

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА
ОСТРОГРАДСЬКОГО
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАРАМУШКО АНЖЕЛІКА ВОЛОДИМИРІВНА

Прим. № 1

УДК: 621.928.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА
УСТАТКУВАННЯ СУХОГО ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД
ПОЛІДИСПЕРСНОГО ПИЛУ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Галузь знань – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



А. В. Карамушко

Науковий керівник **Арсірій Василь Анатолійович**,
доктор технічних наук, професор

Кременчук – 2019

АНОТАЦІЯ

Карамушко А. В. Удосконалення технологічного процесу та устаткування сухого очищення повітря від полідисперсного пилу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2019.

Захист дисертації відбудеться на засіданні спеціалізованої вченої ради К 45.052.05 Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського Міністерства освіти і науки України, Кременчук, 2019.

У дисертаційній роботі подано результати досліджень з розробки комбінованого пиловловлюючого апарату (КПА) від полідисперсного пилу, в якому поєднано кілька принципів пиловловлювання. Шляхом унесення змін до класичної схеми промислового димососа-пиловловлювача запропоновано конструкцію пиловловлюючого апарату з використанням відцентрового нагнітаючого обладнання для концентрації, коагуляції пилу, що дозволяє інтенсифікувати процес очищення повітря за рахунок зміни початкового дисперсного складу пилу, а також циркулюючою схемою руху пилогазового потоку для виключення надходження забруднюючих речовин в атмосферне повітря.

Доведено підвищення ефективності обезпилення циркулюючого потоку з урахуванням скорочення кількості структурних елементів системи аспірації. Отримані шляхом комп'ютерного моделювання поля швидкостей криволінійної течії довели можливість підвищення кількісних показників видалення пилу за рахунок зміни постійного перерізу повороту з $\varphi = \pi$ на конфузотно-дифузортний переріз. Визначено ефективність розподілу аерозолу в пиловловлюючій системі за різних варіантів компонування її елементів. Підтверджено ефективність заміни прямоточних систем аспірації циркулюючими. Отримано залежність для визначення корисного об'єму бункеру КПА від технологічних і

фізико-механічних параметрів пилогазового потоку. Запропоновано методику розрахунку експлуатаційних характеристик КПА з використанням диференціальної кривої розподілення маси пилу та парціальних коефіцієнтів осадження частинок певних розмірів. Результати дисертаційної роботи можуть бути застосовані для проектування КПА, використання яких у циркулюючих пиловловлюючих системах дозволить знизити рівень екологічної небезпеки, сформованої забрудненням атмосферного повітря.

Ключові слова: екологічна безпека, знепилення, пилогазовий потік, циркулююча система, комбінований пиловловлюючий апарат, полідисперсний пил, коефіцієнт уловлювання, пилозбірний контейнер.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Карамушко А.В., Буров А.А., Гамолич В.Я. Обеспыливание изолированного пространства. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2006. Вип.1 (25). С. 36–40.

2. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. Воздушное течение в криволинейном канале. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2009. Вип. 2 (32). С. 174–177.

3. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. Тепломассоперенос в криволинейном потоке вязкого газа. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. Киев: НПВК «Триакон», 2009. Вып. 1. С. 91–93.

4. Карамушко А.В., Гамолич В.Я., Буров А.А. Сравнительный анализ открытой и замкнутой обеспыливающих систем. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2011. Вип. 1(35). С. 185–189.

5. Карамушко А.В., Буров А.А., Вишнякова Н.В. Обеспыливание транзитных и циркулирующих воздушных потоков. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2011. Вип. 40. Том. 2. С. 367–371.

6. Карамушко А.В., Буров А.А., Максимовская Е.С. Криволинейные каналы в системе с замкнутыми контурами. *Современная наука: исследования,*

идеи, результаты, технологии. Киев: НПВК «Триако», 2011. Вып. 3(8). С. 30–33.

7. Карамушко А.В., Гамоліч В.Я., Буров А.А. Сравнительная оценка результатов промышленных испытаний циклонов «СИОТ» и многоканальных пылеуловителей «БУРАН». *Праці Одеського політехнічного університету*. Одесса, 2012. Вып. 1 (38). С. 271–275.

8. Карамушко А.В., Буров О.О., Буров О.І. Вільний рух частки у криволінійному каналі. *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*. Одеса, 2012. Вип. 63. С. 140–143.

9. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. [и др.]. Сепарация и фильтрация газовых выбросов в атмосферу. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. Днепропетровск: НПВК «Триако», 2013. Вып. 2(13). С. 12–17.

10. Карамушко А.В. Моделювання бункеру динамічного пиловловлюючого апарату. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Science*. VI(17). Issue: 157. 2018. P. 52–55.

11. Карамушко А.В. Очистка газового потока от полидисперсной пыли в аппарате динамического действия. *The international journal Sustainable development*. Year VIII. Volume 1/2018. P. 68–73.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

12. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. Предотвращение потерь готового продукта и загрязнения окружающей среды. *Екологія міст та рекреаційних зон: тези докл. всеукр. наук.-практ. конф.*, (Одеса, 3–4 червня 2010 р.). Одеса: Інноваційно-інформаційний центр «ІНВАЦ», 2010. С. 154–157.

13. Карамушко А.В. Повышение эффективности аспирации технологического оборудования. *Промислова гідравліка і пневматика: матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП*, (Одеса, 18–19 вересня 2013 р.). Вінниця: «ГЛОБУС-ПРЕС», 2013. С. 67.

14. Карамушко А.В. Ресурсосбережение и повышение экологической безопасности топливного хозяйства ТЭС. *Проблемы теплоэнергетики: сб. науч.*

тр. по материалам XII межд. науч.-технич. конф., г. Саратов (РФ), (Саратов, 29–31 жовтня 2014 р.). 2014. Вып. 3. С. 302–306.

