

УДК 621.928.9

Батлук В.А., Романцов Е.В., Мірус О.Л.<sup>1</sup>

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОТОКУ В ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

*Стаття посвячена проблеме обеспечения аппаратурой для очистки воздуха от пыли высокой производительности в различных отраслях промышленности для того, чтобы сократить рискованные эмиссии, регламентированные санитарно-гигиеническими нормами. Стаття описує нові тенденції в розвитку теорії розділення двохфазних систем, ґрунтовані на використанні інерційних і центробіжних сил з метою значительного збільшення ефективності уловлювання пилу.*

*The article deals with the problem of providing high performance apparatuses for cleaning air from dust in various branches of industry in order to reduce hazardous emissions to the level conforming to sanitary-hygienic norms. The article describes new trends in the development of dust catching apparatuses based on the use of centrifugal-inertial forces, permitting to improve significantly the effectiveness of dust catching.*

**Постановка проблеми.** В міру збільшення абсолютних кількостей забруднюючих речовин в атмосфері можливості розсіювання викидів для більшості районів України практично вичерпані. Здатність атмосфери до самоочищення, яке відбувається за рахунок протікання фізико-хімічних процесів між компонентами забруднювачів і компонентами самої атмосфери обмежується, особливо зі збільшенням масштабів її забруднення.

Захист атмосферного повітря є однією з найбільш актуальних проблем в сучасному технологічному суспільстві, оскільки науково-технічний прогрес і розширення виробництва пов'язане зі зростанням негативних антропогенних впливів на атмосферу. Подолання сучасних і засторога ймовірних екологічних негараздів є неможливим без застосування сучасних природоохоронних технологій. Впровадження природоохоронних технологій захисту атмосфери спрямовано на значне зменшення негативного впливу на атмосферу та навколишнє середовище в цілому з одночасним найраціональнішим використанням природних ресурсів і енергії та захистом навколишнього середовища.

Одним із головних напрямків реалізації природоохоронних технологій спрямованих на захист атмосфери є очистка газоподібних відходів перед їх викидом в атмосферу. Підприємства, установи, організації, діяльність яких пов'язана з негативним шкідливим впливом на атмосферне повітря, повинні вживати заходів щодо зменшення обсягів викидів забруднюючих речовин і зниження шкідливого впливу фізичних і біологічних факторів, здійснювати контроль за обсягом та складом забруднюючих речовин, забезпечувати безперебійну та ефективну роботу очисного обладнання.

**Метою роботи** є було створення математичної моделі руху пилоповітряної суміші у розгалужених потоках і створення на її основі високоефективного пиловловлювача певної конструкції.

**Аналіз останніх досліджень.** Однією з актуальних проблем, яка стоїть сьогодні перед промисловістю України є вдосконалення техніки і технології

охорони навколишнього середовища. Вирішення цієї проблеми пов'язане з успіхами в галузі очистки технологічного газу від механічних домішок і пилу.

Результати досліджень останніх років говорять про те, що і даний час одним з найбільш ефективних принципів відділення аерозольних частинок від газового потоку з метою підвищення якості і технологічних особливостей останнього, є використання апаратів із закрученими потоками.

Велика кількість праць по цій тематиці зумовлена використанням специфічних якостей закрученого потоку в різних технологічних процесах (розпилення, розділення, переробка сипучих матеріалів, сировини, пересипання, тепло- і масообмін). Було досліджено закручений рух в трубопроводах, у камерах і вихрових трубах, вільні струйні закручені течії, потоки навколо тіл, що обертаються, інерційну сепарацію, різні типи течій.

В той же час проведений аналіз праць вітчизняних та закордонних дослідників показує, що в даний час недостатньо розглянуті питання математичного моделювання процесів, методики розрахунку і конструювання пиловловлювачів відцентрового типу, що не дозволяє не тільки їх порівняти, але і прогнозувати енергетичні показники і ефективність роботи на різних стадіях проектування.

До даного часу багато важливих з теоретичної і практичної сторони питань аеродинаміки закручених потоків вивчені недостатньо, а вибір пиловловлюючого обладнання проводиться чисто інтуїтивно.

