinga kryptimi negu pirminis srautas, 1 μm dalelių išvalymo efektyvumas siekia 99,93 %, o tai žymiai efektyviau negu naudojant klasikinį cikloną.

Tam, kad akivaizdžiai būtų pastebimas antrinio srauto pokytis valymo įrenginyje, buvo atlikti srautų slėgio matavimai skirtinguose valymo įrenginio taškuose (**19 pav.**).

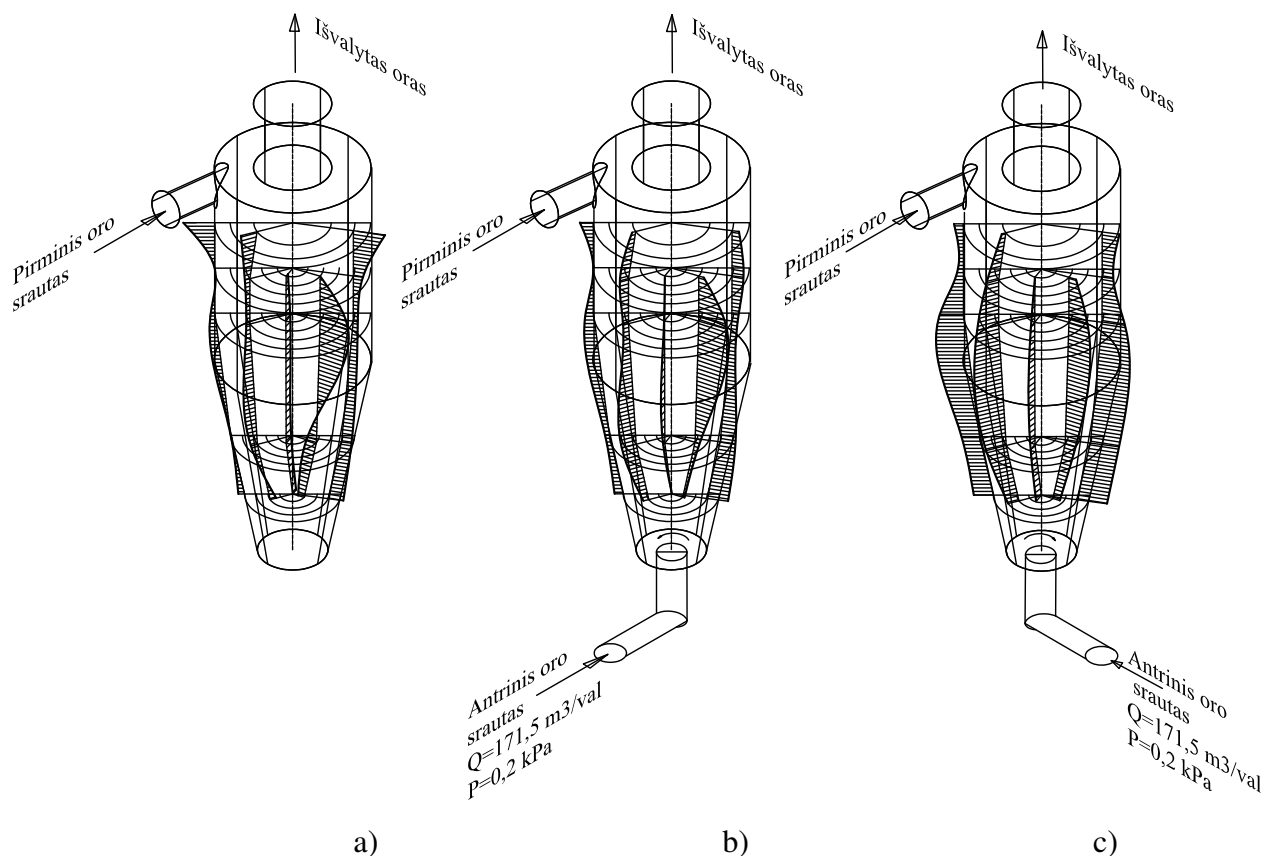
Sudarytos horizontaliuose ir vertikaliuose pjūviuose slėgio epiūros (**26 ir 27 pav.**), kurios akivaizdžiai parodo antrinio srauto pokytį, kuris pagerina išvalymo efektyvumą.