15. Карамушко А.В., Буров О.О. Підвищення екологічної безпеки паливного господарства ТЕС за рахунок використання закритої системи аспірації. *Актуальні проблеми енергетики та екології*: матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції, (Одеса, 5–7 жовтня 2016 р.). Одеса, 2016. С. 176–177.

16. Арсирій В.А., Карамушко А.В., Кравченко В.О. Улучшение экологических показателей энергетических систем с использованием визуализации потоков. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики*: сборник трудов XXVIII международной конференции, (Одеса, 11–13 червня 2018 р.). К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2018. С. 151–155.

17. Бутенко О.Г., Васютинська К.А., Карамушко А.В., Ширшова В.О. Уловлювання тонкодисперсного пилу завдяки коагулюючому ефекту у пиловловлювачі комбінованої дії. *Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології*: матеріали II міжнародної науково-технічної конференції, (Одеса, 12–13 грудня 2018 р.). Одеса, 2018. С. 5–6.

18. Карамушко А.В., Подуфала Т.С. Розрахунок експлуатаційних показників комбінованого пиловловлюючого апарата. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції, (Чернігів, 14–16 травня 2019 р.): Чернігів: ЧНТУ, 2019. Т. 2. С. 159–160.

ABSTRACT

Karamushko A. V. Improvement of technological process and equipment for dry cleaning of air from polydisperse dust. – Qualifying research work manuscript copyright.

Thesis for obtaining the degree of candidate of technical sciences in specialty 21.06.01 – Ecological Safety. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2019. Specialized Academic Council K 45.052.05.

The defense of the thesis will be held at the meeting of the Specialized Academic Council K 45.052.05. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kremenchuk, 2019.

The dissertation presents the results of research on the development of a combined dust collecting apparatus (DCA) from polydisperse dust, which combines several principles of dust collection. The design of the DCA was obtained by changing the classical scheme of the smoke exhauster-dust collector: the cyclone was excluded from the circuit, and the fan was connected with a dust-collecting container (hopper) via a circulation channel. In the proposed scheme, a dusty stream circulating in a closed circuit does not pass into the fan impeller, at the same time the wear of its blades is slowed down. The use of centrifugal pumping equipment for concentration, coagulation of dust allows to intensify the process of air purification by changing the initial dispersed composition of the dust, and the circulating scheme of the dust-gas stream eliminates from input of pollutants into the air. The dust clearing efficiency improvement of circulating flow with taking into account the reduction of the number of structural elements of the aspiration system is proved. The main structural elements in the dust collecting apparatus are different curvatures rotations by the angle $\varphi = \pi$ around the horizontal axis where significant inertia forces operate. Velocity fields of curvilinear flow, obtained by computer simulation, proved the ability of increasing quantitative indicators of dust removal by changing the permanent cross-section turning from $\varphi = \pi$ to the confuser-diffuser cross section. For reliable operation of centrifugal pump equipment under high concentrations of dust in

the gas stream, DCA is combined with the unloader – the vortex chamber that is connected with dust collector container by circulating contour. So we have a dust collection system with two bins. For circulating and a direct-flowing system with two bins using theory of Markov processes, probabilistic models are constructed. Efficiency of replacement of direct-flow systems by circulating aspiration systems was confirmed. A removal of solid particles from the dust stream takes place in two stages. In the first stage, dust particles are carried out in deposition zone (dust container) due to the centrifugal force and separation efficiency is determined by the impeller parameters. In the second stage deposition of dust particles by gravity is occurred, where separation efficiency is determined by the optimally selected construction dimensions of the hopper. To investigate the impact on dust collection efficiency of inertial and gravitational cumulative action deposition mechanisms the gravity cameras method of calculation was used. The aerosol distribution efficiency in the dust-collecting system with different variants of its elements layout is determined. By summarizing the results of the dust experiment, using the Pi-theorem, dependence for determination of the useful volume of the DCA bunker from technological and physical-mechanical parameters of the dust-gas stream is obtained. The calculation method of operational DCA characteristics by using differential distribution curve for dust mass and partial deposition coefficients of certain sizes is proposed. The dissertation results can be applied to DCA design, their use in circulating dust collectors systems will allow to reduce the level of environmental hazard, formed by air pollution.

Key words: ecological safety, dusting, dust-gas stream, circulating scheme, combined dust collecting apparatus, polydisperse dust, deposition coefficients, dust-collecting container.

List of publications:

Scientific works, in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Karamyshko A.V., Burov A.A., Gamolich V.Ja. Disdusting of the isolated

- space. *Odes'kyi politechnichniy universytet. Pratsi.* Odesa, 2006. Iss. 1(25). P. 36–40.
2. Karamushko A.V., Burov A.A., Burov A.I. Air flow in the curvilinear channel. *Odes'kyi politechnichniy universytet. Pratsi.* Odesa, 2009. Iss. 2(32). P. 174–177.
3. Karamushko A.V., Burov A.A., Burov A.I. Heat and mass transfer in a curvilinear flow of viscous gas. *Modern science: researches, ideas, results, technologies.* Kiev: NPVK «Triakon», 2009. Iss. 1. P. 91–93.
4. Karamushko A.V., Gamolich V.Ya., Burov A.A. The comparative analysis of open and closed deduster systems. *Odes'kyi politechnichniy universytet. Pratsi.* Odesa, 2011. Iss. 1(35). P. 185–189.
5. Karamushko A.V., Burov A.A., Vishnyakova N.V. Dust removal of transit and circulating air currents. *Scientific Works ONAFT.* Odesa, 2011. Iss. 40. Vol. 2. P. 367–371.
6. Karamushko A.V., Burov A.A., Maksimovskaya E.S. Curvilinear channels in system with closed circuits. *Modern science: researches, ideas, results, technologies.* Kiev: NPVK «Triakon», 2011. Iss. 3(8). P. 30–33.
7. Karamushko A.V., Gamolsch V.Ya., Burov A.A., Comparative evaluation of industrial test results of cyclones «SIOT» and multi-channel dust extractors «Buran». *Odes'kyi politechnichniy universytet. Pratsi.* Odesa, 2012. Iss. 1 (38). P. 271–275.
8. Karamushko A.V., Burov A.A., Burov, A.I. Free motion of particles in a curvilinear channel. *Agrarian Bulletin of the Ukrainian Black Sea region. Technical Science.* Odesa, 2012. Iss. 63. P. 140–143.
9. Karamushko A.V., Burov A.A., Burov A.I. [and etc.]. Separation and filtration of gas emissions into the atmosphere. *Modern science: researches, ideas, results, technologies.* Dnepropetrovsk: NPVK «Triakon», 2013. Iss. 3(8). P. 12–17.
10. Modeling a hopper for a dynamic dust collecting apparatus. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Science.* VI(17). Iss. 157. 2018. P. 52–55.