Фізичні особливості закручених потоків визначаються закономірностями процесів, які в них відбуваються, тому застосовувати концепцію та використовувати з цієї метою звичайних осьових течій для закручених потоків на основі принципи "випрямлення" ліній току зазвичай неможливо.

Створення математичної моделі руху частинок в криволінійному каналі в осесиметричному потоці, в тому числі стосовно відцентрово-інерційних пиловловлювачів принципово-нового типу, визначення конструктивних розмірів цих апаратів за допомогою математичної моделі апарату і підтверджених експеримен-

<sup>1</sup> Батлук В. А., Романцов Е.В., Мірус О.Л.

тальним шляхом, встановлення впливу конструктивних параметрів пиловловлювачів на ефективність роботи установки і її гідродинамічний опір, узагальнення даних, розробка рекомендацій і методик розрахунку та проектування апаратів із параметрами заздалегідь прогнозованими (ефективність, опір, габаритні розміри тощо) являється актуальною науковою і практичною задачею.

**Виклад основного матеріалу** дослідження. Проаналізувавши існуючі рівняння траєкторій руху аерозолів в криволінійних каналах, можна констатувати, що в даний час не створені диференціальні рівняння по яких можна розраховувати траєкторію руху певної частинки аерозолу в криволінійному каналі конкретної форми, задавши чіткі початкові умови.

У відповідності з явищами, що протікають в апараті, математична модель процесу повинна відображати взаємозв'язок процесу руху твердих частинок в апараті (їх траєкторій) з його ефективністю. Тобто нам необхідно отримати траєкторії руху окремих матеріальних частинок повністю від входу до виходу з апарату, по яких розрахувати ефективність роботи апарату для кожного пилу, який нам необхідно виділити. Необхідною передумовою для правильного вибору елементів для закручування вхідного потоку «гвинт» стосовно до конкретних умов регулювання є наявність даних про аеродинамічні властивості «гвинта». У практиці проектування нерідкими є випадки, коли вони підбираються за розмірами повітроводів і обладнання у місцях встановлення «гвинтів».

У запропонованій нами конструкції пиловловлювача равилюкоподібний вхідний патрубок і є прикладом безпосереднього розміщення такого «гвинта» у вхідному патрубку пиловловлювача.

Для вивчення аеродинамічних процесів, які відбуваються у розробленій конструкції пиловловлювача та для обґрунтування вибору параметрів для експериментальних досліджень, нами була побудована тривимірна твердотільна модель пиловловлювача (рис.1). У вхідному патрубку циклона розмістили апарат «гвинт» (рис.2) основне призначення якого полягає у тому, щоб закручувати вхідний повітряний потік навколо осі патрубку. Частота обертання залежить від кута  $\alpha$  (рис.2) розміщення лопаток «гвинта».

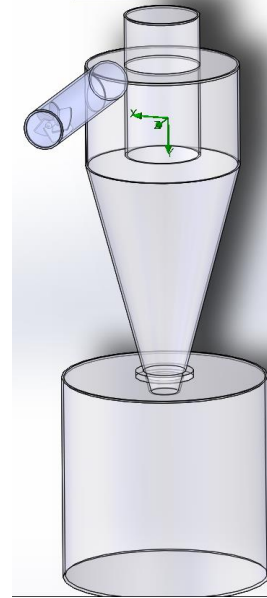
Ефективність та економічність установок для очистки повітря від пилу найчастіше визначається правильним вибором всіх елементів автоматичного регулювання. Значна частина завдань такого регулювання пов'язана зі змінами кількості повітря, яке проходить через різні розгалуження та окремі елементи систем.

Технічним засобом для регулювання є елемент для закручування вхідного потоку «гвинт» різних конструкцій.

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити ряд загальних висновків стосовно нашого дослідження:

- дані, які ми маємо з аеродинаміки, носять суто експериментальний характер;
- відсутні будь-які загальні теоретичні зв'язки, які б дозволили узагальнити накопичений експериме-

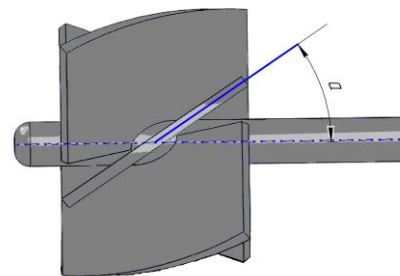
нтальний матеріал і виявити основні фактори, які визначають аеродинамічні властивості «гвинтів»;



*Рисунок 1. Твердотільна модель сепаратора*

3. наявність таких зв'язків дозволила б обійтися без експериментів у кожному конкретному випадку і стала би надійною основою різних методів підбору і розрахунку «гвинтів».

