

Invenția se referă la sisteme de evacuare, utilizate în autovehicule, și anume la dispozitive pentru recircularea și epurarea gazelor de eșapament de fracții solide și gaze toxice ale motorului cu ardere internă. În special, prezenta invenție se referă la sisteme de recuperare și evacuare a gazelor de eșapament, care se răcesc și apoi o parte din ele sunt recirculate înapoi către motorul cu ardere internă pentru a reduce emisiile de oxid de azot. Mai precis, prezenta invenție se referă la sisteme de evacuare, care îndepărtează particulele și, cel mai important, nanoparticulele și gazele toxice din gazele de eșapament pentru a reduce poluarea mediului înconjurător. Invenția poate fi utilizată pentru fabricarea motoarelor cu ardere internă noi, precum și pentru modernizarea motoarelor cu ardere internă aflate în exploatare.

Este cunoscut un dispozitiv de neutralizare a gazelor de eșapament pentru motorul cu ardere internă, care conține un corp cilindric cu turbion de evacuare și un arzător de evacuare. Pentru a reduce toxicitatea gazelor de evacuare și pentru a spori eficiența motorului cu ardere internă, turbionul este executat în formă de melc pentru răsucirea fluxului de gaze, și este format din două virole cilindrice, amplasate concentric de-a lungul axei sale, unde virola interioară servește pentru direcționarea aerului atmosferic care pătrunde prin orificiile laterale de la capătul ei, iar virola exterioară este dotată cu o îngustare sub un unghi de 45° la ieșire pentru creșterea debitului de gaze și amestecul lor cu aerul [1].

Dezavantajele dispozitivului cunoscut constau în lipsa modalității de neutralizare a gazelor toxice ce conțin: aldehide, monoxid de carbon și hidrocarburi, întrucât temperatura flăcării este mai mică de 550°C . În plus, incapacitatea de utilizare a aprinderii în spații închise necesită consum de combustibil suplimentar. De asemenea, creșterea volumului gazelor de eșapament ale motorului cu ardere internă mărește costul oxidantului.

Mai este cunoscut un dispozitiv de răcire a gazului de recirculare pentru vehicul, care constă dintr-o carcasă, în care sunt amplasate mai multe conducte. Conductele de admisie și de evacuare a apei sunt amplasate pe partea exterioară a carcasei, totodată un convertor catalitic este amplasat la capetele de intrare a conductelor pentru gazele de eșapament [2].

Dezavantajele dispozitivului cunoscut constau în greutatea și dimensiunea mare a dispozitivului, iar complexitatea de funcționare reduce fiabilitatea motorului cu ardere internă, deoarece fracțiile lichide și solide ale gazelor de eșapament afectează schimbătorul de căldură, totodată suprafețele interioare necesită de a fi curățate periodic de funingine.

De asemenea este cunoscut un sistem de recirculare a gazelor de eșapament pentru un motor cu ardere internă, care constă dintr-o conductă de derivație cu un element de închidere reglabil. Intrarea conductei de derivație comunică cu conducta de evacuare a gazelor de eșapament al motorului cu ardere internă, iar ieșirea ei comunică cu conducta de admisie a motorului cu ardere internă. Conducta de derivație este detașabilă, fixată prin piulițe de unire, iar conducta de evacuare, amplasată de-a lungul fluxului de gaze de eșapament, este dotată cu o țevă de căldură despărțitoare, dispusă secvențial la răcire cu aer sau lichid printr-un separator pentru îndepărtarea umidității, ultimul fiind amplasat în fața unui element de blocare reglabil [3].

Dezavantajele sistemului cunoscut constau în lipsa posibilității de purificare a gazelor de eșapament de fracții lichide și solide, în special, de particulele de funingine și benzopirină, formate în timpul funcționării motorului cu ardere internă. La recircularea gazelor de eșapament către motorul cu ardere internă, particulele de funingine de fracție mare influențează negativ asupra elementelor constitutive ale grupului cilindru-piston al motorului cu ardere internă. În plus, fracțiile lichide și solide ale gazelor de eșapament se depozitează pe supapa sistemului, ceea ce conduce la funcționarea nesigură a acestei supape. De asemenea, sistemul nu asigură răcirea gazelor de eșapament, care recirculă în camera de ardere a motorului cu ardere internă.

Mai este cunoscut un sistem de recirculare cu tub vortex a gazelor de eșapament cu amortizor de zgomot, care constă dintr-un dispozitiv de admisie a aerului, conectat la un carburator. Sistemul conține un amortizor, dotat cu un mecanism de filtrare, amplasat în interiorul camerei amortizorului, ce facilitează separarea gazelor de eșapament ale motorului din fluxul de gaze fierbinți. Mecanismul de filtrare conține un element filtrant, care filtrează particule solide și alți poluanți. Gazul de eșapament al motorului este admis în jurul circumferinței camerei de eșapament cilindrice, astfel încât gazul de eșapament se va roti în interiorul camerei, în care este amplasat un element conic pentru separarea și direcționarea fluxurilor de gaze. Fluxul de gaze reci este direcționat către dispozitivul de admisie a aerului prin conducta de recirculare a gazelor, fixată la intrarea tobei de eșapament, astfel încât aerul răcit sub presiune este direcționat către carburator pentru a îmbunătăți performanța și eficiența motorului. Fluxul de gaze fierbinți filtrat este evacuat în mediul înconjurător prin ieșirea tobei de eșapament [4].

Dezavantajele acestui sistem constau în următoarele. Experimentele practice au demonstrat că în tubul vortex acționează o forță centripetă, astfel particulele solide separate din gazul de eșapament pătrund în conducta de recirculare a gazelor, conectată la conducta de admisie a motorului cu ardere internă. Aceste particule solide afectează elementele constructive și accelerează uzura unității cilindru-piston a motorului cu ardere internă.

