

DOI: 10.34132/ers.2023.01.01.07

Сергій Іванович Кузнєцов

кандидат технічних наук, доцент кафедри загальноосвітніх гуманітарних та природничих дисциплін секції хімії, екології та безпеки життєдіяльності, Херсонський національний технічний університет, Хмельницьк, Україна

Олена Олексіївна Венгер

кандидат технічних наук, доцент, в.о. завідувачка кафедри загальноосвітніх гуманітарних та природничих дисциплін, Херсонський національний технічний університет, Хмельницьк, Україна

Віолета Михайлівна Безпальченко

кандидат хімічних наук, доцент кафедри загальноосвітніх гуманітарних та природничих дисциплін секції хімії, екології та безпеки життєдіяльності, Херсонський національний технічний університет, Хмельницьк, Україна

Оксана Олександрівна Семенченко

кандидат технічних наук, доцент кафедри загальноосвітніх гуманітарних та природничих дисциплін секції хімії, екології та безпеки життєдіяльності, Херсонський національний технічний університет, Хмельницьк, Україна

ПРОМИСЛОВИЙ ЦИКЛОННО-РОТАЦІЙНИЙ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧ

Циклонне обладнання просте у виготовленні і експлуатації, універсальне і економічне, але істотним недоліком його є неможливість вловлювати високодисперсний пил. У статті розглянуто найважливіші характеристики розробленого нами вискоєфективного промислового циклонно-ротаційного пиловловлювача. В апараті здійснюється принцип двоступеневого розділення неоднорідних пило-газових систем у відцентровому полі. У першому ступені, працюючому по принципу циклона, та у другому - працюючому по принципу ротаційного пиловловлювача. При роботі апарата, більш високий тиск на периферії ротаційної частини повертає концентрований запилений потік з малою витратою газу у циклонну частину. Утворений цілиною, між корпусом циклона і поділяючим конусом, замкнутий контур з'єднує вихід і вхід ЦРП між собою. Виникає негативний зворотний зв'язок – ефективний механізм керування такими складними імовірнісними системами як газові гетерогенні криволінійні плинні. Негативний зворотний зв'язок стабілізує процеси, що протікають у таких плинах. Енергія електродвигуна використовується в ЦРП для переміщення запиленого газу, концентрації, коагуляції вискодисперсного пилу, його повернення з ротаційної в циклонну зону, диспергування і уловлювання, з метою економії енергетичних і матеріальних ресурсів. Основне завдання теорії відцентрової сепарації запиленних потоків полягає у знаходженні мінімального діаметру частки, що має практично відсутню відносну радіальну швидкість.

Відомі детерміновані моделі відцентрової сепарації або занадто прості і ігнорують багато факторів, що визначають процес, або в спробах їхнього обліку занадто громіздкі і важко розв'язувальні, хоча також не вільні від різних допущень й обмежень. Стохастична модель враховує інтегральну множину різних впливів на радіальний дрейф стоксівської частинки від центра до периферії закрученого потоку. У роботі надані результати дослідження структури тривимірної двофазної течії газового потоку з вискодисперсними включеннями в циклонно-ротаційних пиловловлювачах по 3D геометричних моделях з метою візуалізації цих течій методами комп'ютерної графіки. Чисельні дослідження були проведені за k-ε моделлю турбулентності з масштабованими пристіночними функціями.

Ключові слова: розділення неоднорідних пило-газових систем, негативний зворотний зв'язок, циклонно-ротаційний пиловловлювач.

INDUSTRIAL CYCLONE-ROTARY DUST COLLECTOR

Cyclone equipment is easy to manufacture and operate, versatile and economical, but its main drawback is the inability to capture finely dispersed dust. The article discusses the most important characteristics of the highly efficient industrial cyclonic rotary dust collector developed by us. The apparatus implements the principle of two-stage separation of heterogeneous dust-gas systems in a centrifugal field. In the first stage, working on the principle of a cyclone, and in the second - working on the principle of a rotary dust collector. During operation of the apparatus, a higher pressure on the periphery of the rotating part returns a concentrated dusty flow with a low gas flow to the cyclone part. Formed by a gap, between the cyclone body and the dividing cone, a closed circuit connects the output and input of the cyclone-rotational dust collector to each other. There is a negative feedback - an effective control mechanism for such complex probabilistic systems as gas heterogeneous curvilinear flows. Negative feedback stabilizes the processes occurring in such flows. The energy of the electric motor is used in the cyclone-rotational dust collector for the movement of dusty

gas, concentration, coagulation of fine dust, its return from the rotary to the cyclone zone, dispersion and capture, with the aim of saving energy and material resources.