Аналіз аеродинамічних процесів в апараті проводили з використанням пакету FlowVision, а також на основі розробленої математичної моделі, яка ґрунтується на використанні рівнянь Нав'є-Стокса, що



*Рисунок 2. Елемент для закручування вхідного потоку «гвинт»*

описують у нестационарній постановці, законів збереження маси, імпульсу й енергії середовища. Крім того, використовували рівняння стану компонентів потоку, а також емпіричні залежності в'язкості й теплопровідності цих компонентів середовища від температури. Цими рівняннями моделювали турбулентні, ламінарні і перехідні (між ламінарними і турбулентними, перехід визначається критичним значенням числа Рейнольдса) потоки. Для моделювання турбулентних

потоків (вони найчастіше зустрічаються в інженерній практиці) згадані рівняння Нав'є-Стокса усереднювалися за критерієм Рейнольдса, тобто використовували усереднений в малому масштабі часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні тимчасові зміни усереднених за малим масштабом і часом складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкостей, температури) враховувалися введенням відповідних похідних за часом. У результаті рівняння мали додаткові члени — напруження за критерієм Рейнольдса.

Початковими умовами для апарата, який ми запропонували, є характеристики повітряного середовища та пилу для деякого початкового моменту часу:

- атмосферний тиск за нормальних умов,  $P_0=101325\text{Па}$ ;
- температура середовища за нормальних умов,  $T_0=293\text{ К}$ ;
- густина повітря,  $\rho_n=1,293\text{ кг/м}^3$ ;
- густина матеріалу частинок пилу,  $\rho_p=720\text{ кг/м}^3$ ;
- середній (медіанний) діаметр частинок пилу  $d_{50} = (8-50)\cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;
- максимальний діаметр частинок пилу  $d_{\max}=50\cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;
- мінімальний діаметр частинок пилу  $d_{\min}=8\cdot 10^{-6}\text{ м}$ .

Геометричні розміри циклона є такими (рис.3.1.):

- радіус циліндричної частини апарата,  $0,075\text{ м}$ ;
- висота циліндричної частини апарата,  $0,10\text{ м}$ ;
- діаметр вхідного патрубку  $0,04\text{ м}$ ;
- висота конічної частини циклона  $0,230\text{ м}$ ;
- діаметр вихлопної труби  $0,074\text{ м}$ ;
- $r_1$  та  $r_2$  - відповідно, внутрішній (дорівнює  $0,4\text{ м}$ ) та зовнішній (дорівнює  $0,3\text{ м}$ ) радіуси жалюзійного відокремлювача,

Параметри жалюзі були вибрані відповідно до [113].

Довжина корпусу для пилу з медіанним діаметром:

$8\cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;  $925\cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;  $32\cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;  $825\cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;  $50\cdot 10^{-6}\text{ м}$ ;  $725\cdot 10^{-3}\text{ м}$ . Довжина циліндричної частини корпусу апарата складає для пилу з медіанним діаметром:

$8\cdot 10^{-6}\text{ м} - 800\cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;  $32\cdot 10^{-6}\text{ м} - 700\cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;  $50\cdot 10^{-6}\text{ м} - 600\cdot 10^{-3}\text{ м}$ .

Граничні умови накладаються на розв'язок задачі про рух потоку і повинні виконуватися в кожний момент часу цього руху та визначаються характером руху повітря по площині. Граничні умови задати важче, оскільки вони залежать як від форми пиловловлювача [99-103], так і від особливостей його функціонування. Граничні умови залежать також і від густини газу: наприклад газ великої густини „прилипає” до стінок апарата в той час, як розріджений газ ковзає по граничних поверхнях. Проте незважаючи на особливості є певні закономірності при заданні граничних

умов при русі запиленого повітря в пиловловлювачі, які ми і задаємо, а саме:

- швидкість потоку повітря  $u$  у вхідному патрубку –  $20\text{ м/с}$ .
- вільний вихід повітряного потоку з вихлопної труби апарата;
- рівність нулю швидкості на нерухомій твердій границі.