Cea mai apropiată soluție tehnică este un dispozitiv de captare a particulelor solide ale gazelor de eșapament, direcționate în conducta de recirculare, care conține cel puțin un element parțial permeabil gol, care prin peretele său permeabil la gaz delimitează conducta de recirculare de conducta de evacuare a gazelor de eșapament. Astfel, dispozitivul dat blochează întoarcerea particulelor de carbon sau funingine către motorul cu ardere internă, evitând pătrunderea particulelor de fum negru din gazul de eșapament, care au un efect negativ asupra motorului cu ardere internă [5].

Dezavantajele dispozitivului cunoscut constau în faptul că este posibilă purificarea de particule solide numai a gazelor de eșapament care pătrund în sistemul de recirculare, dar nu și a gazelor de eșapament emise în atmosferă.

Dispozitivul nu permite regenerarea elementului parțial permeabil. Înafara de aceasta, gazele din fluxul de recirculare nu se răcesc, iar fluxul de gaze de eșapament direcționate la catalizatorul de oxidare din conducta de evacuare a motorului cu ardere internă, nu se încălzește.

Problema pe care o rezolvă invenția constă în:

- purificarea fluxului de gaze de evacuare a motorului cu ardere internă de gaze toxice, așa ca aldehide, dioxid de sulf, oxide de azot și de fracții lichide și solide (funingine și benzopirină), în special cu dimensiuni mai mici de 50 nm;
- arderea gazelor toxice și fracțiilor solide (funingine și benzopirină) cu dimensiuni mai mici de 50 nm în camera de ardere a motorului cu ardere internă;
- capturarea unei fracții solide (funingine și benzopirină) de gaze de evacuare mai mari de 50 nm, folosind un element filtrant;
- răcirea și reglarea fluxului recirculat de gaze de evacuare, îndreptat către colectorul de admisie al motorului cu ardere internă;
- creșterea temperaturii gazelor de eșapament direcționate către colectorul de admisie;
- regenerarea elementului filtrant printr-un flux invers de aer încălzit în colectorul de admisie al motorului cu ardere internă.

Dispozitivul pentru recircularea și epurarea gazelor de eșapament de fracții solide și gaze toxice ale motorului cu ardere internă, conform invenției, înlătură dezavantajele menționate mai sus prin aceea că conține o cameră, intrarea căreia este unită printr-o conductă de evacuare a gazelor de eșapament cu un colector de evacuare al motorului cu ardere internă, iar ieșirea ei este unită cu intrarea unui element filtrant prin intermediul unei diafragme plasate la capătul rece al unui tub vortex, elementul filtrant fiind unit printr-o conductă de recirculare a gazelor cu un colector de admisie al motorului cu ardere internă. Camera este dotată cu duze direcționate tangențial peretelui interior al unei camere de separare a energiei a tubului vortex, format dintr-un electrod de ionizare metalic, executat în formă de spirală, și un electrod de impulsuri metalic, fixat de capătul unei tije conductoare acoperită cu un strat izolant, care comunică cu o valvă conică acționată de o bobină și plasată pe capătul cald al tubului vortex, pe care este montată o cameră, unită cu o tobă de eșapament. Tija conductoare este conectată la un convertor de creștere a tensiunii de impuls, conectat la o baterie de acumulare, la care este conectată și bobina prin intermediul unei unități de comandă a motorului cu ardere internă. Elementul filtrant este dotat cu elemente de încălzire electrice, conectate prin intermediul unui releu la bateria de acumulare, releul fiind unit cu unitatea de comandă a motorului cu ardere internă.

Avantajele tehnice ale invenției constau în utilizarea unui element filtrant pentru a capta particulele nocive nu numai din fluxul de gaze de eșapament pentru recirculare, dar și din fluxul de gaze de eșapament de evacuare din motorul cu ardere internă.

Totodată, dispozitivul asigură epurarea gazelor de eșapament de gaze toxice și particule mici, sub 50 nm, și de a le direcționa prin elementul filtrant pentru ardere în camera de ardere a motorului cu ardere internă.

În plus, dispozitivul propus permite regenerarea elementului filtrant cu aer încălzit din colectorul de admisie și controlul fluxului gazelor de eșapament prin schimbarea poziției valvei conice.

De asemenea, dispozitivul propus permite reducerea parțială a temperaturii gazelor de eșapament direcționate către conducta de recirculare a gazelor, și creșterea parțială a temperaturii gazelor de eșapament direcționate către conducta de evacuare.

Invenția se explică prin desene din fig. 1 și 2, care reprezintă:

- fig. 1, vederea în ansamblu a dispozitivului pentru recircularea și epurarea gazelor de eșapament de fracții solide și gaze toxice ale motorului cu ardere internă;
- fig. 2, secțiunea A-A din fig. 1.

Elemente menționate în desene:

- 1 – elementul filtrant pentru captarea particulelor solide cu dimensiuni mai mari de 50 nm din gazele de eșapament;
- 2 – tubul vortex;
- 3 – diafragma, amplasată la capătul rece al tubului vortex;
- 4 – camera, dotată cu duze direcționate tangențial peretelui interior al camerei de separare a energiei a tubului vortex;
- 5 – valva conică, amplasată la capătul cald al tubului vortex;
- 6 – tija conductoare, acoperită cu un strat izolant;
- 7 – electrodul de ionizare metalic;
- 8 – camera de separare a energiei a tubului vortex;
- 9 – electrodul de impulsuri metalic;
- 10 – convertorul de creștere a tensiunii de impuls;
- 11 – bobina;
- 12 - unitatea de comandă a motorului cu ardere internă, care controlează bobina valvei conice și releul de conectare a elementelor de încălzire electrice la bateria de acumulator;
- 13 - elementele de încălzire electrice (bujii incandescente) pentru încălzirea fluxului recirculat;
- 14 - releul de conectare a elementelor de încălzire electrice;

- 15 - fluxul axial turbionar inversat de gaze de eşapament reci;
 16 - fluxul tangențial turbionar de gaze de eşapament fierbinți.