26 pav. Horizontalios slėgio epiūros:

a) ciklone; b) nesutampantis antrinis srautas su pirminiu; c) sutampantis antrinis srautas su pirminiu

Horizontalioji slėgio epiūra parodo srauto sukimosi kryptį bei greitį kiekviename įrenginio pjūvyje. Įrenginio cilindrinėje dalyje didžiausias sukimosi greitis, kai sustiprintas antrinis srautas nesutampa su pirminiu. Tai turi įtakos išvalymo efektyvumui. Kiekvieno bandymo horizontalios epiūros parodytos 1 – 3 prieduose.



27 pav. Vertikalūs greičiai:

a) ciklone; b) nesutampantis antrinis srautas su pirminiu; c) sutampantis antrinis srautas su pirminiu

Vertikaloji slėgio epiūra parodo vertikalios srauto judėjimo kryptį bei greitį kiekviename įrenginio pjūvyje. Didžiausią greitį srautas pasiekia arčiau įrenginio centrinės ašies. Tai apibrėžia antrinio srauto teigiamą įtaką įrenginio išvalymo efektyvumui. Kiekvieno bandymo vertikalios epiūros parodytos 3 – 6 prieduose.

Tam, kad tiksliau apibrėžtume pirminio ir antrinio srautų parametrus reikalingi papildomi tyrimai.

IŠVADOS

1. Užteršto kietomis dalelėmis oro išvalymo ciklone efektyvumas pagrįste priklauso nuo jo hidraulinio pasipriešinimo koeficiento. Šiuo metu praktiškai galimybės didinti valymo efektyvumą klasikiniuose ciklonuose jau išnagrinėtos.
2. Skaičiavimo metodikos oro valymui nuo kietų dalelių ciklone pagrįstos empirinėmis formulėmis, neįvertinat sukūryje susiformuojančių dviejų srautų (pirminio ir antrinio) sąveikos.
3. Judant dalelei užsuktame oro sraute, radialinis jos poslinkio dydis ir greitis priklauso nuo dalelės savybių, dviejų srautų judėjimo greičių bei dujų klampos.
4. Bet koks išorinis antrinio srauto pokytis, lemia smulkesnės dispersinės frakcijos išvalymo efektyvumą.
5. Kai papildomas antrinis srautas sutampa pagal sukimosi kryptį su pirminių srautu neženkiai 1,37 % gerina išvalymo efektyvumą. Priešingos krypties papildomas antrinis srautas pirminio srauto atžvilgiu išvalymo efektyvumą padidina iki 99,93 %, o tai žymiai efektyviau už klasikinius ciklonus, kurių išvalymo efektyvumas pagal tokio dispersiškumo valomą taršą siekia 85 %.

LITERATŪROS ŠALTINIAI:

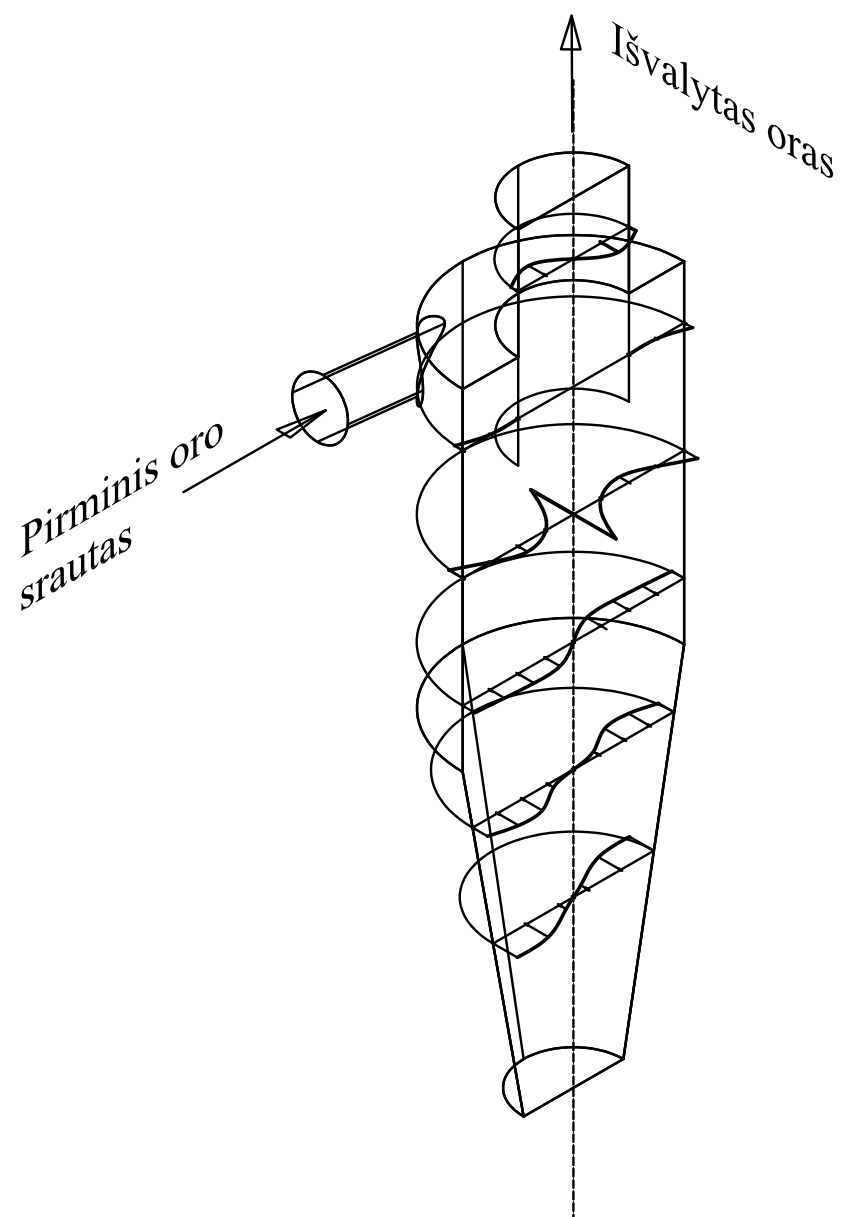
1. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. – М.: Металлургия, 1988.-255 с.
2. Буров А.И. Гидравлика стратифицированных криволинейных течений в аппаратах с обратными связями: дис. На соиск. Ст. д.т.н. – Одесса, 1991.
3. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Тарат Э.Я. Технология пылеулавливания. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 192 с.
4. Гигиенические требования к микроклимат производственных помещений. Санитарные правила и нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России. – 1997. – 20с.
5. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). – СПб.: СПбГПУ, 2002. – 544 с.
6. Гиргидов А.Д. Турбулентная диффузия с конечной скоростью. – СПб.: СПбГТУ, 1996. – 260 с.
7. Чумаков В.Н. Ермаков А.В. Внедрение новейших разработок «ФИНГО» на цементном заводе ООО «Атакайцемент». // Сборник докладов Международной конференции ПЫЛЕ ГАЗООЧИСТКА-2008. - 29-30 сентября 2008 г
8. Ермаков А.В. Сокращение вредных выбросов предприятий нефтегазовой отрасли в атмосферу. // Журнал "Экология производства", Бюллетень «Химия и нефтехимия» - 2008 г., №3 - с.1-4
9. Чумаков В.Н. Эффективная газоочистка. // журнал Цемент и его применение. - 2006, ноябрь-декабрь.- с.50-52
10. Ермаков А.В. Современное оборудование группы "ФИНГО" для установок очистки газов предприятий металлургии. // Сборник докладов Второй Международной металлургической конференции МЕТАЛЛУРГИЯ-ИНТЕХЭКО-2009. - 30-31 марта 2009 г.
11. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: «Машиностроение», 1975. – 559 с.
12. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности. – СПб.: Химия, 1993. – 320 с.
13. Кривошеев Р.В. Теоретические основы подготовки пробы для масс-спектрометрических систем газового анализа.
14. Общие сведения по фильтрам. Режим доступа: [www.sovplym.com] 2008 11 07
15. Оспищев С.Н., Стрелец К.И. Очистка воздуха в системах общеобменной вентиляции: Материалы 3-й международной научно-практической конференции "Экономика, экология и общество России в 21-м столетии". - СПб.: СПбГТУ, 2001.- с. 1018-