11. Karamushko A.V. Cleaning of gas flow from polydisperse dust in device of dynamic action. *The international journal Sustainable development*. Year VIII. Volume 1/2018. P. 68–73.

Scientific works, testifying the approbation of the dissertation materials:

12. Karamushko A.V., Burov A.A., Burov A.I. Prevention of loss of finished product and environmental pollution. *Ecology of cities and recreation zones: All-Ukrainian scientific and practical conference* (Odessa, June 3–4, 2010). Odessa: Innovatsion-information center «INVAC», 2010. P. 154–157.

13. Karamushko A.V. Improving the efficiency of aspiration of technological equipment. *Industrial hydraulics and pneumatics: XIV international scientific-technical conference* (Odessa, September 18–19, 2013). Vinnitsa: «GLOBUS-PRESS», 2013. P. 67.

14. Karamushko A.V. Resource conservation and improving the ecological safety of the fuel economy of thermal power plants. *Problems of thermal power: XII international scientific and technical conference*, Saratov (Russian Federation), (Saratov, October 29–31, 2014). 2014. Iss. 3, P. 302–306.

15. Karamushko A.V., Burov O.O. Improvement of ecological safety of TPP fuel economy due to the use of closed aspiration system. *Topical issues of energy and ecology: II All-Ukrainian scientific and technical conference*, (Odessa, October 5–7, 2016). Odessa, 2016. P. 176–177.

16. Arsiri V.A., Karamushko A.V., Kravchenko V.O. Improving the environmental performance of energy systems using flow visualization. *Problems of ecology and operation of energy facilities: XXVIII International conference* (Odessa, June 11–13, 2018). K.: CPI ALKON NAS of Ukraine, 2018. P. 151–155.

17. Butenko O.G., Vasyutinska K.A., Karamushko A.V., Shirshova V.A. Fine dust trapping due to the coagulating effect in the combined action dust collector. *Topical issues of energy saving and ecology: II International scientific and technical conference* (Odessa, December 12–13, 2018). Odessa, 2018. P. 5–6.

18. Karamushko A.V., Podufala T.S. Calculation of performance of the combined dust collecting apparatus. *Comprehensive quality assurance of*

technological processes and systems: IX International scientific and practical conference, (Chernihiv, May 14–16, 2019): Chernihiv: ChNTU, 2019. Vol. 2. P. 159–160.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ СУХОГО ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ ВІД ПИЛУ.....	21
1.1 Аналіз забруднення атмосферного повітря України промисловим пилом.....	21
1.2 Вплив промислового пилу на навколишнє середовище і організм людини.....	25
1.3 Системи очищення газових потоків від промислового пилу та їх ефективність.....	26
1.4 Особливості роботи динамічних пиловловлювачів.....	33
1.5. Методи вдосконалення устаткування сухого очищення повітря від пилу.....	39
1.6 Системи доочищення газів від промислового пилу.....	41
1.7 Висновки до розділу 1.....	47
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВЛОВЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ.....	49
2.1 Закручування потоку, концентрація та виведення частинок пилу з сепараційної зони.....	49
2.1.1 Обґрунтування конструкції пиловловлюючого апарату.....	49
2.1.2 Імовірнісна модель пиловловлюючої системи з трьома структурними елементами.....	52
2.1.3 Моделювання течії повітря у криволінійному каналі з кутом повороту 180°.....	57
2.2 Формування шару пилу в пилосбірному контейнері та видалення пилу з нього.....	62

2.3 Порівняння ефективності роботи циркулюючої та прямої системи пиловловлювання.....	67
2.4 Висновки до розділу 2.....	75
РОЗДІЛ 3. ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВЛОВЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ.....	76
3.1 Експериментальний стенд.....	76
3.2 Аеродинамічний експеримент.....	78
3.2.1 Послідовність проведення аеродинамічних вимірювань.....	78
3.2.2 Оцінка похибок результатів вимірювань.....	81
3.2.3 Перевірка відтворюваності вимірювань.....	87
3.2.4 Результати аеродинамічного експерименту.....	89
3.3 Експеримент на запиленому повітрі.....	93
3.3.1 Методика визначення основних фізико-хімічних властивостей пилу.....	93
3.3.2 Визначення коефіцієнту уловлювання пилу.....	94
3.4 Дослідження впливу відцентрового нагнітача на коагуляцію пилових частинок.....	97
3.5 Висновки до розділу 3.....	102
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ПИЛОВЛОВЛЮЮЧОГО АПАРАТУ.....	103
4.1 Визначення мінімального розміру пилозбірного контейнеру.....	103
4.2 Визначення геометричних параметрів пірамідально-призматичного бункера пиловловлюючого апарату.....	108
4.3 Методика розрахунку експлуатаційних характеристик комбінованого пиловловлюючого апарату.....	110
4.4 Проектування комбінованого пиловловлюючого апарату для доочищення пилових викидів системи аспірації.....	112
4.5 Висновки до розділу 4.....	124
ВИСНОВКИ.....	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128