Dispozitivul pentru recircularea și epurarea gazelor de eşapament de fracții solide și gaze toxice ale motorului cu ardere internă conține camera 4, intrarea căreia este unită prin conducta de evacuare a gazelor de eşapament cu colectorul de evacuare al motorului cu ardere internă, iar ieșirea ei este unită cu intrarea elementului filtrant 1 prin intermediul diafragmei 3 plasate la capătul rece al tubului vortex 2, elementul filtrant 1 fiind unit prin conducta de recirculare a gazelor cu colectorul de admisie al motorului cu ardere internă. Camera 4 este dotată cu duze direcționate tangențial peretelui interior al camerei de separare a energiei 8 a tubului vortex 2 pentru formarea fluxului tangențial turbionar de gaze de eşapament fierbinți 16 și a fluxului axial turbionar inversat de gaze de eşapament reci 15. Tubul 2 este format din electrodul de ionizare 7 metalic, executat în formă de spirală, și electrodul de impulsuri 9 metalic, fixat de capătul tijei conductoare 6 acoperită cu un strat izolant, care comunică cu valva conică 5 acționată de bobina 11 și plasată pe capătul cald al tubului vortex 2, pe care este montată camera, unită cu toba de eşapament. Tija conductoare 6 este conectată la convertorul de creștere a tensiunii de impuls 10, conectat la bateria de acumulare, la care este conectată și bobina 11 prin intermediul unității de comandă 12 a motorului cu ardere internă. Elementul filtrant 1 este dotat cu elementele de încălzire electrice 13, conectate prin intermediul releului 14 la bateria de acumulare, releul 14 fiind unit cu unitatea de comandă 12 a motorului cu ardere internă.

Dispozitivul pentru recircularea și epurarea gazelor de eşapament de fracții solide și gaze toxice ale motorului cu ardere internă funcționează în modul următor.

Gazele de eşapament ale motorului cu ardere internă sunt distribuite din colectorul de evacuare al motorului cu ardere internă prin conducta de evacuare a gazelor de eşapament către duzele din camera 4, care direcționează fluxul gazelor de eşapament tangențial peretelui interior al camerei 8 a tubului vortex 2, astfel formându-se fluxul tangențial turbionar de gaze de eşapament fierbinți 16 de-a lungul electrodului de ionizare 7 metalic spre valva conică 5 din capătul cald al tubului 2. Ca rezultat, energia de separare în camera 8 a fluxului 16, răcindu-se, formează fluxul axial turbionar inversat de gaze de eşapament reci 15, care având aceeași direcție de rotație turbulentă se deplasează în direcție opusă, spre capătul rece al tubului 2 și diafragma 3. Gazele toxice relativ mai grele, cum ar fi aldehide, dioxidul de sulf, oxidul de azot, precum și fracțiile lichide și solide din fluxul de gaze de eşapament, la fel și funinginea și benzopirina, sunt retrase de fluxul 15. Impulsurile de curent înalt de la convertorul de creștere a tensiunii de impuls 10 sunt distribuite către electrodul de impulsuri 9, fixat de capătul tijei conductoare 6 acoperită cu strat izolant, care comunică cu valva conică 5 acționată de bobina 11 și plasată pe capătul cald al tubului vortex 2. Tensiunea înaltă, distribuită către electrodul de impulsuri 9, efectuează o descărcare Corona pe marginea interioară a electrodului de ionizare 7, executat în formă de spirală, provocând câmpul electric dintre electrozii 7 și 9, care încarcă fracțiile solide și lichide și le îndepărtează din fluxurile 15 și 16.

Astfel, fluxul 15 este direcționat prin diafragma 3 de la capătul rece al tubului vortex 2 către intrarea elementului filtrant 1. Elementul filtrant 1 captează fracțiile solide de funingine și benzopirină cu dimensiuni mai mari de 50-100 nm, iar particulele solide și fracțiile lichide mai mici, împreună cu gazele toxice răcite de fluxul 15, sunt trecute prin elementul filtrant prin conducta de recirculare a gazelor în colectorul de admisie al motorului cu ardere internă, unde sunt arse în camera de ardere a motorului cu ardere internă.

Deschiderea valvei conice 5 prin deplasarea tijei 6, acționate de bobina 11, permite controlul volumului și direcției de mișcare a fluxului de gaze de eşapament în camera de separare a energiei 8. Astfel, fluxul 15 este direcționat către colectorul de admisie al motorului cu ardere internă pentru recirculare.

Pentru a regenera elementul filtrant 1, unitatea de comandă 12 a motorului cu ardere internă conectează elementele de încălzire electrice 13 prin releul 14, conectat la bateria de acumulare, după ce se deschide valva conică 5 complet, acționată de bobina 11 și se creează un flux de gaze fierbinți, direcționat de la colectorul de admisie al motorului cu ardere internă către elementul filtrant, care distruge particulele solide (negru de fum, carbon), captate de elementul filtrant 1.

Argumentarea de către studiile experimentale cunoscute din presa deschisă a eficienței preconizate a unui dispozitiv vortex pentru separarea energetică a gazelor toxice.

În dispozitivul propus, se utilizează un tub vortex inventat în 1928 de studentul francez George Ranque și studiat de Hilsch, care este numit Ranque-Hilsch Vortex Tube, în care se realizează efectul Ranque-Hilsch. Tubul vortex este cunoscut ca un dispozitiv de răcire neconvențional fiind simplu și sigur, care creează două fluxuri de gaze: fluxul tangențial turbionar de gaze de eşapament fierbinți 16 și fluxul axial turbionar inversat de gaze de eşapament reci 15. Atunci când gazul este furnizat tangențial peretelui cilindric interior al camerei 4 prin duze, camera 4 formează un flux circular care intră în camera de separare a energiei 8, în timp ce fluxul 15 cu turbulență dezvoltă o mișcare axială inversă în interiorul centrului acestei camere 8, unde se extinde și absoarbe excesul de energie prin forțe vâscoase cu straturi de gaze periferice, astfel încât debitul axial invers al gazelor de evacuare este răcit.