1020.

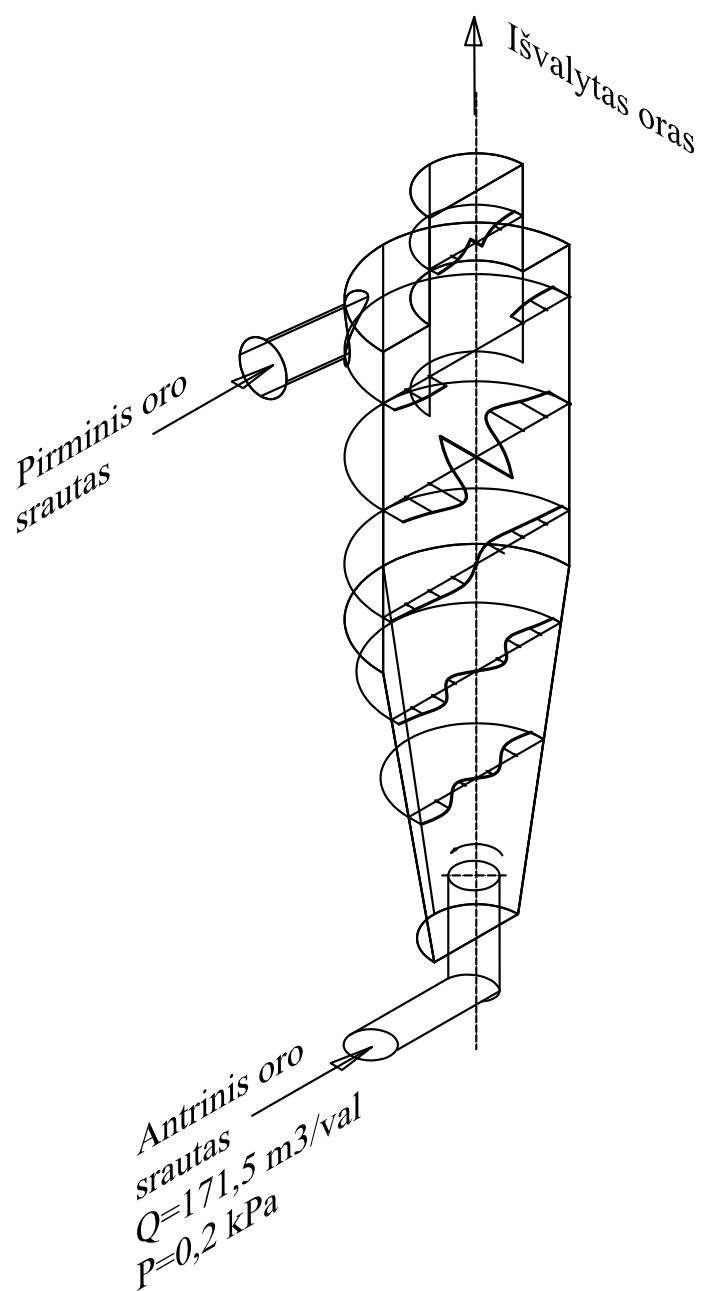
16. Патент РФ 2080939 от 26.01.1995 Инерционный фильтр-сепаратор. Тананаев А.В.
17. Производство газоочистительного и пылеулавливающего оборудования и аппаратуры. Режим доступа: [<http://www.promsnab.net>]
18. Пчелинцев В.А., Коптев Д.В., Орлов Г.Г. Охрана труда в строительстве: Учеб. Для строит. вузов и фак. – М.: Высш. Шк., 1991. – 272 с.
19. Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Осташев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах. – Л.: Ленинградский Университет, 1989. – 274 с.
20. Стрелец К.И., Ковалев А.А., Ватин Н.И. Очистка газовых потоков от твердых примесей при помощи инерционного фильтра сепаратора XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 99 с.
21. Стрелец К.И., Милюкова А.А., Ватин Н.И. Очистка промышленных газов: XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч.I: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. 99 с.
22. Стрелец К.И. Очистка промышленных газов: Материалы политехнического симпозиума «Молодые ученые – промышленности северо-западного региона». - СПб.: СПбГТУ, 2001.- С.36.
23. Стрелец К.И., Тананаев А.В., Эффективность инерционных фильтров сепараторов: Материалы международной научно-технической конференции «Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем». - СПб.: СПбОДЗПП, 2002. - С.33-34.
24. Строительные нормы и правила. Отопление, вентиляция и кондиционирование. СНиП 2.04.05-91 – М.:1992 – 65 с.
25. Тананаев А.В. Течения в каналах МГД-устройств. – М.: Атомиздат, 1979. – 368 с.
26. Родионов А.И., Клушин В.Н., Торочешнико Н.С.в. Техника защиты окружающей среды: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия,1989. – 512с.
27. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981. – 390 с.
28. Федоров Б.С., Чекалов. Л.В. и др. Экотехника. Экологический консорциум "РОСГАЗООЧИСТКА". [<http://kondore.newmail.ru>] 20.11.2008.
29. Шиляев М. И., Шиляев А. М., Афонин П. В., Стрельникова Н. А. Исследование процесса пылеулавливания и гидравлического сопротивления в каскаде прямоточных циклонов // Изв.вузов. Сер. Строительство. Сан. Техника. – 1999.- №8.