ДОДАТОК А..... 141
ДОДАТОК Б..... 142
ДОДАТОК В..... 143

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження (актуальність). Одним із аспектів формування екологічної небезпеки є нераціональне використання мінерально-сировинних ресурсів і недостатня ефективність заходів з попередження та зменшення наслідків техногенного навантаження на довкілля. В Україні практично дві третини населення мешкає на територіях, де якість атмосферного повітря не відповідає діючим гігієнічним нормативам. Серед основних домішок, які зумовлюють високий рівень забруднення атмосферного повітря у містах, – завислі речовини, які викидаються переважно підприємствами переробної, добувної промисловості та енергетичної галузі. До основних причин формування даного виду екологічної небезпеки можна віднести порушення режиму експлуатації пилогазоочисного обладнання, його недостатню ефективність чи взагалі відсутність. Найбільш розповсюдженим способом очищення промислових викидів від зважених частинок є застосування сухих інерційних пиловловлювачів (СП). Ці пристрої дозволяють скоротити виробничі площі, зберегти водні ресурси й отримати економічний ефект за рахунок утилізації вловленого продукту. Проте ефективність уловлювання пилу дрібних фракцій в СП не є достатньою. Відомі спроби підвищення ефективності пиловловлювання шляхом спеціалізації апаратів, конструктивно-технологічного удосконалення, попередньої обробки аерозолів, багатоступеневої очистки призводять до ускладнення схем пиловловлювання та значного зростання їх вартості. За таких умов перспективним є створення пиловловлювачів, у яких дія декількох механізмів осадження поєднана в одному пристрої із застосуванням циркулюючої схеми, що дозволить підвищити рівень екологічної безпеки за рахунок упередження потрапляння пилоподібних речовин в атмосферне повітря.

Директива 2008/50/ЄС «Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи» передбачає встановлення граничної величини і зменшення впливу дрібнодисперсного пилу (PM_{10} і $PM_{2,5}$). Із підписанням Угоди про

асоціацію з Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії Україна взяла на себе зобов'язання вживати заходів для поступового наближення національних нормативів екологічної безпеки до вимог Європейського Союзу. Окрім того, Україною розроблено Концепцію реалізації державної політики у сфері промислового забруднення, що є передумовою імплементації Директиви 2010/75/ЄС. Ключовими позиціями вищезазначених документів є необхідність суттєвого скорочення обсягів промислових викидів, у тому числі шляхом запобігання їх утворенню. Отже, удосконалення технологічного процесу та устаткування сухого очищення повітря від полідисперсного пилу за рахунок застосування циркулюючих схем, які суттєво знижують обсяги викидів пилоподібних речовин в атмосферне повітря, є актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до п. 5 розділу «Рациональне природокористування» Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 07 вересня 2011 року. Робота виконувалася за аспірантським планом у рамках науково-дослідних робіт ОНПУ в яких авторка брала участь як виконавець: № 636-134 «Високотемпературне очищення газів від золи та пилу» (№ ДР 0108U001193), № 566-46 «Зниження техногенного навантаження на навколишнє природне середовище», № 654-134 «Гідродинаміка і тепло-масоперенос в циркулюючих потоках гомогенного і гетерогенного середовища» (№ ДР 0109U008457), № 83-46 «Підвищення ефективності використання природних ресурсів» (№ ДР 0113U007796).

Об'єктом дослідження є процеси очищення пилогазових викидів від полідисперсного пилу в прямоточних і циркулюючих аспіраційних системах.

Предметом дослідження є конструктивні та експлуатаційні параметри пиловловлюючого апарату з комбінованим використанням відцентрового та інерційного осадження.

Метою роботи є підвищення рівня екологічної безпеки за рахунок удосконалення технологічного процесу та устаткування сухого очищення повітря від полідисперсного пилу.

Для досягнення мети роботи поставлені такі *завдання*:

- проаналізувати досвід використання прямоточних і циркулюючих систем аспірації та визначити шляхи підвищення ефективності їх роботи;
- обґрунтувати доцільність комбінування в одному пиловловлюючому пристрої механізмів відцентрового та інерційного осадження;
- провести математичне моделювання течії повітря у криволінійному каналі з кутом повороту 180° та оцінити можливість його використання, як елемента для концентрації пилової маси у комбінованому пиловловлюючому апараті (КПА).
- довести переваги використання циркулюючої пиловловлюючої системи порівняно з прямоочною;
- провести експериментальні дослідження КПА, проаналізувати та узагальнити їх результати, з'ясувати можливості використання відцентрових нагнітачів повітря для коагуляції дрібнодисперсного пилу;
- розробити рекомендації з розрахунку основних конструктивних параметрів та експлуатаційних характеристик запропонованої конструкції КПА.

Методи дослідження. Теоретичну основу дисертаційного дослідження складають методи фізичного та математичного моделювання на основі положень теорії механіки рідини і газу. Розподіл аерозолу в структурних елементах КПА оцінювався за допомогою математичного апарату теорії випадкових Марковських процесів. Поля швидкостей і температур визначалися з використанням ліцензованого програмного забезпечення Solid Works із розрахунковим додатком COSMOS Flow Works. Фізичний експеримент проводився за рекомендованими методиками на дослідному стенді з вимірювальними приладами. Розрахунок конструктивних розмірів пило

збірному контейнеру проводився з використанням методики розрахунку гравітаційної камери з урахуванням закономірностей руху сипкого матеріалу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

- *вперше* науково обґрунтовано доцільність використання в системах аспірації промислових викидів пиловловлюючих апаратів з комбінуванням принципів відцентрового та інерційного осадження, що дозволяє інтенсифікувати процес очищення повітря за рахунок зміни дисперсного складу пилу шляхом коагуляції його часток;

- *вперше* за результатами математичного моделювання процесів розподілу пилу в комбінованому пиловловлюючому апараті встановлено еколого-технологічні переваги використання циркулюючої пиловловлюючої системи порівняно з прямою, що дозволить мінімізувати втрати вловленого пиломатеріалу, як вторинного матеріального ресурсу, та знизити обсяги викидів пилоподібних речовин в атмосферне повітря;