The main task of the theory of centrifugal separation of dusty flows is to find the minimum diameter of a particle that has a practically perceptible relative radial velocity. Known deterministic models of centrifugal separation are either too simple and ignore many factors that determine the process, or in attempts to account for them are too cumbersome and difficult to solve, although they are also not free from various assumptions and limitations. The stochastic model takes into account the integral set of various influences on the radial drift of the Stokes particle from the center to the periphery of the swirling flow. The paper presents the results of the study of the structure of the three-dimensional two-phase gas flow with highly dispersed inclusions in cyclonic-rotary dust collectors using 3D geometric models with the aim of visualizing these flows using computer graphics methods. Numerical studies were carried out using the $k-\varepsilon$ model of turbulence with scaled wall functions.

Key words: separation of heterogeneous dust-gas systems, negative feedback, cyclone-rotational dust collector.

Вступ. Створення нових ефективних методів і апаратів очистки та вдосконалення діючої газоочисної апаратури є єдиним шляхом захисту повітряного басейну від забруднення промисловими та вентиляційними викидами. Поєднання декількох принципів пилоочищення в одному апараті та створення контрольованих додаткових сил сприяючих пилоочищенню в робочому об'ємі апарату дозволить підвищити ефективність пилоочищення та створити умови для додаткового розділення пило-газового потоку при проходженні через апарат. Але, крім цього, подібні заходи не повинні істотно підвищувати гідравлічний опір апарату.

Сучасна теплоенергетика, промисловість і автотранспорт викидає в атмосферне повітря значну кількість забруднень, при цьому тверді частинки здатні накопичуватися та переміщатися на великі відстані. Підвищення ефективності очищення димових газів від двоокису сірки, оксиду вуглецю, оксидів азоту і пилу – актуальна проблема, рішення якої становить теоретичний інтерес і має велике практичне значення. Комплексне очищення димових газів поліпшує екологічну обстановку й заощаджує природні ресурси.

Мета роботи. В роботах [1-3] вказується та експериментально досліджується низка заходів щодо поліпшення очищення запиленних газів. Представлена конструкція вдосконаленого циклонно-ротаційного пиловловлювача, здатного працювати в сухому та мокрому режимах, що працює за принципом циклону, і одночасно ротаційного пиловловлювача [4].

Можливості обчислювальної техніки дозволяють з високою точністю моделювати течії з врахуванням всіх характеристик потоку (в'язкість, турбулентність тощо). Сучасні засоби моделювання, засновані на чисельному рішенні рівнянь гідрогазодинаміки, дозволяють проаналізувати вплив цих факторів і обчислити розрахункову ефективність пиловловлення на стадії експлуатації.

Метою даної роботи є розрахункове визначення структури течії двофазного потоку у внутрішньому об'ємі циклонно-ротаційного пиловловлювача.

Працює ЦРП наступним чином. Пило-газовий потік через вхідний тангенціальний патрубок попадає в апарат та після класичного циклонного процесу попадає в центральну трубу, на виході з якої за рахунок обертання лопатевого колеса створюються додаткові відцентрові зусилля, котрі разом з розпиленням рідини (об'єднання мокрого – в цій роботі не досліджується – та інерційних способів додаткового очищення) створюють умови для глибокої очистки пило-газової суміші.

Для комп'ютерного моделювання залежно від типу руху обирається модель, тобто набір рівнянь, якими описується динаміка системи. Істотно дозвуківий рух газового потоку описується математичною моделлю Incompressible fluid (нестискаєма рідина) з Particles (частинки), призначеною для моделювання двофазної течії газу (рідина) з частинками при значних (турбулентних) числах Рейнольдса і при малій зміні густини.

