УДК 66.074.48:621.928.9

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ВЛОВЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТОК У ВІДЦЕНТРОВОМУ ФІЛЬТРІ

Бойко Т.В., Семенюк М.В., Плашихін С.В.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ФИЛЬТРЕ

Бойко Т.В., Семенюк Н.В., Плашихин С.В.

COMPUTER SIMULATION OF AERODYNAMIC PROCESSES AND COLLECTION EFFICIENCY OF PARTICULATE MATTER IN THE CENTRIFUGAL FILTER

Boyko T., Semeniuk N., Plashykhin S.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна
ko_s@meta.ua

Досліджено аеродинамічні характеристики відцентрового фільтра. Проведено чисельні розрахунки залежності аеродинамічного опору і ефективності роботи відцентрового фільтра від витрати потоку. Чисельне моделювання течії потоку проводилося рішенням CFD методом рівнянь Рейнольдса із застосуванням k-ε моделі турбулентності для трьох режимів роботи апарату.
Ключові слова: *відцентровий фільтр, аеродинамічний опір, ефективність уловлювання, комп'ютерне моделювання*

Исследованы аэродинамические характеристики центробежного фильтра. Проведены численные расчеты зависимости аэродинамического сопротивления и эффективности работы центробежного фильтра от расхода потока. Численное моделирование течения потока проводилось решением CFD методом уравнений Рейнольдса с применением k–ε модели турбулентности для трех режимов работы аппарата
Ключевые слова: *центробежный фильтр, аэродинамическое сопротивление, эффективность улавливания, компьютерное моделирование*

The aerodynamic characteristics centrifugal filter have been investigated. We have performed numerical calculations of the dependence of the aerodynamic drag and performance of the centrifugal filter on the rate of flow. Computational modeling of the flow was carried out by solving Reynolds equations by the SFD method with the use of a k–ε model of turbulence for three modes of operation of the apparatus.
Keywords: *centrifugal filter, aerodynamic drag, collection efficiency, computer simulation*

Вступ

Захист повітряного басейну від забруднення промисловими викидами є однією з найважливіших проблем сучасності, що охоплює в тій чи іншій мірі практично всі

країни світу, незалежно від рівня їх промислового розвитку. На вирішення цієї проблеми в промислово розвинених країнах виділяються значні кошти, адже обсяги викидів в атмосферу обмежуються міжнародними конвенціями, і впровадження нових безвідходних технологій виробництва, створення нових ефективних методів і апаратів очистки, вдосконалення діючої газоочисної апаратури є єдиним шляхом для зростання обсягів господарської діяльності та розширення виробництва.

При проектуванні нових високоефективних пиловловлювачів необхідно використовувати останні досягнення фундаментальних і прикладних наук, високі технології проектування і виробництва в області газодинамічних досліджень процесів очистки неоднорідних газових систем в полі відцентрових сил.

Аналіз досліджень

Аналіз літературних джерел [1–4], пов'язаних з сухою очисткою газу від твердих частинок, показав, що дослідники, які займаються розробкою нових конструкцій пиловловлюючих пристроїв, використовують нетрадиційні рішення, що включають в себе складну геометрію апаратів. Недостатність інформації по новим технічним способам і конструкціям дає право розглядати запропоновані рішення, як напрямок експериментальних і модельних досліджень з метою розуміння фізичного механізму процесів сепарації в циклонних апаратах складної конструкції та їх оптимізація. Оптимізація процесів пилоочищення повинна бути спрямована на отримання гармонійного співвідношення величин ступеня вловлювання дисперсного пилу і гідравлічних втрат газоочисного обладнання.

Існуючі інженерні методики до розрахунку пиловловлюючого обладнання базуються на напівемпіричних рівняннях подібності та інтегральних методах [5–8]. Використання обчислювальних технологій, що реалізуються в спеціалізованих обчислювальних пакетах програмного забезпечення, дозволяють розраховувати з прийнятною для практики точністю масообміні та гідродинамічні характеристики в турбулентних просторових стаціонарних та нестаціонарних вихрових потоках в областях складної геометрії.

Постановка задачі

З метою уникнення потреби у проведенні проміжних натурних випробувань на стадії розробки і проектування промислових пристроїв, була поставлена задача розробити комп’ютерну модель відцентрового фільтра для проведення розрахунків аеродинамічних процесів та ефективності вловлювання твердих часток у відцентровому фільтрі.