Метою проведення розрахунків є визначення повного, статичного та динамічного тисків на вході та виході пиловловлювача, вивчення розподілу швидкостей потоку повітря у пиловловлювачі та дослідження його гідравлічного опору та вивчення впливу обертання вхідного потоку на аеродинаміку процесу очищення.

Гідравлічний опір циклона апарата визначали як різницю повних тисків у вхідному патрубку та вихлопній трубі циклона. Дослідження проводилися для кутів нахилу лопаток «гвинта» від  $0^\circ$  до  $40^\circ$  (рис.3.). При куті нахилу лопаток, який дорівнює  $0^\circ$  гідравлічний опір апарата складає  $398\text{ Па}$ . При зростанні значення кута  $\alpha$  підвищується значення гідравлічного опору циклона. При  $\alpha=15^\circ$  гідравлічний опір вже складає  $620\text{ Па}$ . Після значення  $\alpha=30^\circ$  розпочинається різке зростання гідравлічного опору апарата, а при  $\alpha=40^\circ$   $\Delta P$  вже складає  $2162\text{ Па}$ .

Отже при збільшенні частоти обертання потоку у вхідному патрубку навколо власної осі гідравлічний опір циклона зростає. При куті нахилу лопатки, який складає  $15^\circ$  гідравлічний опір апарата практично вдвічі вищий за опір циклона без обертання вхідного потоку. Важливим є вивчити який вплив має обертання вхідного потоку на аеродинаміку процесу циклонування та ефективність очищення запиленого потоку. Для цього проводили дослідження при куті нахилу

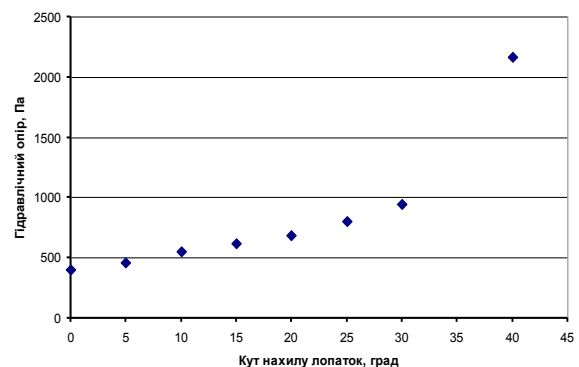


Рисунок 3. Залежність гідравлічного опору циклона від кута нахилу лопаток «гвинта»

лопатки у проміжку від  $0$  до  $35^\circ$  з кроком  $5^\circ$ . Результати досліджень представлені нижче.

Розглянемо рух повітряного потоку у пиловловлювачі при куті нахилу лопатки рівному  $5^\circ$ . Швидкість повітряного потоку на початку вхідного патрубка складала  $20\text{ м/с}$ .

На рисунку 4 представлено траєкторії руху повітряного потоку.

Потік доволі низько опускається у конічну частину апарата, що свідчить про те, що зовнішній, направлений вниз, потік зберігає інтенсивність свого обертання в конічній частині, що приводить до

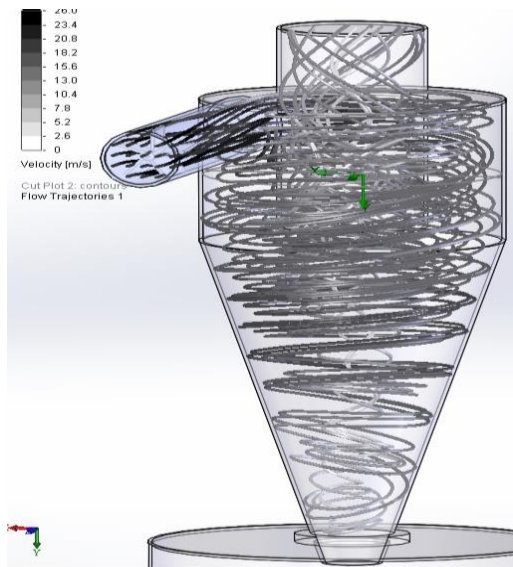


Рисунок 4. Траєкторії руху повітряного потоку

підвищення ефективності вловлення частинок пилу.