Розрахункова схема апарату, відповідно до конструкції показана на рис.1.

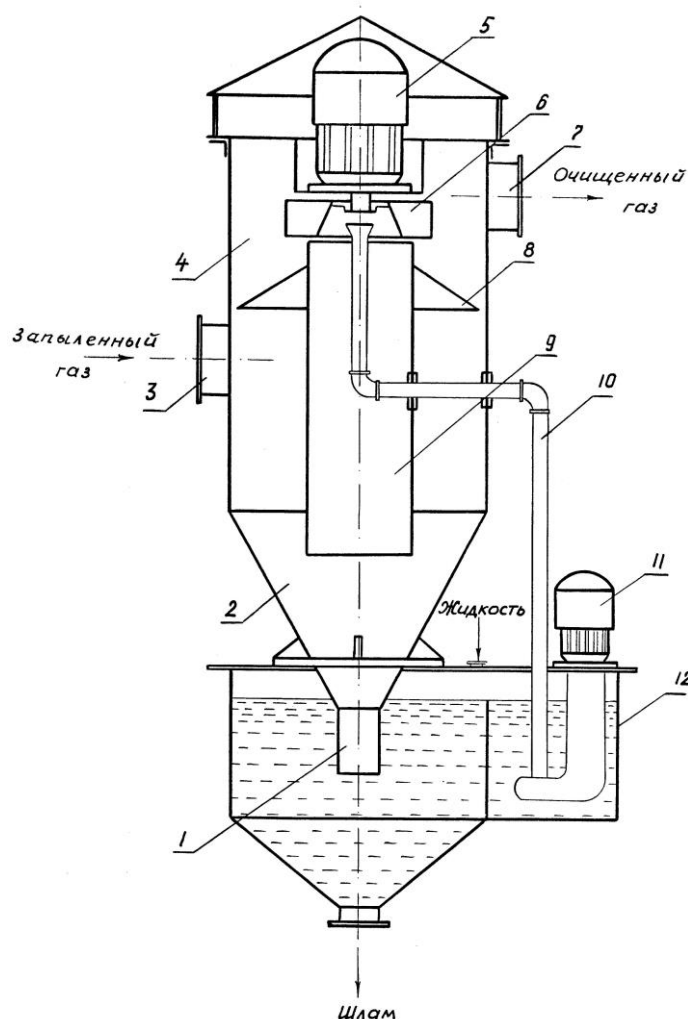


Рис. 1. Схема циклонно-ротаційного пиловловлювача.

При робочих режимах у циклонно-ротаційному пиловловлювачі спостерігається наявний розвинутий турбулентний рух газу, тому для адекватного проведення чисельних розрахунків необхідно використовувати замкнені моделі турбулентності. Однією з найпростіших моделей турбулентності першого рівня замкнутості є k - ε модель турбулентності [5]. Вона добре зарекомендувала себе в задачах зі значною кривизною ліній току, яка й була використана в даній роботі з чисельною реалізацією методом скінчених елементів [6,7]. Стосовно до стаціонарного процесу – рівняння складаються, як завжди, з рівнянь нерозривності та руху (1,2 – проводиться підсумовування за повторюваними індексами):

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (v_i v_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} p^* + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_e \tau_{ij}) + f_i, \quad (2)$$

де

$$p^* = p + \frac{2}{3} \rho k, \quad \tau_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}, \quad v_e = v + v_t,$$

k – питома кінетична енергія турбулентності, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, ν_t – турбулентна в'язкість, p – осереднений тиск, v_i – осереднені компоненти вектора швидкості в декартовій системі координат, f_i – вектор масових сил.