- *удосконалено* методику розрахунку корисного об'єму пилосбірного контейнеру (бункеру) пиловловлюючого апарату з урахуванням технологічних параметрів пилогазового потоку та фізико-механічних характеристик пилу (медіанного розміру, густини, середньої швидкості вітання частинки пилу), що дозволяє забезпечити ефективне осадження полідисперсного пилу та попередити його вторинне винесення з бункеру комбінованого пиловловлюючого апарату;

- *набули подальшого розвитку* наукові уявлення щодо використання криволінійного каналу з циркулюючим контуром і кутом повороту 180° , як елемента для концентрації та розділення пилу, а саме – за результатами математичного моделювання доведено зміну постійного перерізу каналу на конфузотно-дифузотний, що надає можливість підвищити його сепараційну здатність.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Практичне застосування розробленого пиловловлюючого апарату з комбінованим використанням відцентрової сепарації та гравітаційного

осадження дозволить підвищити рівень екологічної безпеки за рахунок скорочення обсягів викидів дрібнодисперсного пилу.

2. Реалізація запропонованого технічного рішення щодо поєднання пиловловлюючого апарату з розвантажувачем (вихровою камерою, яка сполучена циркулюючим контуром з пилозбірним контейнером) дозволить створити пиловловлюючу систему з двома бункерами, що забезпечить надійну роботу пристрою при високих концентраціях пилу у газовому потоці.

3. Використання розроблених методичних положень з розрахунку основних конструктивних параметрів та експлуатаційних характеристик запропонованого КПА у частині визначення оптимальних конструктивних розмірів пилозбірного контейнеру (бункеру) дозволить забезпечити високий рівень сепарації пилоподібних речовин з урахуванням технологічних і фізико-механічних параметрів пилогазового потоку.

Результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі на кафедрі прикладної екології та гідрогазодинаміки ОНПУ під час вивчення студентами спеціальності 101 – «Екологія» навчальних дисциплін «Техноекологія» та «Охорона повітря», а також – виконання курсового та дипломного проектування (довідка про впровадження №1906/46-08 від 29.08.2019 р.).

Результати роботи у частині застосування розробленої методики розрахунку показників КПА, як елементу доочищення пилових викидів системи аспірації приміщення подрібнення будівельних матеріалів використані ТОВ «Енергосервіс», м. Одеса (довідка про впровадження від 11.04.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертантці належить формулювання мети й основних завдань досліджень, обґрунтування положень наукової новизни, встановлення практичної значимості результатів аналізу стану теорії та практики очищення газових потоків від полідисперсного пилу у прямоточних та циркулюючих системах, проведення математичного та фізичного моделювання розроблених пиловловлюючих систем, формування загальних висновків.

Внесок авторки у наукові статті, які виконані у співавторстві, полягав у такому: [1] – складено граф стану замкненої пиловловлюючої системи та системи рівнянь, які описують взаємодію між трьома її структурними елементами; [2] – проведено математичне моделювання течії повітря в криволінійному каналі з кутом повороту $\varphi = \pi$ та втраті напору повітряного потоку $\Delta P = 300 \text{ Па}$; [3] – у розрахунковому додатку COSMOS Flow Works програми Solid Works отримані поля швидкостей і температур повітря, а також їх радіальне і кутове розподілення у вертикальній площині симетрії криволінійного каналу з прямокутним перерізом і кутом повороту $\varphi = \pi$; [4] – складено та розв’язано систему рівнянь для циркулюючої системи, проведено порівняння ефективності роботи циркулюючої та прямої системи; [5] – складені залежності ймовірнісної концентрації пилу у трубопроводі від коефіцієнту уловлювання для циркулюючої системи пиловловлювання при розміщенні димососу перед пиловловлювачем; [6] – на підставі результатів дослідження криволінійних каналів з різним радіусом повороту проведено порівняльний аналіз впливу замкнених циркулюючих потоків на гідравлічний опір без врахування прямолінійних ділянок; [7] – проведено апроксимацію результатів промислової експлуатації циклонів і бурнів в залежності від технологічних і фізико-механічних параметрів, які впливають на ефективність інерційної сепарації, отримано залежність оцінки ефективності пиловловлювача; [8] – на підставі математичного моделювання повітряної течії в криволінійному каналі зроблено висновок про зміну характеру його обертання від потенційного на вході до вихрового на виході з каналу; [9] – розраховано рух монодисперсних частинок пилу в горизонтальному фільтрі зі зворотними зв’язками.

Список праць дисертанта наведено у *додатку В* роботи. Вищезазначена нумерація робіт у співавторстві відповідає списку, поданому в додатку.

Апробація результатів роботи. Основні наукові та практичні результати дисертаційних досліджень доповідались та отримали позитивну оцінку на наукових семінарах кафедри прикладної екології та гідрогазодинаміки і

науково-дослідної лабораторії «Чисте повітря» ОНПУ, і таких конференціях: 44–46 Науково-технічних конференціях студентів та молодих дослідників ОНПУ (м. Одеса, 2009–2011 р. р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Екологія міст і рекреаційних зон» (м. Одеса, 3–4 червня 2010 р.), VII Міжнародній науково-практичній конференції «Харчові технології – 2011» (м. Одеса, 29–30 вересня 2011 року), XIV Міжнародній науково-технічній конференції АС ППП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Одеса, 18–19 вересня 2013 року), IX Міжнародній науково-практичній конференції «Енергетика, економіка, екологія: ефективні шляхи комплексного розвитку» (м. Алушта, 19–23 вересня 2013 року), XII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні науково-технічні проблеми теплоенергетики. Шляхи вирішення» (м. Саратов, РФ, 29–31 жовтня 2014 року); XVI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (м. Одеса, 5–7 жовтня 2016 року), XXVIII Міжнародній конференції «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики» (Одеса, 11–13 червня 2018 р.), II Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології» (м. Одеса, 12–13 грудня 2018 року), IX Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 14–16 травня 2019 року).