Gazul care iese din capătul cald al tubului vortex 2 poate fi în jur de 190°C, iar gazul care iese din capătul rece poate fi în jur de 50°C. Mecanismul de lucru al tubului vortex 2 poate fi observat fizic, dar este dificil de explicat, deoarece nu există o explicație ideală pentru acest fenomen. Paradoxul acestui efect este acela că forțele centrifuge într-un flux vortex rotativ sunt direcționate către centrul conductei. După cum se știe din fizică, straturile mai calde de gaz sau lichid au o densitate mai mică și se ridică în sus, și în cazul forțelor centrifuge, tind spre centrul fluidului, iar straturile cele mai reci având o densitate mai mare, tind spre periferie. Între timp, la o viteză mare a fluxului de

rotație, totul se întâmplă invers [A.Ф. Гутсол, Эффект Ранка, Успехи физических наук, 1997, т. 167, № 6, pag. 665-687. <http://www.mathnet.ru/links/fda6a1505595716c17ed9b1ff3d4c1d1/ufn1336.pdf>]. Deoarece este imposibil să se explice efectul utilizat în soluția tehnică propusă, prezența sa va fi demonstrată prin testele reale descrise în presa deschisă de cercetători din diferite țări.

Samira Mohammadi & Fatola Farhadi [Samira Mohammadi, Fatola Farhadi, Experimental and numerical study of the gas-gas separation efficiency in a Ranque-Hilsch vortex tube Separation and Purification Technology, Volume 138, 10 December 2014, pag. 177-185. <https://kundoc.com/pdf-experimental-and-numerical-study-of-the-gas-gas-separation-efficiency-in-a-ranque.html>] au investigat experimental separarea gazelor în Ranque-Hilsch Vortex Tube pentru amestecul de gaz propan lichefiat N_2 , în care densitatea azotului este mai mică de două ori decât densitatea gazului propan lichefiat. Atunci când presiunea specifică a amestecului de gaze la intrarea tubului Ranque-Hilsch Vortex Tube este de 236,37 kPa (2,34 bar) și fracția molară a gazului propan lichefiat la intrare este de 22%, cea mai mare eficiență de separare pentru gazul propan lichefiat din amestecul de gaz propan lichefiat, obținut pentru gazul propan lichefiat este de 79% N_2 la ieșirea din gazul fierbinte și 21% la ieșirea din gazul rece $CF=0,76$, unde CF este fracțiunea fluxului de gaz rece la ieșirea la fluxul de gaz de intrare. Gazul propan lichefiat este un amestec de componente de hidrocarburi, cu 85%, care constă din C_4+ - (izo-butan (C_4H_{10})) cu o densitate de 2,51 kg/m^3 și N_2 este azotul de 1,250 kg/m^3 .

În acest experiment, a fost obținută o confirmare convingătoare a eficienței separării gazelor pentru un amestec de gaze de densități diferite la o presiune a gazului la intrarea în Ranque-Hilsch Vortex Tube identică cu presiunea gazelor de eșapament a unui motor cu ardere internă, prin urmare, folosind tubul vortex este posibilă separarea gazelor toxice din fluxul de gaze de evacuare mai grele decât azotul, cu densitatea $\rho(N_2)=1,25 kg/m^3$, ponderea de eșapament 74-77% [B. В. Алферович, Токсичность двигателей внутреннего сгорания: учебно – методическое пособие для студентов специальности 1-37 01 01 «Двигателей внутреннего сгорания» дневной и заочной форм обучения: v 2 ch. 1: Анализ состава отработавших газов – Минск: BNTU, 2016. pag. 54 <https://ru.b-ok2.org/book/3634134/b7d799>]:

- oxid de azot (NO_2) - ponderea în flux este aprox. 0,5%, foarte toxic, $\rho(NO_2)=2,05 kg/m^3$;
- hidrocarburi, cota de evacuare în jurul 0,2%. Compușii de hidrocarburi au un efect carcinogen. Hidrocarbura aromatică de benzopiran este în special carcinogenă, $\rho(C_{20}H_{12})=1240 kg/m^3$ - toxic;
- aldehide - proporția din gazele de eșapament 0,005%. Densitatea aldehidei benzoale $\rho(R-CHO) = 1041,5 kg/m^3$ - toxic;
- dioxid de sulf (SO_2) - ponderea în flux este aprox. 0,05%, toxic, $\rho(SO_2)=2,63 kg/m^3$.

În tubul vortex a dispozitivului propus, gazele toxice sunt eliminate din fluxul de gaze de evacuare și trimise în camera de ardere a motorului cu ardere internă în regim de recirculare.

Pentru a demonstra eficiența separării solide de gazele de evacuare în tubul Ranque-Hilsch Vortex Tube, utilizăm rezultatele experimentului realizat de Kap-Jong [R. Kap-Jong, K. Jung-soo, and C. In-Su, Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube. JSME International Journal, 47(1), pag. 29 - 36, 2004]. Ei investighează caracteristicile de separare a particulelor într-un tub cu turbulență contra curent, folosind pulbere de var (densitatea CaO este de 3,35 g/cm^3) cu un diametru mediu al particulelor de 5 μm și 14 μm . Rezultatele lor au arătat că, odată cu creșterea presiunii și a debitului la intrare, eficiența de separare pentru particulele de pulbere mai mari scade, dar crește pentru particule de pulbere fine. Au constatat că eficiența separării de 93% poate fi obținută la o viteză de intrare de $V_i=14,52 m/s$. În acest experiment, se confirmă ferm despre eficiența separării particulelor în tubul Ranque-Hilsch Vortex Tube în condiții de turbulență contra curent.

Pentru a confirma aplicabilitatea lucrării la soluția tehnică propusă vom calcula viteza gazelor de eșapament ale motorului diesel la intrare în dispozitivul propus.