Для замкнення (1, 2) останнім часом набула поширення двопараметрична k - ε модель турбулентності завдяки доброму збігу отримуваних чисельних результатів з експериментальними даними (3-5), а також значній швидкості збіжності базового алгоритму. В цій моделі параметри турбулентності підраховуються з рівнянь:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (k v_j - \nu_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) = H_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon v_j - \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) = H_\varepsilon \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

де ε – швидкість дисипації турбулентної енергії,

$$H_k = G - \varepsilon, H_\varepsilon = C_{\varepsilon 1}^* \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

$$G = \nu_t \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \eta \frac{1 - \eta/\eta_0}{1 + \beta \eta^3}, \eta = \sqrt{\frac{G}{C_\mu \varepsilon}},$$

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}, \nu_\varepsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}.$$

Емпіричні константи в наведених рівняннях дорівнюють:

$$C_\mu = 0.0845, C_{\varepsilon 1} = 1.42, C_{\varepsilon 2} = 1.68,$$

$$\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.72, \eta_0 = 4.38, \beta = 0.015.$$

Відомо, що подібна модель дає прийнятні результати для областей з розвинутою турбулентністю, тобто при $\nu_t \gg \nu$. Звичайно, що це не виконується біля твердої стінки. У зв'язку з цим, для визначення параметрів турбулентності біля стінки додатково задаються емпірично отримані закони поведінки рідини, що задаються додатково у вигляді пристіночних функцій. Вказана k - ε модель турбулентності або близькі до цієї моделі реалізовані в багатьох програмних продуктах.

Динаміка частинок (particles) описується диференціальним рівнянням руху вказаних частинок:

$$\frac{dX_p}{dt} = V_p \quad (6)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{\pi d^2}{8m} C_D \rho |V_r| V_r + g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) - \frac{\nabla p}{\rho_p} \quad (7)$$

де X_p – вектор положення частинок, V_p – швидкість частинки, d – діаметр частинок, m – маса частинок, C_D – коефіцієнт опору, V_r – швидкість частинки відносно несучої фази, ρ_p – об'ємна маса матеріалу частинок.

Розрахункове дослідження було з допомогою пакету COMSOL Multiphysics. Була створена 3D модель циклонно-ротаційного пиловловлювача. Розрахункова область з сіткою скінченних елементів вказана на рис. 2.

Розрахункова сітка нараховувала близько 120 тис. елементів. Було проведено комплексне моделювання течії двофазного потоку в створеній геометричній конфігурації розрахункової області.

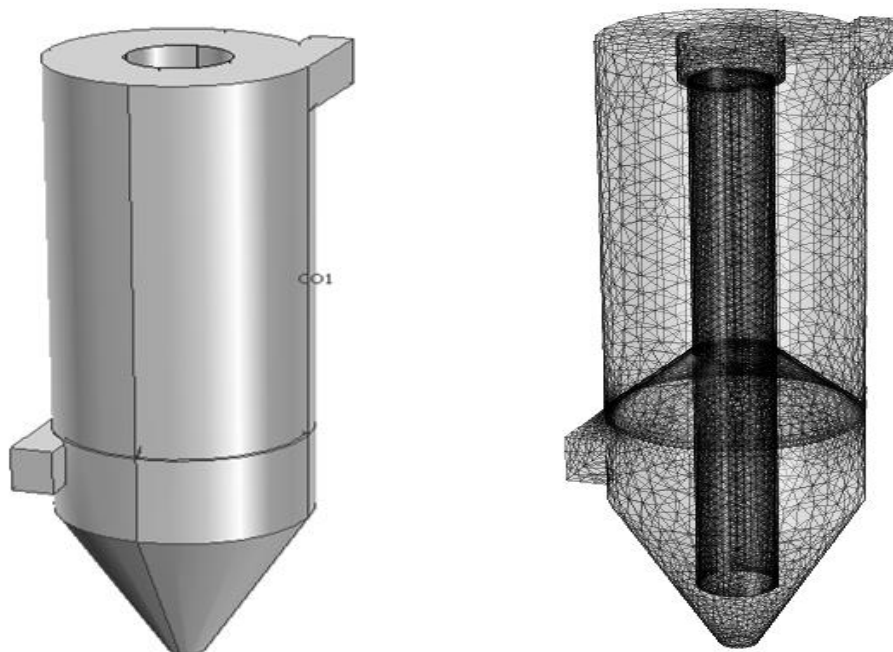


Рис. 2. Сітка скінченних елементів в циклонно-ротаційному апараті.