Публікації. Результати дисертаційних досліджень опубліковано в 18 наукових роботах, з яких – 11 статей (6 – у фахових наукових виданнях України з технічних наук, 2 – у закордонних наукових періодичних виданнях, 3 – у збірниках наукових праць), 7 тез доповідей на конференціях різного рівня.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст із 24 таблицями та 46 рисунками викладено на 108 сторінках, список використаних джерел з 119 найменування розміщено на 13 сторінках, 3 додатка – на 5 сторінках. Загальний обсяг роботи складає 139 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ СУХОГО ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ ВІД ПИЛУ

1.1 Аналіз забруднення атмосферного повітря України промисловим пилом

У будь-якій виробничій діяльності досить поширеними є процеси подрібнення матеріалів, які в багатьох випадках полегшують технологічні процеси. Найбільше розповсюдження такі процеси отримали у гірничій, хімічній, будівельній, харчовій промисловості при переробці корисних копалин, виробництві добрив, цементу, гіпсу, вапняку, муки, крохмалю, дитячого харчування тощо. В процесі виробництва та транспортування сипкого матеріалу частина речовини переходить у пилоподібний стан і потрапляє в атмосферне повітря, тим самим забруднюючи його.

Пил – аеродисперсна система з газоподібним дисперсним середовищем і твердою дисперсною фазою, яка містить частинки широкого діапазону розмірів [1–2]. Атмосферний пил – зависла в повітрі сукупність дрібних твердих частинок, здатних осідати на поверхню Землі у безвітряну погоду. Основна кількість атмосферного пилу зосереджена на висотах до 500 м [3].

Згідно з [4] загальна кількість суспендованих твердих частинок в атмосферному повітрі України з 2012 року поступово зменшувалася, але у 2016 році почала зростати. При цьому кількість дрібнодисперсних частинок складала 25–30 %. У 2016 році спостерігалось збільшення майже у два рази кількості суспендованих твердих частинок розміром 2,5 мкм та менше (рис. 1.1).

Найбільший вклад у викид твердих частинок в атмосферне повітря вносять традиційні промислові регіони – Дніпропетровська та Донецька області, на другому місці – Івано-Франківська та Київська області, на третьому – Харківська та Луганська області.

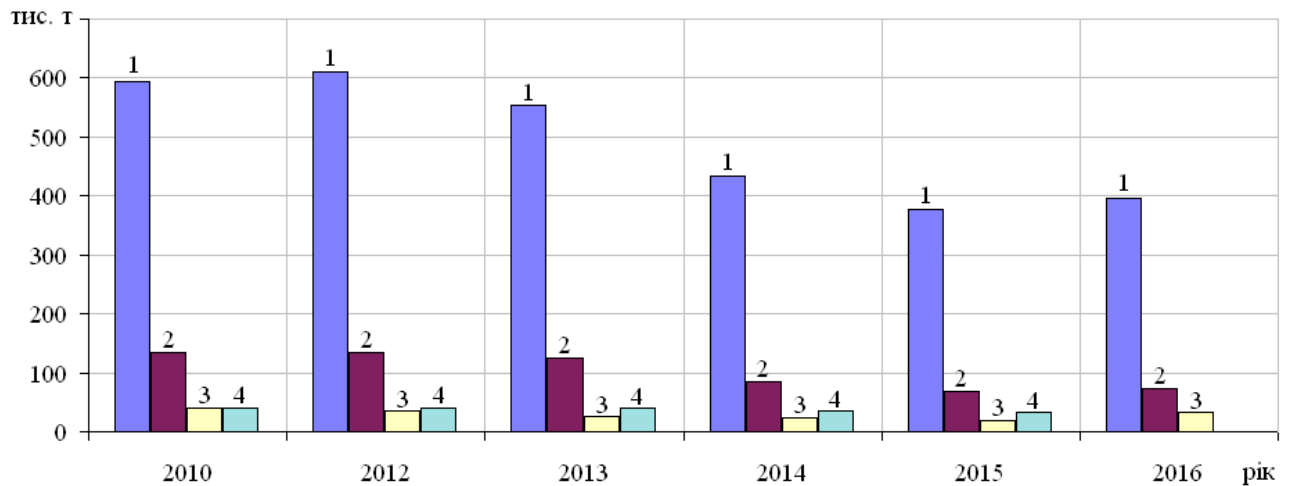


Рисунок 1.1 – Викиди суспендованих твердих частинок у атмосферне повітря:

- 1 – загальний обсяг зважених суспендованих частинок;
- 2 – суспендовані тверді частинки більше 2,5 мкм та менше 10 мкм;
- 3 – суспендовані тверді частинки 2,5 мкм та менше; 4 – сажа

За видами антропогенної діяльності найбільший внесок у викид забруднюючих речовин у вигляді суспендованих частинок здійснює постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря. Друге та третє місце у забрудненні атмосферного повітря займає добувна промисловість і розроблення кар'єрів та переробна промисловість відповідно. Суттєве погіршення стану атмосфери викликають також сільське господарство, транспорт та будівництво. Найбільш розповсюдженим повітроохоронним заходом, що впроваджувався протягом останніх років, є підвищення ефективності роботи існуючих очисних установок димових і відпрацьованих газів, вентиляційних викидів (включаючи їхню модернізацію, реконструкцію і ремонт). Лідерами по кількості впроваджених повітроохоронних заходів за основними секторами джерел забруднення атмосферного повітря у 2016 році є виробничі процеси та енергетика.

За даними [5] у 2017 році оцінка стану забруднення атмосферного повітря в містах України здійснювалася за даними спостережень у 39 містах на 129 стаціонарних постах державної системи моніторингу гідрометслужби. В

атмосферному повітрі визначався вміст 22 забруднюючих речовин, включаючи вісім важких металів.

Перевищення відповідних ГДК_{с.д.} за середньорічними концентраціями завислих речовин спостерігалася у 9 містах (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Вміст завислих речовин в атмосферному повітрі за даними спостережень гідрометеорологічних організацій, 2017 р.