На рисунку 5 а представлено зміну значення швидкості повітряного потоку та її напрям у перерізі, який розміщений на середині циліндричної частини апарата. Характер зміни значення швидкості є рівномірним. Значення  $v$  є близьким до 13 м/с. Перепад значення швидкості не перевищує 2,5 м/с.

Розподіл значення статичного тиску у цьому ж перерізі теж є близьким до рівномірного і складає близько 160 Па (рис.5.б).

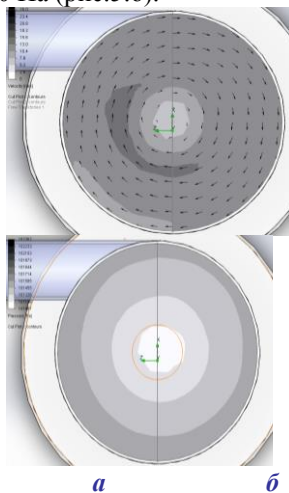


Рисунок 5. Розподіл значення швидкості потоку повітря (а) та статичного тиску (б) у перерізі на середині циліндричної частини циклона при значенні  $\alpha=5^\circ$

Розподіл значень швидкості повітряного потоку та статичного тиску у вертикальному перерізі, який проходить через вісь циклона представлено на рисунках 6. а та б.

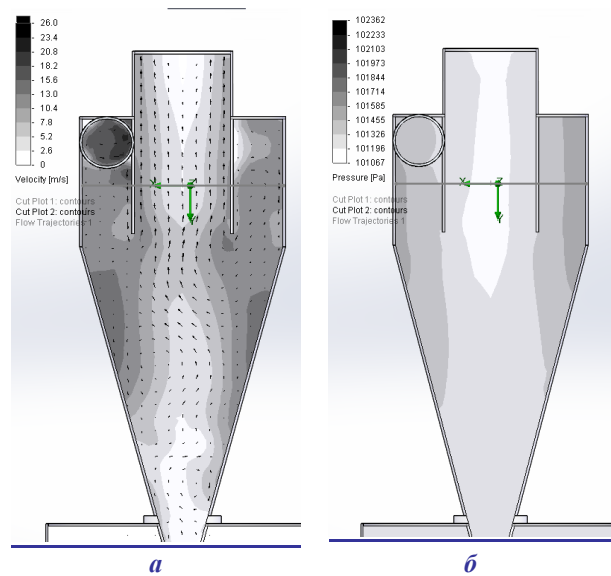
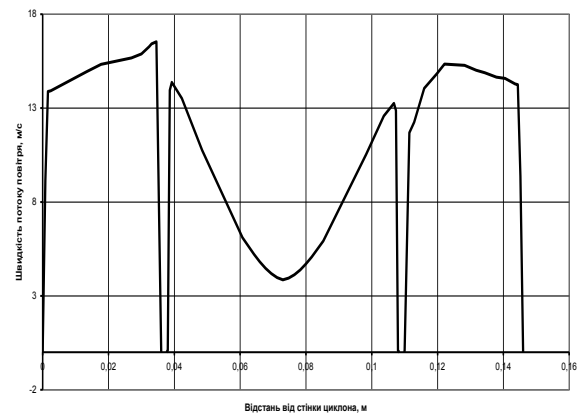
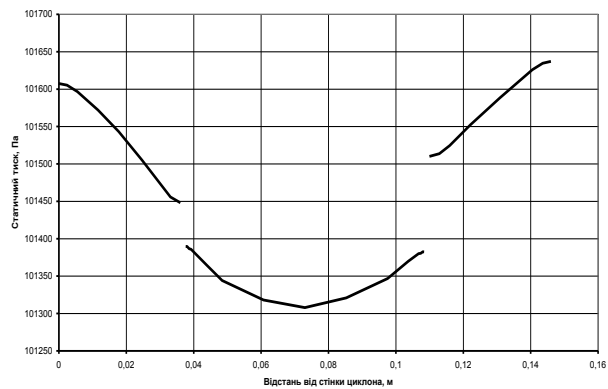


Рисунок 6. Розподіл значення швидкості потоку повітря (а) та статичного тиску (б) у вертикальному перерізі частини циклона при значенні  $\alpha=5^\circ$

На рисунках 7. представлено графіки розподілу відповідних величин у перерізі, який розміщений на середині циліндричної частини апарата. Проводили дослідження тієї ж конструкції апарата без використання закручуючого апарату «гвинт». Тобто повітряний потік у вхідному патрубку не обертався.