30. Штокман Е.А. Очистка воздуха. – М.: издательство АСВ, 1998. – 320 с.
31. В.Лазарев « Циклоны и вихревые пылеуловители» Справочник, Нижний Новгород 2006 320psl
- A. Kajalavičius „Smulkintos medianos pneumatinis transportas“ Kaunas Technologija 2001 92psl
32. Egidijus Juodis „VĖDINIMAS“, Vilnius. Enciklopedija 1998 m. 351psl
33. V.Striška “Aplinkosaugos įrenginiai ir sistemos” Vilnius 2001 m.255psl.
34. J.Daukšas „Aplinkosaugos technologijos“ VšĮ Šiaulių universiteto leidikla 2004 167psl.
35. Marijonas Bogdevičius „Hidraulinių ir pneumatinių sistemų dinamika“. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius : Technika, 2003.621.22(075.8).
36. Rymantas Pekus „Inžinerinių tinklų hidrauliniai skaičiavimai, vandentiekis, vandens šildymo sistemos ir dujotiekis“. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Hidraulikos katedra. Vilnius : Technika, 2004.532(075.8).
37. Rymantas Pekus „Slėginių vamzdžių hidrauliniai skaičiavimai“. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Hidraulikos katedra. Vilnius : Technika, 2000.621.644(075.8).
38. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг. Б.И. Мягков, И.К. Решидов. - М.: Химия, 1981. - 392 с.
39. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг. Б.И. Мягков и др.; Под общ. ред. А.А. Русанова. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
40. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV-12. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств / М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексеев и др.; Под общ. Ред. М.Б. Генералова. - М.: Машиностроение, 2004. - 832с.
41. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др.; Под общ. ред. А.А. Русанова. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 312 с.
42. Меклер В.Я., Овчинников П.А. Промышленная вентиляция и кондиционирование воздуха. - М.: Стройиздат, 1978. - 312 с.
43. <http://symposium.forest.ru/> Gamybos projektavimas [2009 02 28]
44. <http://rusbook.org/vozduh/> Techniniai terminai [2009 03 03]
45. <http://forum.abok.ru> Ciklonų projektavimas [2009 02 12]
46. <http://www.mahp.ustu.ru> Ciklonų projektavimas [2009 02 12]
47. <http://transgasindustry.kiev.ua/books/Potapov/6.html> Duju ir skysčiu sūkurinis judejimas [2008 10 20]
48. <http://planeta-eco.ru/index.php?id=20> Sūkurinis gaudytuvas [2009 01 20]
49. <http://www.eemkzn.ru/product/energoseberegienie/vihrevust/> Sūkuriniai gaudytuvai [2009 01 20]