Основні вхідні дані винесені в табл. 1:

Таблиця 1

№	Найменування	Ім'я змінної	Значення	Розмірність
1	Швидкість запиленого середовища у нижньому патрубку	$V_{\text{нижн}}$	20	м/с
2	Суцільне середовище		Повітря, 20 °С	
3	Об'ємна маса матеріалу частинок	ρ_s	1700	кг/м ³
4	Діаметр частинок	d_s	10	мкм
5	Робочий діаметр апарату	D	0,3	м
6	Частота обертання крильчатки	n	1500	хв ⁻¹

Гідродинамічний розрахунок дозволяє визначити опір апарату й передбачити траєкторії руху дуже дрібних частинок.

Візуалізацію результатів обчислень здійснено за допомогою постпроцесору. Постпроцесор надає великий вибір методів візуалізації скалярних і векторних змінних на різних геометричних об'єктах, а також дозволяє зберігати дані у файл для обробки іншими засобами.

Розподіл тиску та лінії потоку газу в апараті при швидкості подачі 20 м/с показані на рис. 3. Розрахунковий надлишковий тиск на вхідному патрубку апарату становить приблизно 750 Па. Газ, що подається через нижній отвір, набуває вихрового руху – класичного для циклонного обладнання, але далі проходить достатньо складна за характером зміна напрямку обертання за рахунок обертання крильчатки.

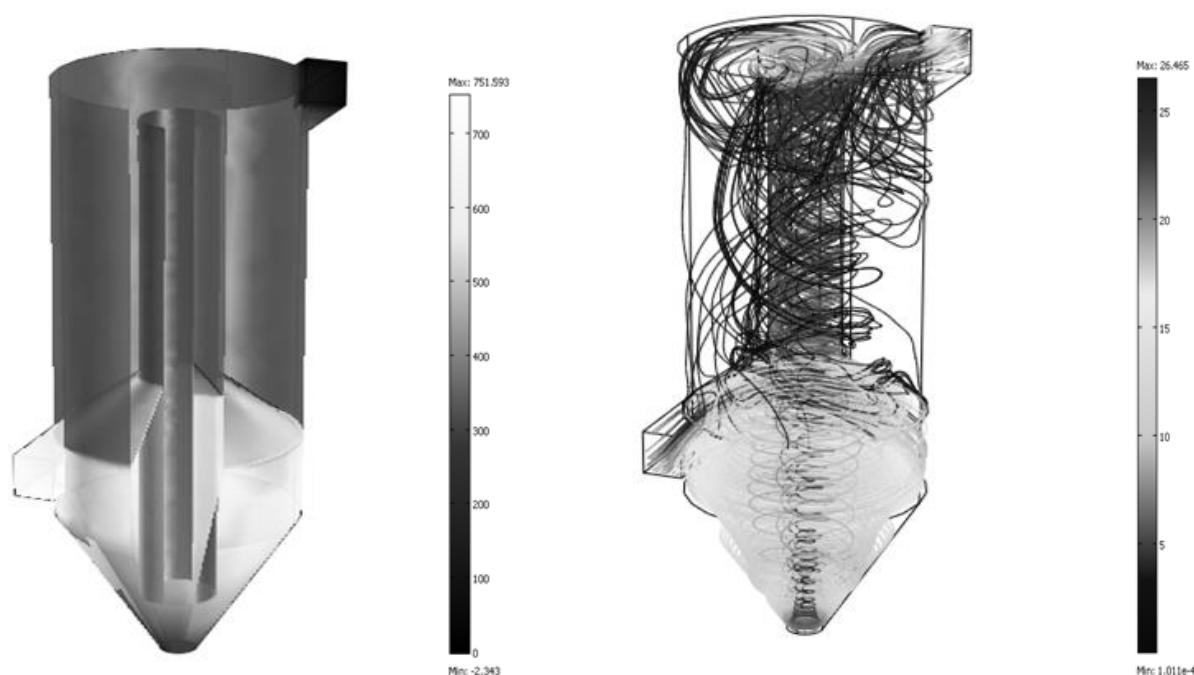


Рис. 3. Розподіл абсолютних швидкостей у колекторній камері перед розподільною вставкою.