б



б

Рисунок 7. Графіки розподілу швидкості потоку (а) та значення статичного тиску у перерізі на середині циліндричної частини циклона при значенні  $\alpha=5^\circ$ .

Перепад значення швидкості повітряного потоку складає 6м/с, а статичного тиску – 250Па. Дослідження, які представлені на рисунках 4-7 проводилися аналогічно для значення кута  $\alpha=10^\circ$ ,  $20^\circ$  та  $35^\circ$ . Результати таких досліджень представлені нижче.

При значенні кута  $\alpha=10^\circ$  (рис.8.а) у циліндричній та конічній частині циклона спостерігається рівномірно розподілений потік повітряного потоку. Зі зростанням значення  $\alpha$  рівномірність потоку, особливо у циліндричній частині апарата, порушується. При значенні кута нахилу лопатки, який дорівнює  $35^\circ$  (рис.8.в) у циліндричній частині спостерігається хаотичне перемішування потоку, що і є основною причиною різкого зростання гідравлічного опору апарата. До аналогічних результатів можна прийти, аналізуючи характер зміни значення швидкості повітряного потоку (рис.9) та статичного тиску (рис.10) у плоскому перерізі, який розміщений посередині циліндричної частини циклона. Так на рисунках 9 а та б відображено рівномірний характер зміни значення швидкості повітряного потоку, значення якої є близьким до 14м/с. Перепад значення  $v$  не перевищує 2м/с.

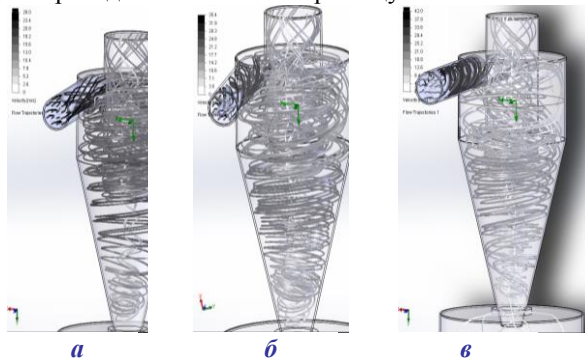


Рисунок 8. Траєкторії руху повітряного потоку для  $\alpha=10^\circ$  (а),  $20^\circ$ (б) та  $35^\circ$ (в)

При куті нахилу лопатки рівному  $35^\circ$  перепад значення швидкості повітряного потоку у сепараційній зоні складає близько 5м/с. Рівномірність розподілу порушується. На рисунку 11. представимо графіки зміни значення швидкості у тому ж перерізі апарата

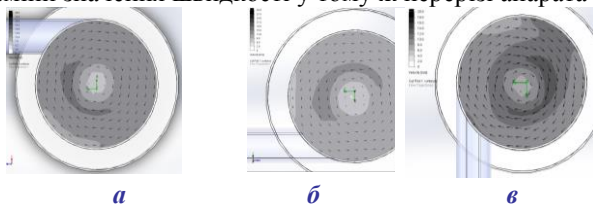


Рисунок 9. Розподіл значення швидкості потоку повітря у перерізі на середині циліндричної частини циклона при значенні  $\alpha=10^\circ$  (а),  $20^\circ$ (б) та  $35^\circ$ (в)

Характеристики «гвинта» мають також вплив на розподіл значення статичного тиску у плоскому перерізі циклона. Так при збільшенні значення  $\alpha$  від  $10^\circ$  до  $35^\circ$  значення перепаду статичного тиску дещо знижується (рис.12.а-в). При  $\alpha=10^\circ$  перепад статичного тиску складає 160Па.