Клас безпеки	Кількість міст, охоплених спостереженнями	Середньорічний вміст, мг/м ³	Середньодобові ГДК	Максимальний вміст, мг/м ³	Максимально разові ГДК	Частка міст (%), де середньорічний вміст перевищував:			Частка міст (%), де максимальний разовий вміст перевищував:		
						1 ГДК	5 ГДК	10 ГДК	1 ГДК	5 ГДК	10 ГДК
3	39	0,14	0,15	2,2	0,5	23	0	0	44	0	0

За індексом забруднення атмосфери (ІЗА), який враховує ступінь забруднення атмосферного повітря по п'яти пріоритетних забруднюючих домішках, дуже високий рівень забруднення спостерігався у Маріуполі та Дніпрі, високий – у Кам'янському, Одесі, Слов'янську, Миколаєві, Луцьку, Києві, Кривому Розі, Краматорську, Лисичанську, Запоріжжі, Рівному, Рубіжному, Ужгороді. Високий рівень забруднення атмосферного повітря вказаних міст був обумовлений здебільшого підвищеним вмістом специфічних шкідливих речовин – формальдегіду, фенолу, фтористого водню, аміаку, з основних домішок – завислих речовин, діоксиду азоту, оксиду вуглецю (рис. 1.2).

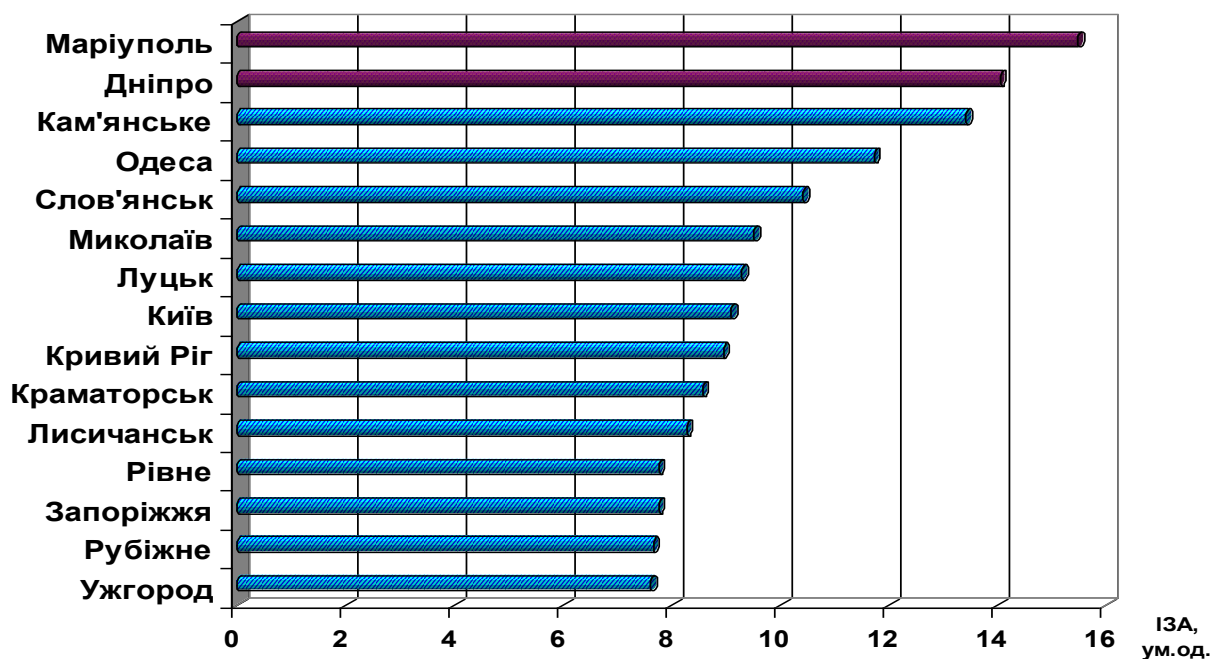


Рисунок 1.2 – Значення індексу забруднення атмосфери (ІЗА) в найбільш забруднених містах України у 2017 році

Найбільші рівні середньорічних та максимальних концентрацій забруднюючих речовин, що спостерігались в атмосферному повітрі міст України, надаються у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Перелік міст, в атмосферному повітрі яких завислі речовини зумовили найбільше забруднення за середньорічними і максимальними концентраціями (у кратності ГДК) в 2017 р.

За середньорічним вмістом		За максимально разовим вмістом	
Місто	Перевищення	Місто	Перевищення
Кривий Ріг	2,8	Кривий Ріг	4,4
Кам'янське	2,7	Харків	3,0
Дніпро	2,1	Запоріжжя	2,8
Одеса	1,7	Маріуполь	2,8
Кропивницький	1,5	Кременчук	2,4

Загальний рівень забруднення атмосферного повітря в Україні за (ІЗА) становив у 2017 р. 7,2 і оцінювався, як високий. Порівняно з попереднім роком він майже не змінився (був – 7,1)

1.2 Вплив промислового пилу на навколишнє середовище і організм людини

Щорічно більше двох мільйонів випадків передчасної смерті пов'язують з наслідками забруднення атмосферного повітря в містах і забрудненням повітря в приміщеннях [6]. Зниження якості атмосферного повітря призводить до забруднення водних об'єктів і ґрунту, а значить питної води й харчових продуктів, зростання кількості отруень і хронічних захворювань у населення.

В Україні практично дві третини населення проживає на територіях, де якість атмосферного повітря не відповідає гігієнічним нормативам. При цьому близько 17 млн. осіб, або 34 % всього населення зазнає негативного впливу атмосферних забруднень: в 3–4 рази частіше трапляються вади розвитку дітей, удвічі частіше реєструються хвороби органів дихання, загальний рівень захворюваності на 25–40 % вищий, рівень алергічних, серцево-судинних, онкологічних захворювань також вищий [3].