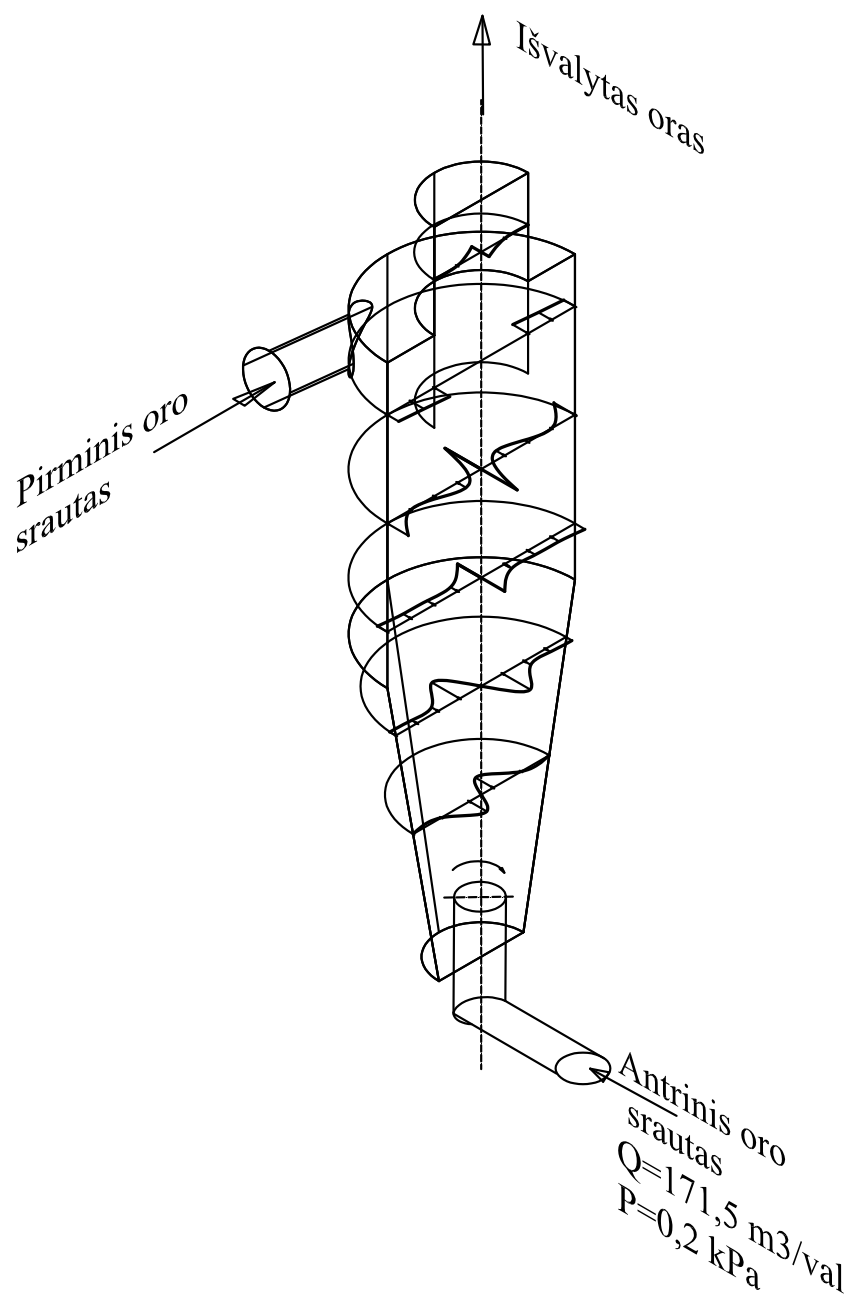
Priedas Nr.1: Ciklono horizontalios slėgio epiūros