Комп’ютерне моделювання

Для розрахунку аеродинамічних характеристик відцентрового фільтру використовувався програмний CFD (Computational Fluid Dynamics - обчислювальна гідрогазодинаміка) комплекс SolidWorks. Комплекс програм SolidWorks призначений для твердотільного тривимірного проектування, а також для оцінки масообмінних, теплових та аеродинамічних процесів [1].

Для знаходження шуканого чисельного рішення задачі безперервна нестаціонарна математична модель фізичних процесів дискретизується як у просторі, так і за часом. Щоб виконати дискретизацію в просторі, вся розрахункова область апарату, що зайнята текучим середовищем і твердими частинками, покривається розрахункової сіткою, грані осередків якої, паралельні координатним площинам *X*, *Y* і

Z. Для аеродинамічного розрахунку багатоблокова структурована сітка будувалася шляхом розбиття об'єму апарата по осі *Ox* - 40-ма, *Oy* - 60-ти, *Oz* - 40-ма площинами. При розрахунку поведінки текучого середовища в обмеженій стінками області моделі, використовується так званий метод фіктивних областей, тобто формально розрахункова сітка будується в паралелепіпедоподібній області, яка покриває модель з текучим середовищем всередині. В результаті побудови сітки було отримано 1234568 комірок.

В якості граничних умов на вході задавалася: витрата повітря $Q_{вх}$, м^3/год, температура газового потоку *t*, °С, щільність газового потоку *ρ*, кг/м^3, динамічна в'язкість газового потоку $\mu \cdot 10^{-5}$, Па/с, а на виході - атмосферний тиск $P_{вых}$, Па. Вихідні умови для *CFD* розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні умови до розрахунків

№ розрахунку	$Q_{вх}$, м^3/год	*t*, °С	*ρ*, кг/м^3	$\mu \cdot 10^{-5}$, Па*с	$P_{ст.вих}$, МПа
1	100	20	1,2	1,82	0,1
2	150	20	1,2	1,82	0,1
3	200	20	1,2	1,82	0,1

В результаті моделювання аеродинаміки відцентрового фільтра була отримана залежність аеродинамічного опору від витрат газового потоку через апарат (рис. 1)

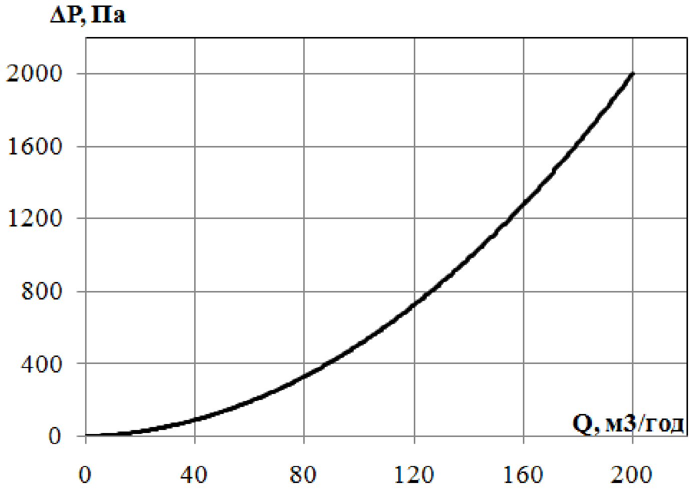
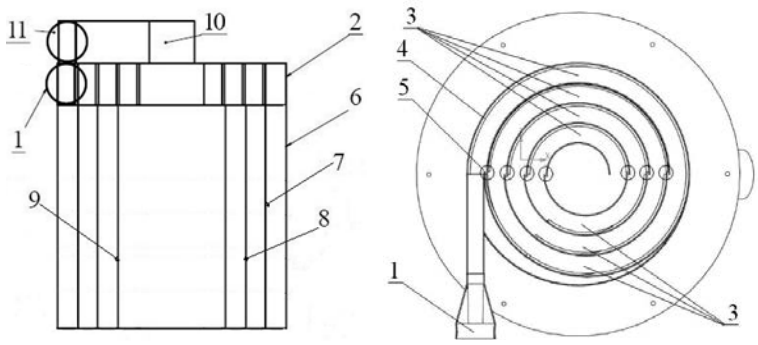


Рис. 1. Залежність аеродинамічного опору від витрат газового потоку через відцентровий фільтр

Наступним етапом дослідження відцентрового фільтру є комп'ютерне моделювання руху твердих часток в апараті для визначення їх розподілу по елементам системи та ефективності вловлювання.