Максимальне значення у сепараційній зоні дорівнює 101610Па, а мінімальне – 101310Па. При збільшенні значення кута перепад статичного тиску знижується.

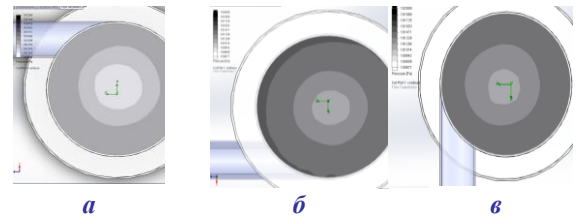


Рисунок 10. Розподіл значення статичного тиску у перерізі на середині циліндричної частини циклона при значенні  $\alpha=10^\circ$  (а),  $20^\circ$ (б) та  $35^\circ$ (в)

При  $\alpha=20^\circ$  перепад статичного тиску складає 135Па, максимальне значення у сепараційній зоні – 101590, а мінімальне, поблизу вихлопної труби – 101455Па. При  $\alpha=35^\circ$  перепад статичного тиску складає 65Па, максимальне значення у сепараційній зоні – 101535, а мінімальне – 101470Па. На осі циклона значення статичного тиску не залежить від кута нахилу лопатки і складає близько 101310 Па .

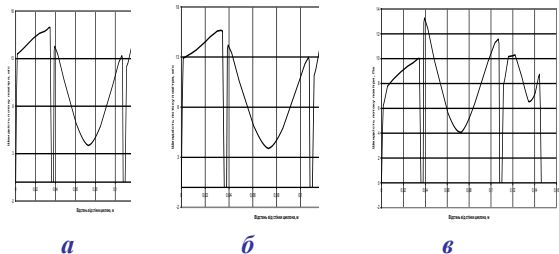


Рисунок 11. Графік зміни значення швидкості повітряного потоку у перерізі на середині циліндричної частини циклона при значенні  $\alpha=10^\circ$  (а),  $20^\circ$ (б) та  $35^\circ$ (в)

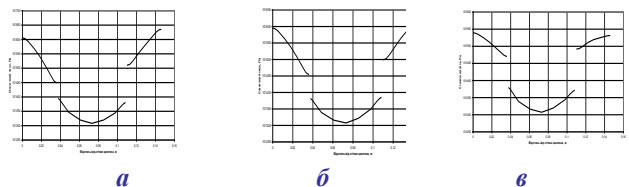


Рисунок 12. Графік зміни значення статичного тиску у перерізі на середині циліндричної частини циклона при значенні  $\alpha=10^\circ$  (а),  $20^\circ$ (б) та  $35^\circ$ (в)

Аналогічним чином може бути відображено розподіл значення швидкості повітряного потоку та статичного тиску у вертикальному перерізі, який проходить через ось циклона (рис.13 і 14).

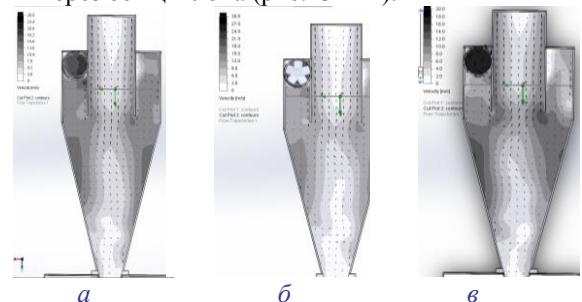
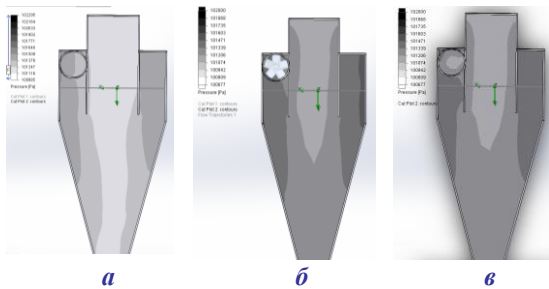


Рисунок 13. Розподіл значення швидкості потоку повітря у вертикальному перерізі циклона при значенні  $\alpha=10^\circ$  (а),  $20^\circ$ (б) та  $35^\circ$ (в)