Трасекторії руху контрольних частинок-маркерів, взятих вибірково в характерних зонах апарату аж до моменту їх зіткнення зі стінками корпусу або центральної труби, показано на рис. 4:

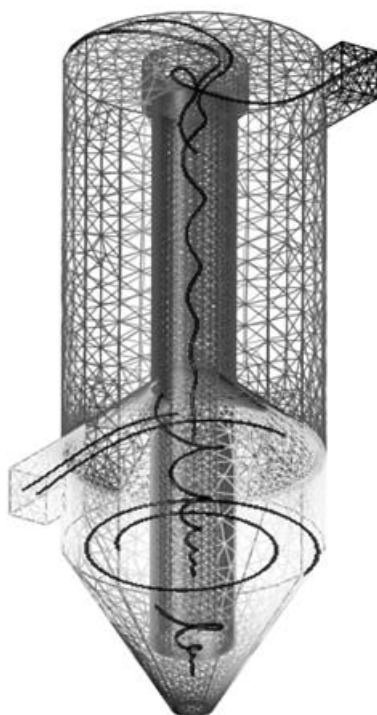


Рис. 4. Трасекторії руху контрольних частинок-маркерів

Результати моделювання досить добре співпадають з натурними дослідженнями [6]. Вказані конструктивні особливості апарату не створюють значного гідралічного опору, розрахункові та експериментальні дані відповідають характерним значенням для промислової апаратури.

Висновки. Проведений аналіз гідродинаміки руху рідини в циклонно-ротаційному апараті виявляє достатньо складний характер руху газу, результатом якого є висока пиловловлювача здатність. Треба також зазначити, що проведення подібних чисельних експериментів по моделюванню роботи вказаного обладнання стосовно до визначення більш ефективних геометричних конфігурацій для покращення роботи є перспективним завданням, особливо в світлі збігів з експериментальними даними не тільки якісних, але й кількісних в значеннях гідравлічних опорів. Підвищений пиловловлюючий ефект ЦРП забезпечується за рахунок циркуляції газу, при якій дрібнодисперсний пил повертається з ротаційної зони в циклонну, де відбувається коагулювання. Розроблений пиловловлювач має ряд переваг у порівнянні зі звичайними циклонами:

- може працювати автономно (без вентилятора) і очищувати гази, що не мають початкового надлишкового тиску;

- ефективно вловлює дрібний пил діаметром від 4 мкм завдяки великій відцентровій силі, що діє на частинку в ротаційній частині пиловловлювача;

- забезпечує тонке диспергування рідини і виключно рівномірне (кругове) зрошення стінок апарату за рахунок обертового ротора, що дозволяє йому ефективно вловлювати пил що злипається.

Список використаних джерел

1. Кузнецов С. І. Очищення газів вапняно-випалювальних печей // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2007. – №3(29). – С.74-86.

2. Пат. UA 62855A Кузнецов С. І. Херсонський державний технічний університет. Спосіб очищення відхідних газів котельних від оксиду вуглецю та пристрій для його реалізації. 15.12.2003. Бюл. №12.

3. Пат. UA 62856A Кузнецов С. І. Херсонський державний технічний університет. Спосіб очищення відхідних газів котельних текстильних підприємств.

4. Патент на корисну модель №62802 Україна, МПК В04С3/04(2006.01), В04С5/24(2006.01), В04С5/30(2006.01). Циклонно-ротаційний пиловловлювач / Кузнецов С.І. (Україна); Заявл. 22.04.11; Опубл. 12.09.11, Бюл. №17, 2011.

5. Черный С. Г., Грязин Ю. А., Шашкин П. А. Численное моделирование пространственных турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе k-ε моделей // Вычислительные технологии. – 1999. – Т. 4. № 2. – С. 74-94.

6. Кузнецов С. І. Дослідження характеристик циклонно-ротаційного пиловловлювача // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2006. – №3(26). – С.85-94.

7. Пат. №67180 МКВ F23J11/00 Михайлик В. Д., Михайлик С. В., Кузнецов С. І. ХДТУ. Пристрій для очищення і утилізації тепла відхідних газів. Бюл. №6, 2004