При моделюванні через апарат пропускався потік повітря з витратою 100, 150 та 200 м^3/год та подачею твердих часток 300 г/хв. Дослідження проводились при стаціонарній концентрації матеріалу 100 г/м^3. Вловлювання часток відбувалося в 4 парах каналів різного радіуса кривизни. В якості моделі використовувався восьми канальний відцентровий фільтр з системою каналів з відводом часток в окремі ізольовані один від одного бункери (рис. 2).



1 – вхідний патрубок; 2 – сепараційна камера; 3 – криволінійні канали;
4 – кільцеві щілини; 5 – зазори; 6,7,8,9 – бункери; 10 – розкручувач потоку;
11 – вихідний патрубок
Рис. 2. Восьмиканальний відцентровий фільтр

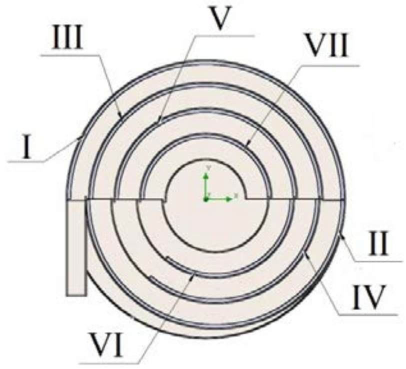
В якості матеріалів при моделюванні були використані тверді частинки коксу, каоліну, вапна, цементу, лігніну та піску. Матеріали, що використовувались при проведенні комп’ютерного моделювання, мають діапазон медіанного діаметра (d_{50}) 12…50 мкм і густини ($\rho_п$) 1800…3450 кг/м^3. В таблиці 2 наведено характеристики матеріалів.

Таблиця 2

Характеристики матеріалів, що використовувались при моделюванні.

Параметри	**Матеріал**					
	кокс	**каолін**	**вапно**	**цемент**	**лігнін**	**пісок**
Густина, кг/м^3	3450	3300	3260	3200	2300	1800
Медіанний діаметр часток, мкм	12	15	17	20	30	50

Для отримання даних по розподілу твердих часток по елементам відцентрового фільтра у розрахунковій моделі апарату побудовано 7 пробок в об’ємі сепараційної камери (рис. 3), що відповідають пиловідвідним щілинам кожного з каналів восьмиканального відцентрового фільтра.



I…VII – розрахункові пробки
Рис. 3. Схематичне зображення розміщення пробок

В результаті комп’ютерного моделювання руху твердих часток в апараті було отримано значення вкладу кожного каналу в загальну ефективність вловлювання твердих часток у відцентровому фільтрі (табл. 3).