*Рисунок 14. Розподіл значення швидкості потоку повітря у вертикальному перерізі циклона при значенні  $\alpha=10^\circ$  (а),  $20^\circ$  (б) та  $35^\circ$  (в)*

Проведений аналіз дав змогу описати вплив обертання повітряного потоку у вхідному патрубку на аеродинаміку руху повітряних потоків у апараті розробленої конструкції. Встановлено, що при зростанні частоти обертання потоку гідравлічний опір апарата

зростає спочатку повільно, а при досягненні певного значення (при  $\alpha > 30^\circ$ ) спостерігається різке підвищення гідравлічного опору, яке пояснюється інтенсивним перемішуванням повітряних потоків у циліндричній частині циклона. Характеристики «гвинта» мають також вплив на розподіл статичного тиску та значення швидкості повітряного потоку у апараті. Збільшення значення кута нахилу лопатки позитивно впливає на перепад статичного тиску в апараті, який знижується при зростанні значення кута  $\alpha$ .

Обґрунтування оптимального значення  $\alpha$  повинно запропоноване на основі представлених досліджень, доповнених результатами експериментального вивчення вливу кута нахилу лопатки «гвинта» на ефективність процесу очищення запиленого потоку у апараті розробленої конструкції.

## Висновки

На ВО «Електрон» за нашими ескізами виготовлена і змонтована дослідно-промислова установка продуктивністю 15000 м<sup>3</sup>/год для відсосу пилу з термопластавтоматів, що дозволило підвищити загальну ефективність пилоочистки до 98.6 %, змінивши при цьому гідравлічний опір і габарити, що підтверджено актами впровадження і випробування, а це відкриває широкі перспективи для впровадження запропонованої конструкції при пластичній і механічній обробці матеріалів, в промисловості виробництва будматеріалів при виготовленні бітумоперліта, керамічної плитки, цементу, асфальтобетону, сірки, глинопорошка, сурику, шихти, калімагнезії, хлорвінілу, деревної й металевої стружки, і показали високу ефективність при невеликих енерговитратах.

## Література

1. Батлук В.А., Макаруч В.Г. Сукач Р.Ю.: Всеукраїнський науково-технічний журнал //Промислова гідраліка і пневматика. Вінниця - 2010р., № 4 (30), с.39-46.
2. Batluk V.A., Batluk V.V, Paranyak N.M.: The Problem of Highly Effective Cleaning of air from dust // Modern problems of radio engineering, telecommunicataions and computer science. Proceedings of the International Conference TCSET 2006, Lviv-Slavsko, Ukraine.c.46-48.
3. Батлук В.А., Романцов Е.В.: Пиловловлювач із водяною сорочкою / Патент на корисну модель № 50556 Заявка № и200914006В01Д45/00 від 31.12.2009. Опубл 10.06.2010, Бюл.№11 2010р.
4. Батлук В.А, Шелюх Ю.Є.: The problem of highly effective air purification from dust // International symposia celebrating conference: People and Practice, Dandy. – Scotland, 2003. – 101-106р.
5. Батлук В.А., Батлук В.В., Мельников О.В.: Один из путей решения проблем устранения промышленной опасности, создаваемой мелкодисперсной пылью //Юбилейные научные чтения «Белые ночи-2008» /Материалы Международных научных чтений Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, Часть 2.-Изд-во МАНЭБ, СПб, 2008-491с., с.327-332.
6. 21. 17.Batluk V.A., Batluk V.V, Paranyak N.M.: The Problem of Highly Effective Cleaning of air from dust // Modern problems of radio engineering, telecommunicataions and computer science. Proceedings of the International Conference TCSET 2006, Lviv-Slavsko, Ukraine.c.46-48.
7. 7.Батлук В.А., Батлук В.В., Макаруч В.Г.: A mathematical model of vacuum cleaners, talking into account the motion of particles near the wall part of the lust collector; // Motrol motoryzacja I energetic rolnictwa motorization and power industry in Agriculture 12/ 2010, Lublin, pag. 97 – 105.
8. Батлук В.А., Романцов Е.В. Апарат для відділення рідини від газів Патент на винахід № 88205 В01Д45/00 №и200714589 від24.12.2007.Опубл.25.09.2009.Бюл.№ 18,2009