Motor cu ardere internă diesel de putere medie $P_{GE}=138 CP$ (101,5 kW) cu diametrul tubului Vortex $D=0,06 m$ (suprafața secțiunii $S_t=2,83 \cdot 10^{-3} m^2$), presiunea gazelor de evacuare care intră în conductă este $H_{GE} = 2,5 bar$ și volumul de gaze de eșapament - $Q_{eg}=0,45 m^3/s$ [Petrov O. Calculation of parameters of exhaust gas of the vehicle with the engine of the medium statistical capacity, Romania, Revista Ingineria automobilului, Nr. 49/ decembrie 2018, pag. 18-20. http://siar.ro/wp-content/uploads/2018/12/rIA-49_2018.pdf] în tubul Ranque-Hilsch Vortex Tube în prezența unui electrod de impulsuri cu diametrul $d_s = 1cm$ (suprafața secțiunii transversale $S_s = 78,5 \cdot 10^{-6} m^2$) are viteza fluxului gazelor:

$$v_i = Q_{eg} / (S_t - S_s) / P_{eg} \quad (1),$$

$$v_i = 0,45 / (2,83 \cdot 10^{-3} - 78,5 \cdot 10^{-6}) / 2,5$$

$$v_i = 65,42 (m/s).$$

Așa cum s-a indicat mai sus, cu creșterea presiunii și a debitului la intrare, eficiența separării particulelor fine ale pulberilor crește. În consecință, pentru particulele solide mai mici, cu o dimensiune de până la 1 micron, cu o viteză de curgere calculată $v_i = 51,8 m/s$, eficiența îndepărtării particulelor solide din debitul gazelor de evacuare va fi mai mare decât în experimentul efectuat de Kap-Jong și colab [R. Kap-Jong, K. Jung-soo and C. In-Su, Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube. JSME International Journal, 47(1), p. 29-36, 2004].

Pentru a demonstra eficiența separării particulelor solide de la gazele de eșapament în tubul Ranque-Hilsch Vortex Tube cu ajutorul unui câmp electric, se calculează viteza de rulare a particulelor solide într-un câmp electric și se compară cu timpul de rezidență a particulelor solide din tubul Ranque-Hilsch Vortex Tube.

Se determină viteza de deplasare a fluxului de gaze de evacuare v_S de-a lungul spiralei electrodului de impuls în tubul vortex Ranque-Hilsch Vortex Tube. Dacă există trei duze în tub, $n_i = 3$, cu un diametru $d_i = 0,02$ m (suprafața secțiunii $S_i = 0,314 \cdot 10^{-3}$ m²):

$$v_S = Q_{eg} / (n_i \cdot S_i) / P_{eg} \quad (2),$$

$$v_S = 0,45 / (3 \cdot 0,314 \cdot 10^{-3}) / 2,5$$

$$v_S = 191,1 \text{ (m/s)}.$$

Acceptăm raportul $L/D=9,3$ [Abdolreza Bramo, Nader Pourmahmoud. A Numerical Study on the Effect of Length to Diameter Ratio and Stagnation Point on the Performance of Counter Flow Ranque-hilsch Vortex Tubes. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(10): 4943-4957, 2010. <https://pdfs.semanticscholar.org/9d1d/c105de2414e4e124b8fae7fba0bbe6f2afd5.pdf>]. Pentru diametrul camerei de separare a energiei tubului vortex – $D_C = 0,06$ m, lungimea tubului din camera de separare a energiei Ranque-Hilsch Vortex Tube va fi: $L_C = 0,56$ m.

Distanța dintre electrozii de impulsuri și de ionizare - H (m) cu înălțimea benzii metalice a electrodului de ionizare - $h_S = 0,0025$ m și diametrul știftului $D_S = 0,01$ m va fi:

$$H = D_C / 2 - (h_S + D_S / 2) \quad (3),$$

$$H = 0,06 / 2 - (0,0025 + 0,01 / 2) = 0,0225 \text{ (m)}$$

$$H = 0,0225 \text{ (m)}.$$

În camera de separare a energiei 8 a tubului vortex 2 este introdus electrodul de ionizare 7 metalic, în formă de spirală cu treapta de 1 cm, care are 50 de tururi de la începutul camerei de separare a energiei 8. Atunci când lungimea camerei de separare a energiei 8, cilindrice este de $L=0,56$ m, lungimea spiralei va fi puțin mai mare decât $L_S=9,42$ m, prin urmare fluxul de gaze de eșapament fierbinți în această cameră se va deplasa în câmpul de descărcare Corona al electrodului de ionizare 7 negativ cu viteza de mișcare a fluxului turbulent al gazelor de eșapament v_S în perioada de timp t :

$$t = L_S / v_S \quad (4),$$

$$t = 9,42 / 191,1 = 0,049 \text{ (s)}.$$

Particulele de eșapament pentru motorină constau din particule submicronice cu un diametru de obicei de la 30 la 500 nm (0,03-0,5 μ m) [David B. Kittelson Measurement of Engine Exhaust Particle Size Center for Diesel Research University of Minnesota presented at University of California, Davis 17 February 2000. <http://dept.me.umn.edu/centers/mel/reports/dbkucdavis.pdf>], cu o concentrație maximă între 100-200 nm (0,1-0,2 μ m). Densitatea efectivă a particulelor de funingine generată într-un motor diesel scade odată cu creșterea mărimii particulelor, de la 1200 kg/m³ la 30 nm (0,05 μ m) la 300 kg/m³ la 300 nm (0,3 micrometri) [M. Matti Maricq, Ning Xu. The effective density and fractal dimension of soot particles from premixed flames and motor vehicle exhaust. Journal of Aerosol Science Volume 35, Issue 10, October 2004, Pages 1251-1274 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850204000850>].