Таблиця 3

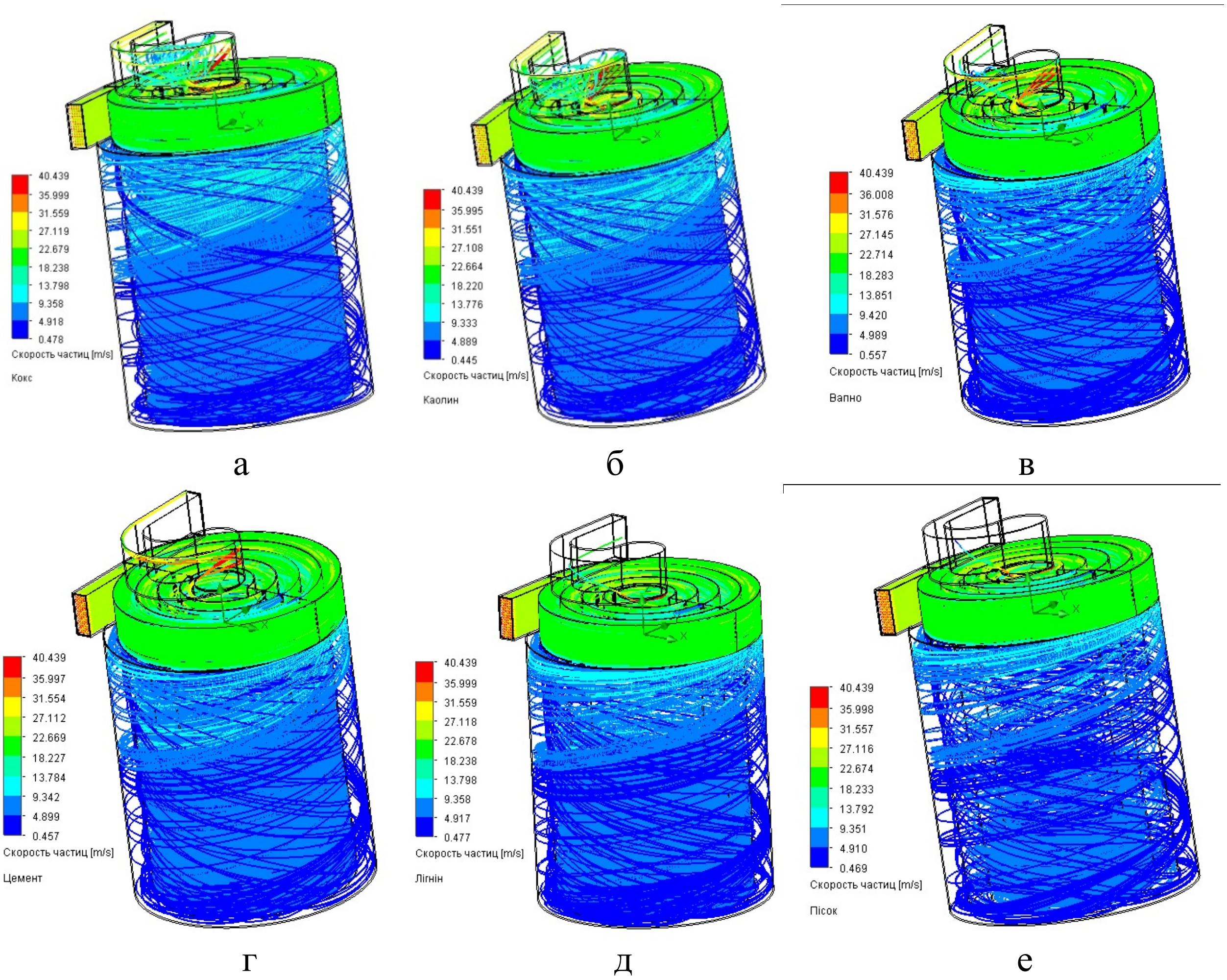
Результати комп’ютерного моделювання руху твердих часток у відцентровому фільтрі

Номер пробки, $n_{пр}$	**Витрата, м³/год**	**Матеріал, %**					
		кокс	**каолін**	**вапно**	**цемент**	**лігнін**	**пісок**
I	100	21,6	21,6	19,3	16,6	15,6	15,7
	150	25,5	22,5	20,5	18,5	16,7	14,2
	200	27,5	24,5	20,0	19,2	17,2	15,0
II	100	18,6	18,6	17,4	15,8	13,5	14,4
	150	16,6	16,7	17,6	18,0	14,0	13,8
	200	18,4	17,6	16,7	18,0	16,3	14,9
III	100	12,1	15,4	16,1	16,3	14,5	12,3
	150	13,5	17,0	17,8	14,7	12,8	14,5
	200	14,7	18,8	18,5	16,4	14,7	14,1
IV	100	13,2	11,5	14,9	14,5	15,7	13,7
	150	12,7	13,7	13,2	15,5	14,2	15,6
	200	13,0	10,2	13,0	12,7	13,0	13,5
V	100	8,7	10,7	12,7	12,1	14,4	15,2
	150	9,4	9,1	13,3	11,8	16,5	13,5
	200	7,5	7,8	11,8	15,0	13,5	14,7
VI	100	8,8	6,9	7,2	9,3	11,8	12,6
	150	6,6	5,0	7,8	8,7	12,3	14,8
	200	5,0	6,0	10,0	10,4	13,1	14,9
VII	100	1,0	2,6	4,3	7,8	10,8	13,7
	150	2,0	4,0	3,9	8,8	10,0	12,3
	200	1,2	4,9	6,0	5,9	10,7	12,5
Сумарно	100	84,0	87,3	91,9	92,4	96,3	97,6
	150	86,3	88,0	94,1	96,0	96,5	98,7
	200	87,3	89,9	96,0	97,6	98,5	99,6

З таблиці 3 видно, що при збільшенні медіанного діаметра часток від 12 до 50 мкм і густини пилу від 1800 до 3450 кг/м³, ефективність вловлювання твердих часток зростає від 84 % до 99,9 %. Висока ефективність вловлювання часток відбувається за рахунок розвиненої площі осадження в сепараційній камері та рециркуляції матеріалу між каналами відцентрового фільтра.