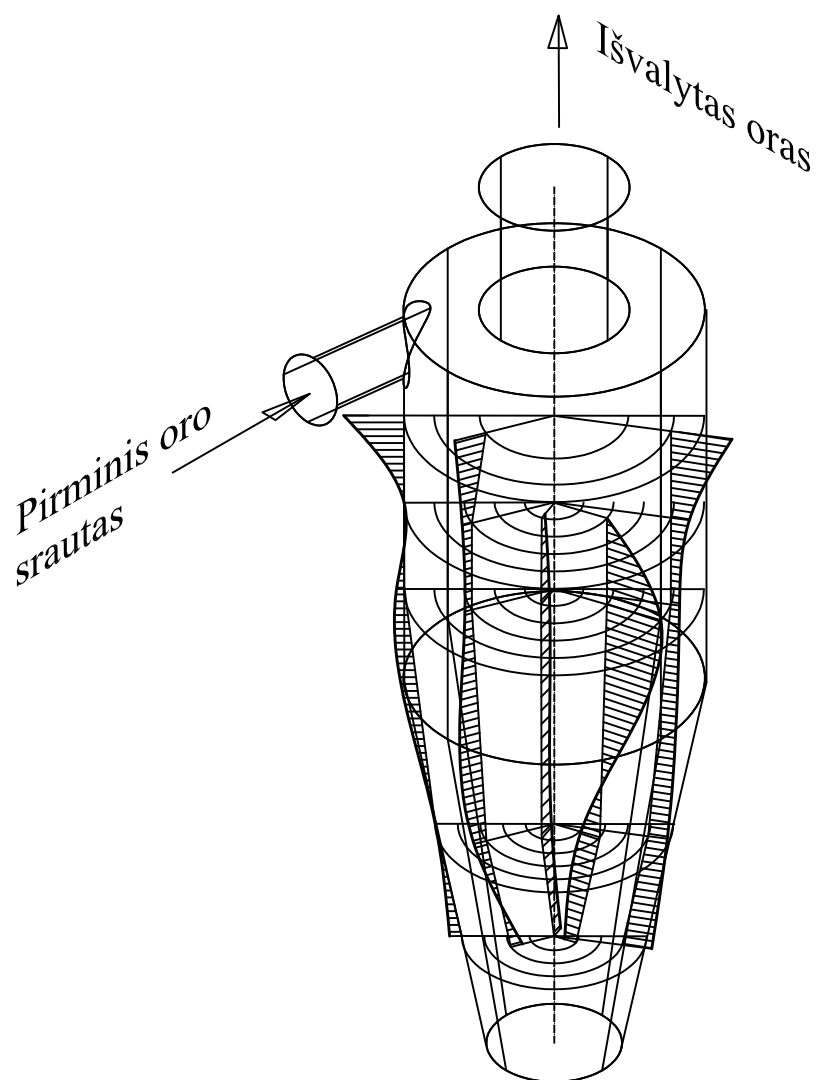
Priedas Nr. 2: Ciklono su antriniu srautu, nesutampančiu su pirminiu horizontalios slėgio epiūros