Kap-Jong și colab. [R. Kap-Jong, K. Jung-soo and C. In-Su, Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube. JSME International Journal, 47(1), p. 29-36, 2004], au realizat experimentul pentru corpurile solide cu o densitate de la două până la trei ori mai mare decât corpurile solide ale unui motor diesel, gazele de eșapament ne demonstrează că chiar și cu o presiune relativ mică a gazelor de eșapament ale unui motor diesel, de ordinul a 2 - 2,5 bar și secțiunea transversală a tubului Ranque-Hilsch Vortex Tube cu diametrul de 0,06 m din dispozitivul propus va fi suficient de eficient pentru a capta particule solide mai ușoare și mai mici de 1 micron din fluxul de gaze de eșapament al motorului diesel.

Pentru o extracție mai completă a particulelor solide din gazele de eșapament în soluția tehnică propusă este utilizat un câmp electric. Viteza câmpului electric generat în dispozitivul propus de convertorul de creștere a tensiunii de impuls este aproximativ invers proporțională cu rădăcina pătrată a distanței față de electrodul de impuls și poate fi calculată folosind formula Landenburg [Bochkarev V.V. Teoreticheskie osnovy technologicheskikh protsesov ohrany okruжайuschey sredy. – Tomsk: izd. TPU, – 2002. pag. 96 <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/a/AMANANKOVA/Training%20activities/Processes%20and%20devices%20of%20environmental%20protection2/Tab/Бочкаре%20В.В.%20Теоретические%20осн.pdf>], valabilă aproximativă pentru aer cu temperatură normală (m/sec):

$$v_e = 5,34 \cdot 10^{-7} \cdot E / \sqrt{H} \quad (5),$$

unde: H - este distanța dintre electrozii de impulsuri și de ionizare, $H=0,0225$ m;
 E - forța câmpului electric, V/m.

Luăm raza electrodului de impulsuri 9 (pinul metalic rotund) - $r_1=0,005$ m, iar raza interioară a electrodului de ionizare 7 (spirală metalică) - $r_2=0,0275$ m. Alegem convertorul de creștere a tensiunii de impuls 10 cu o tensiune de

impuls de $U_s=25$ kW. Determinăm puterea câmpului electric E_{max0} din camera de separare a energiei 8 conform formulei pentru calcularea câmpului electric al unui cablu coaxial:

$$E_{max0}=U_s/r_1 \cdot \ln(r_2/r_1) \quad (6),$$

$$E_{max0}=25/(0,005 \ln(0,0275/0,005))$$

$$E_{max0}=25/(0,005 \cdot 1,7047)=2\,933 \text{ (kW/m)}=29 \text{ (kW/cm)}.$$

Valoarea rezultată este mai mică decât valoarea admisă a puterii maxime a câmpului electric pentru aer sau fum $E_{max}=30$ kW/cm.

Viteza câmpului electric v_e (m/s) create în dispozitivul propus va fi, conform formulei:

$$v_e=5,34 \cdot 10^{-7} \cdot 2\,933 \cdot 10^3 / \sqrt{0,0225}$$

$$v_e=10,44 \text{ (m/s)}.$$

Când forța câmpului electric în golul de descărcare dintre electrozii dispozitivului propus este $E_{max0}=2\,933$ kW/m, iar fluxul de electroni cu o viteză $v_e=10,44$ m/s va trece distanța dintre electrozi în $H=0,0225$ m per $t_e=0,0022$ s. Prin urmare, când timpul de curgere al gazului de evacuare fierbinte prin camera de separare a energiei 8 în câmpul de descărcare Corona al electrodului negativ are mărimea de $t=0,049$ s, electronii pot încărca de 22,3 ori mai multe particule solide. Acest lucru va permite încărcarea calitativă a acestor particule din fluxul de gaze de evacuare fierbinți în fluxul de gaze de evacuare reci.

Viteza particulelor solide încărcate v_p derivă într-un câmp electric fără a ține cont de proprietățile lor dielectrice și poate fi estimat prin metoda Vetoshkin A.G. [Vetoshkin A.G., Tarantseva K.R. – Технология защиты окружающей среды (теоретические основы), Пенза: Пензенский технологический институт, 2004. <http://window.edu.ru/resource/888/36888/files/stup114.pdf>].

Pentru particule mai mici de 1 micron:

$$v_{p1}=0,17 \cdot 10^{-11} \cdot E/\mu_0 \quad (7),$$

unde: E - este puterea câmpului electric, $E_{max0}=2\,933$ kV/m;

m_{eg} - este vâscozitatea dinamică a gazului de eşapament μ , acceptam pentru azot la 600°C $\mu_0=3665 \cdot 10^{-8}$ Pa·s [Динамика вязкости газов и паров, Справочник по схожествам веществ и материалов, <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazy-raznye/dinamicheskaya-vyazkost-gazov-i-parov>], deoarece cota de azot din gazul de eşapament este de aproximativ 77%.

$$v_{p1}=0,17 \cdot 10^{-11} \cdot 2,933 \cdot 10^6 / 3665 \cdot 10^{-8}$$

$$v_{p1}=0,136 \text{ (m/s)}.$$

În consecință, în timpul $t=0,071$ s de expunere sub acțiunea unui câmp electric, particulele solide cu dimensiuni mai mari de 1 micron vor dobândi până la 80% din sarcină și cu o viteză de derivație $V_{p1}=0,136$ m/s, trec din centrul fluxului de gaze fierbinți $H/4=0,0056$ m de la debit fierbinte la debit rece cu timpul deplasării $t_{D1}=0,041$ s de 1,7 ori.

Pentru particule mai mari de 1 micron $r=2$ μm :

$$v_{p2}=10^{-11} \cdot E^2 r / \mu_0 \quad (8),$$

$$v_{p2}=10^{-11} \cdot (2,933 \cdot 10^6)^2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} / 3665 \cdot 10^{-8}$$

$$v_{p2}=4,69 \text{ (m/s)}.$$

În consecință, în timpul $t=0,071$ s de expunere sub acțiunea unui câmp electric, particule solide cu dimensiuni mai mari de 1 micron cu o viteză de derivație $V_{p2}=4,69$ m/s, trec din centrul fluxului de gaze fierbinți $H/4=0,0056$ m de la debit fierbinte la debit rece cu timpul deplasării $t_{D2}=0,0012$ s de 59,2 ori.