Як показують результати комп’ютерного моделювання твердих часток різного матеріалу у восьмиканальному відцентровому фільтрі, осідання пилу приймає різний характер. Так, частинки коксу з медіанним діаметром d_{50} = 12 мкм розподіляються в порядку зниження ефективності вловлювання від першої пробки до останньої, а частинки піску з медіанним діаметром d_{50} = 50 мкм рівномірно розподіляються по пробках всіх каналів фільтра. Отже, зі зростанням медіанного діаметру часток та зниженням густини відбувається розподіл вловлених часток в об’ємі сепараційної камери.

На рисунку 4 показано міграцію та швидкість руху твердих часток в об’ємі восьмиканального відцентрового фільтра при витраті потоку 200 м³/год.



а) кокс; б) каолін; в) вапно; г) цемент; д) лігнін; е) пісок

Рисунок 4 – Міграція та швидкість руху часток різного матеріалу в об’ємі апарату при 200 м^3/год

Як видно з рисунку 4, потік твердих часток рівномірно розподіляється по елементам апарату. Швидкість руху твердих часток вапна в сепараційній камері майже не змінюється і складає 18…25 м/с. Досягаючи бункеру, частинки різко втрачають швидкість до 5…10 м/с і осідають під дією сили тяжіння. На виході частинки розкручуються і мають швидкість 30…40 м/с. Чітко простежується різниця винесення пилу з відцентрового фільтра в атмосферу у часток коксу та піску.

Висновки

1. В результаті числового розрахунку аеродинамічного опору відцентрового фільтра було встановлено, що із збільшенням витрат газового потоку через апарат з 100 до 200 м^3/год аеродинамічний опір збільшився із 508 до 2000 Па.

2. В результаті розрахунку ефективності вловлювання твердих часток у відцентровому фільтрі було встановлено, що при збільшенні медіанного діаметра часток від 12 до 50 мкм і густини пилу від 1800 до 3450 кг/м^3, ефективність вловлювання твердих часток зростає від 84 % до 99,9 %. Також було розраховано

чисельний вклад кожного каналу у загальну ефективність роботи відцентрового фільтра.

Література

1. *Зверев Н. И., Ушаков С. Г.* Физическое и математическое моделирование процесса центробежной сепарации пыли. Инженерно-физический журнал. 1980. Т. 53, № 3. С. 20−23.
2. *Hideto Yoshida, Kunihiro Fukui, Kenji Yoshida, Eiji Shinoda.* Particle separation by Iinoya's type gas cyclone. Powder Technology. 2001. Pp. 16–23.
3. Алиев Г. М. Техника пылеулавливания и очистка промышленных газов. Москва: Металлургия, 1986.
4. *Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрябин Г. М.* Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Москва: Химия, 1982.
5. *Вальдберг, А.Ю.* Основы расчета эффективности газоочистных аппаратов инерционного типа / А.Ю. Вальдберг, С.Г. Сафонов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 9. – С. 43-44.
6. *Голованчиков, А.Б.* Вероятность улавливания частиц в циклоне и батарее циклонов / А.Б. Голованчиков, Е.В. Сафонов, О.В. Карпова // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2000. – Т. 43. – вып. 6. – С. 77-80.
7. *Шиляев, М. И.* К фракционному методу расчета инерционных пылеуловителей / М. И. Шиляев, А. М. Шиляев, И. В. Гормолысова, И. Б. Оленев // Известия вузов. Строительство. - 2006. - № 1. С. 62-67.
8. *Шиляев, М. И.* Методы расчета пылеуловителей: учебное пособие / М. И. Шиляев, А. М. Шиляев, Е. П. Грищенко; под ред. проф. М. И. Шиляева. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. — 385 с.

УДК 504:519.876.5

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ВІД ПАЛАЮЧИХ І ТЛІЮЧИХ ТЕРИКОНІВ ВУГЛЕДОБУВАННЯ

Котовенко О.А., Мірошниченко О.Ю., Марченко І.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ОТ ГОРЯЩИХ И ТЛЕЮЩИХ ТЕРРИКОНОВ УГЛЕДОБЫЧИ

Котовенко Е.А., Мирошниченко Е.Ю., Марченко И.В.

THE SIMULATION OF BURNING AND SMOULDERING WASTE HEAPS OF COAL MINING ATMOSPHERE POLLUTION PROCESS

Kotovenko O., Miroshnychenko O., Marchenko I.

Київський національний університет будівництва і архітектури,
Київ, Україна, kafopnsknuba@ukr.net