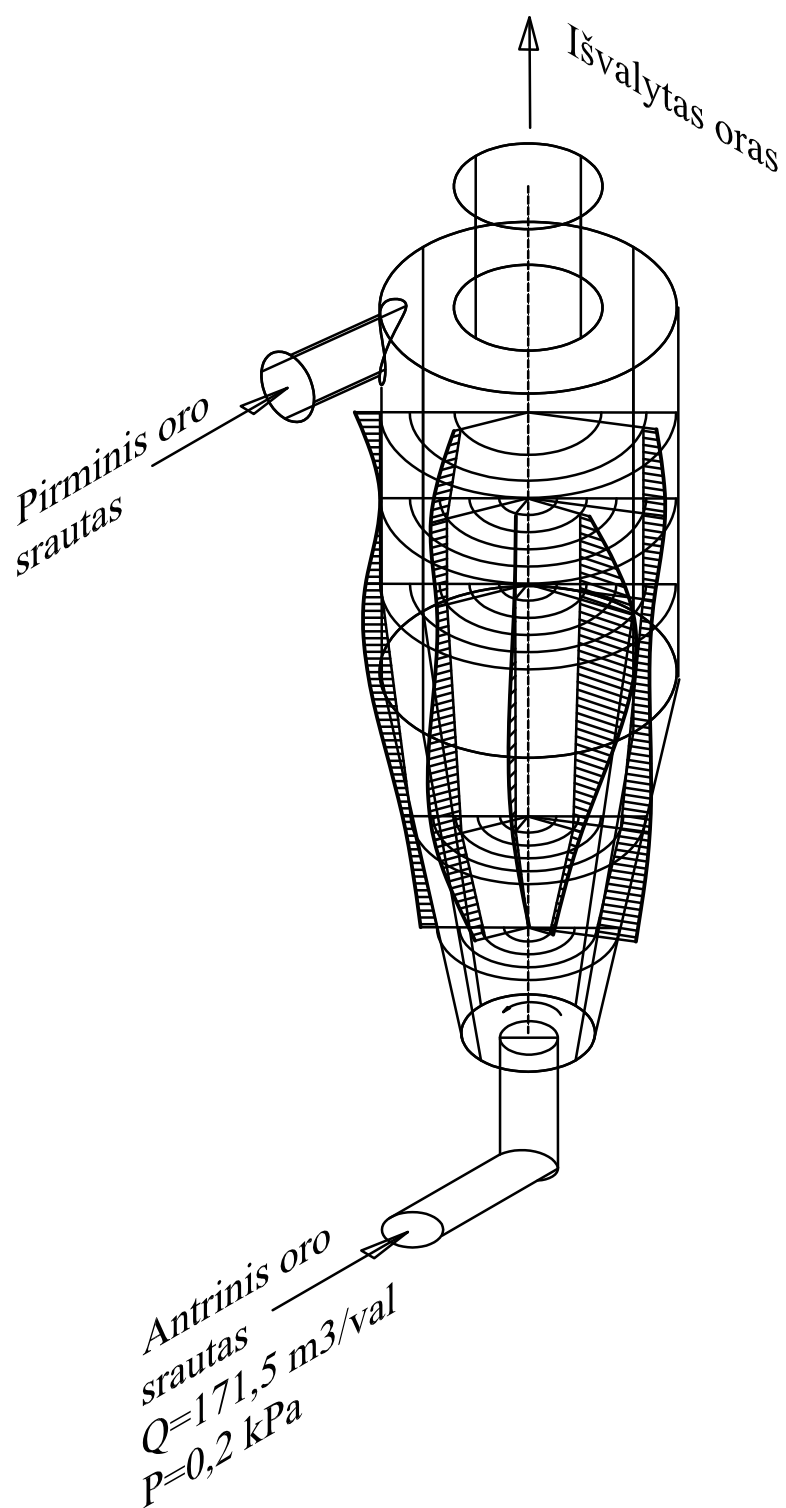
Priedas Nr. 3: Ciklono su sutampančiu antriniu srautu su pirminiu horizontalios slėgio epiūros



Priedas Nr. 4: Ciklono vertikalios slėgio epiūros



Priedas Nr. 5: Ciklono su antriniu srautu nesutampančiu su pirminiu vertikalaus slėgio epiūros



Priedas Nr. 6: Ciklono su antriniu srautu sutampančiu su pirminiu vertikalaus slėgio epiūros