Având în vedere turbulența fluxului vortex a gazelor de eşapament, se poate aștepta ca câmpul electric să se mărească în mod semnificativ cu o eficiență de îndepărtare a particulelor solide cu dimensiuni mai mici de 1 micron față de fluxul gazelor de evacuare în plus față de ieșirea particulelor datorită efectului separării energiei de vârf a conductei Ranque-Hilsch Vortex Tube.

Rezultatele de Kap-Jong și colab. [R. Kap-Jong, K. Jung-soo and C. In-Su, Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube. JSME International Journal, 47(1), p. 29-36, 2004] au arătat că, odată cu creșterea presiunii și a debitului la intrarea tubului vortex, eficiența de separare pentru particulele de pulbere mai mari de $D=5$ μm scade, dar crește pentru particule de pulbere fine. Au constatat că eficiența de separare de 93% poate fi obținută la o viteză de intrare de $V_i=14,52$ m/s.

$$v_i=65,42 \text{ (m/s)}.$$

Rezultatele calculului au arătat validitatea utilizării unui câmp electric pentru îndepărtarea particulelor solide mari cu dimensiuni mai mari decât $D=5$ μm din fluxul de gaze de eşapament dintr-un tub vortex. De atunci, Kap-Jong și colab [R. Kap-Jong, K. Jung-soo and C. In-Su, Experimental Investigation on Dust Separation Characteristics of a Vortex Tube. JSME International Journal, 47(1), p. 29-36, 2004] au arătat că odată cu creșterea presiunii la intrarea în tubul vortex, prin urmare, crește și viteza de curgere peste $V_i=14,52$ m/s, eficiența de separare a particulelor mai mari decât $D=5$ μm scade, iar eficiența de separare a particulelor mai mici crește. În acel moment, în soluția tehnică propusă, cu o viteză a fluxului peste $V_i=65,42$ m/s, câmpul electric face posibilă îndepărtarea particulelor mari ($r=2$ μm) de peste 30 de ori mai eficient, cu dimensiunea mai mică decât $D=1$ μm .

Să verificăm dacă apare descărcarea Corona pe electrodul de impulsuri la tensiunea selectată convertorului de creștere a tensiunii de tip impuls.

Descărcarea Corona are loc la o anumită forță de câmp. Această valoare se numește intensitate critică și pentru polaritatea negativă a electrodului poate fi determinată prin formula empirică:

$$E_{cr} = 3,04(\beta + 0,0311\sqrt{\frac{\beta}{r}})10^6 \quad (9),$$

unde r - este raza electrodului de ionizare, $r=0,0275$ m;

β - este raportul dintre densitatea gazului în condițiile de operare și densitatea gazului în condițiile standard ($t=20^\circ\text{C}$; $p=1,013\cdot 10^5$ Pa):

$$\beta = (B + p_r(273 + 20)) / (1,013 \cdot 10^5(273 + t)) \quad (10),$$

unde B - este presiunea barometrică, Pa;

p_r - este vid sau presiunea absolută a gazelor, Pa;

$$\beta = (1,013 \cdot 10^5 + 2,026 \cdot 10^5(273 + 20)) / (1,013 \cdot 10^5(273 + 600))$$

$$\beta = 8,94.$$

Formula (9) este destinată aerului, dar cu oarecare aproximativitate poate fi utilizată și pentru gazele arse:

$$E_{cr} = 3,04(8,94 + 0,0311\sqrt{8,94/0,0275}) \cdot 10^6$$

$$E_{cr} = 2888 \text{ (kW/m)}.$$

Deci, într-un tub vortex, forța câmpului $E_{\max} = 2933$ kW/m este mai mare decât forța critică a câmpului $E_{cr} = 2888$ kW, prin urmare, sunt îndeplinite condițiile pentru asigurarea unei descărcări Corona cu convertorul de creștere a tensiunii de impuls 10 utilizată.

Să determinăm, de asemenea, energia necesară pentru încălzirea aerului cu bujii incandescente tipice pentru autovehicule, până la temperatura de aprindere a funinginii și benzopirinei, pentru arderea acestuia.

Datele tehnice ale bujiilor incandescente de tip CY 55 [Замена свечей накальвания, Автоспециалист плюс Nr. 7, март 2014, Ежемесячный образовательный журнал Ассоциация EUROAUTO. <http://www.autospecialist.info/wpcontent/uploads/2013/10/6nox14-уроx-26-Тех-обсmpm4Barme-3amena-cBeitei-naxam.pdf>]: tensiune: $U=11$ V; rezistență: $R=0,5$ Ω . Patru bujii incandescente $n=4$ consumă energie:

$$P = I^2 \cdot R \cdot n \quad (11),$$

unde, curentul care trece prin bujia incandescentă: $I = U/R = 11\text{V}/0,5 \Omega = 22$ A.

$$P = 22^2 \cdot 0,5 \cdot 4 = 968 \text{ (W)}.$$

Funinginea se aprinde la 550°C . Acceptăm temperatura de încălzire a aerului pentru arderea funinginii cu o marjă de $T_2 = 600^\circ\text{C}$.

Atunci când căldura este transferată în aer de către suprafața incandescentă încălzită, aerul de curgere va fi încălzit ca într-un încălzitor electric, pentru a încălzi un metru cub de aer de curgere $L_1 = 1,0$ m³/h, luând în considerare pierderile de energie în timpul transferului de căldură, folosim, ca o primă aproximație, formula [Calculul cantității de căldură pentru a încălzi aerul, online, <http://tgvs.com/ru/kalorifer.html>; Инженерная помощь, Информационный портал <http://helpeng.m/programs/ventilation/water heater.php>]:

$$Q = L_1 \cdot \rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (12),$$

unde ρ - este densitatea aerului, valoarea standard la nivelul mării în conformitate cu atmosfera standard internațională este valoarea $\rho = 1,225$ kg/m³, care corespunde densității aerului uscat la 15°C și presiunii de 101,33 kPa;

c - este căldura specifică a substanței în J/(kg·K). Capacitatea de căldură specifică în masă a aerului uscat este de 1 kJ/(kg·K) = 0,24 kcal/(kg·°C).

$$Q = 1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,24 \text{ kcal/(kg} \cdot \text{°C)} \cdot (600^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$Q = 170,5 \text{ kcal/h}.$$

Deoarece 1 kcal = 1,163 (W), puterea electrică necesară va fi $P_1 = 198,3$ (W/h). Pentru încălzirea 1 m³ de aer timp de 1 s, este necesară o putere $Q_1 = 713,9$ (W). Cu puterea totală a bujiilor incandescente de $P_b = 968$ W timp de 1 s, ele pot încălzi de la $T_1 = 20^\circ\text{C}$ la $T_2 = 600^\circ\text{C}$

$$L = P_b / Q_1 \quad (13),$$

$$L = 968 / 713,9 = 1,35 \text{ (m}^3/\text{s)}.$$

La mersul în gol cu turația de 600 rot./min, un motor diesel în 4 timpi, cu o capacitate cilindrică de 2,0 cm³ absoarbe 150 m³ de aer. În cazul în care 20% din cantitatea de aer introdusă de un motor diesel la recircularea gazelor de eșapament, aceasta va ajunge la 0,5 m³/s, prin urmare combustia fiabilă a particulelor solide (funingine) în elementul filtrant 1 poate fi asigurată cu un număr mai mic de bujii incandescente.

Informații care confirmă posibilitatea realizării invenției.

Dispozitivul propus are dimensiuni comparabile cu dimensiunile conductelor sistemului de evacuare a gazelor de eșapament ale automobilului și pot fi ușor încorporate în ansamblul motorului cu ardere internă. Tubul vortex utilizat, reprezintă un tub cilindric cu o cameră de separare a energiei 8 și o cameră 4 cu duze, fixate rigid. În calitate de cablu de înaltă tensiune sunt utilizate firele de înaltă tensiune ale bujiilor. Există mulți producători de tuburi vortex, în lume sunt produse astfel de tuburi în serie, de aceea costul variază între 30 și 150 de dolari SUA. Este de

așteptat că fabricarea tubului pentru dispozitivul propus necesită aproximativ 50-100 de dolari SUA, luând în considerare costul de fabricare a conului dielectric al valvei conice, plasată pe capătul cald al tubului vortex 2 cu acționare electrică, care permite reglarea fluxului gazelor de eșapament îndreptate către conducta de recirculare a gazelor. Converterul de creștere a tensiunii de impuls poate fi confecționat pe celebrul cronometru 555 (tip KR1006V1, un analog al modelului NE555) - unul dintre cele mai răspândite. Datorită construcției simple, dispozitivul nu necesită aproape nicio ajustare și are o eficiență înaltă. Programatorul este conectat în funcție de circuitul generatorului de impulsuri și de circuitul de reglare a frecvenței și este reglat la o frecvență de 27 kHz și conectat la înfășurarea anodică a unui transformator în linie diodă-cascadă, care produce o tensiune de alimentare a celui de-al doilea anod al kinescopului 25-30 kV. Alimentarea sursei de curent de impuls de înaltă tensiune este de 12 V la un curent de 2 A, această sarcină va fi aprovizionată de bateria de acumuloare a automobilului, precum și de elementele de încălzire electrice 13 (bujii incandescente).

Converterul de creștere a tensiunii de impuls 10 consumă aproape 30-35 W și produce tensiunea la ieșire 25 - 30 kV. Electroful de ionizare 7 este executat în formă de spirală introdusă în camera de separare a energiei 8 al tubului vortex 2 la o distanță de 22,5 mm de la electroful de impulsuri 9, executat în formă de știft metalic rotund.

Costul tranzistorului IRF630 nu depășește 1 Euro, analogul KR1006V1 IC NE555 este de aproximativ 0,2 Euro.

În total, punerea în aplicare a dispozitivului propus poate fi estimată la 60-100 de Euro. Prin urmare, costul așteptat al dispozitivului pentru recircularea și epurarea gazelor de eșapament de fracții solide și gaze toxice ale motorului cu ardere internă pentru autoturisme este comparabil cu costul unui filtru de particule al motorului diesel și mai mic decât costul agentului de curățire catalitic. În plus, utilizarea dispozitivului propus exclude supapa de recirculare a gazelor de eșapament (Exhaust Gas Recirculation EGR) din sistemul de recirculare a gazelor de eșapament, deoarece funcția sa de a regla fluxul de gaze de evacuare în sistemul de recirculare este realizată de valva conică 5 acționată de bobina 11. Un alt avantaj important este posibilitatea de a crea un debit de aer recirculat încălzit pentru regenerarea eficientă a elementului filtrant 1 de particule solide, fără a necesita înlocuirea elementului filtrant 1 sau utilizarea unui mod special de funcționare a motorului cu ardere internă, așa cum se face cu restabilirea activă a elementului filtrant 1, prin distrugerea particulelor solide (funingine, carbon) din elementul filtrant 1 unit prin conducta de recirculare a gazelor cu colectorul de admisie al motorului cu ardere internă la temperaturi înalte cu exces de aer.

Principalul efect al dispozitivului propus este curățirea profundă a gazelor de eșapament de particule solide (funingine și benzopirina) până la particule cu un diametru mai mic de 50 nm, ceea ce reduce riscul de cancer, poluarea mediului, prin arderea gazelor toxice în camera de ardere a motorului cu ardere internă, precum și reducerea emănării acestora.

Având în vedere cele expuse mai sus, dispozitivul dat poate fi realizat din punct de vedere tehnic și utilizat în industrie, fiind capabil să recupereze costurile de implementare, adică satisface criteriul de aplicabilitate industrială.