Промисловий пил різноманітний за складом, умовам виділення і впливу, що здійснюється на людину [7–12]. Найбільш шкідливий для організму людини пил, який містить двоокис кремнію та азбест, пил отруйних речовин – при респіраторному проникненні в організм людини вони викликають серйозні захворювання (силікози) [1, 2, 13–16].

Шкідливість пилу залежить від розмірів та форми його частинок, чим дрібніше частинка пилу і гостріше її форма, тим вона небезпечніше, адже потрапляє в легені людини і гострими краями травмує слизову оболонку, що призводить до захворювання на пневмоконіози [16, 17–20]. Часто токсичність твердих частинок обумовлена адсорбцією на їх поверхні небезпечних хімічних сполук [14].

Епідеміологічні данні свідчать про негативний вплив твердих часток як при довгостроковому так і при короткостроковому впливі у концентраціях, виявлених у наш час в багатьох містах розвинутих країн і країн, що розвиваються. Не існує даних, які б підтвердили існування якого-небудь безпечного рівня, нижче якого не наступає негативних наслідків для здоров'я. Негативному впливу пилу піддається населення в цілому, однак чутливість до забруднення може залежати від стану здоров'я чи віку. Особливо вразливі групи людей, що страждають захворюваннями легенів чи серця, а також люди похилого віку і діти.

До показників, які зазвичай характеризують зважені тверді частинки і мають значення для здоров'я, відноситься масова концентрація частинок діаметром менше 10 мкм (PM_{10}) і частинок діаметром менше 2,5 мкм ($PM_{2,5}$). На території Європи $PM_{2,5}$ становить 50–70 % PM_{10} [21]. Згідно існуючих оцінок ВООЗ, в глобальному масштабі на рахунок зважених твердих частинок відносять приблизно 3 % випадків смерті від кардіопульмонарної патології і 5 % випадків від раку легенів. Вплив $PM_{2,5}$ зменшує тривалість життя населення приблизно на 8,6 місяців [21].

Серед сімнадцяти цілей, що були озвучені в Національній доповіді «Цілі Сталого Розвитку: Україна» врахована необхідність суттєвого скорочення до 2030 року кількості смертельних випадків і захворювань в результаті забруднення повітря [22]. Отже, контроль за вмістом твердих частинок в атмосферному повітрі у місцях проживання та роботи людей, а також необхідність запровадження заходів по зменшенню викидів пилу є актуальною науково-практичною задачею.

1.3 Системи очищення газових потоків від промислового пилу та їх ефективність

Надходження в повітряне середовище виробничих приміщень і викид в атмосферу аерозолів та інших шкідливих речовин – це результат

недосконалість технологічного і транспортного обладнання, в першу чергу його негерметичність. Завдання по локалізації механічних домішок виділених при виконанні різноманітних виробничих операцій, доведення їх в повітрі робочої зони до допустимих концентрацій і видалення їх надлишків із зони роботи технологічного обладнання вирішують системи аспірації [10, 15, 23–25]. Спроектвана з дотриманням необхідних вимог система аспірації дозволяє [26–27]:

- очистити виробниче приміщення від пилу;
- виробляти якіснішу продукцію.
- повернути очищений тепле повітря назад в виробниче приміщення, що істотно знизить витрати на опалення.

У літературних джерелах [26–29] найбільш поширена така класифікація систем аспірації (рис. 1.3):

- за характером гідравлічного режиму: системи з постійною і змінною продуктивністю;
- за характером зв'язку з технологічним обладнанням: централізовані і автономні;
- за характером циркуляції повітря: прямоточні (відкриті) і циркулюючі (замкнуті).

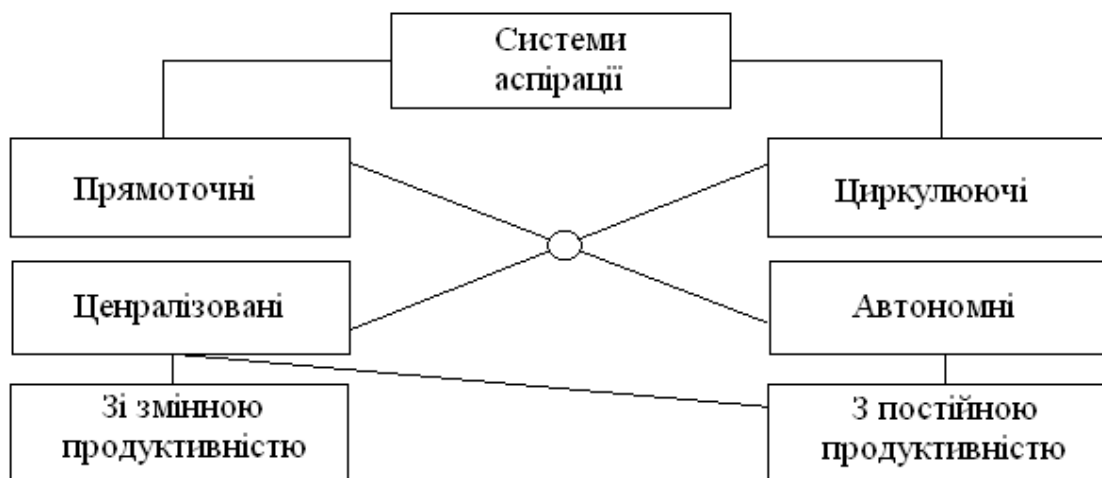


Рисунок 1.3 – Схема класифікації систем аспірації

До централізованих систем аспірації відносяться системи, до яких підключено кілька робочих органів обладнання з незалежним включенням і вимиканням. Одночасність їх роботи не є обов'язковою. Централізовані системи завжди мають принципову можливість бути виконаними як системи зі змінною продуктивністю.

До автономних систем аспірації відносяться системи, що обслуговують один або кілька робочих органів технологічного обладнання, що вмикаються і вимикаються одночасно. У таких системах за умовами технології завжди потрібно відсмоктувати однаковий об'єм повітря, отже, автономні системи не можуть бути системами зі змінною продуктивністю.

Прямоточні системи аспірації – це системи, в яких аспіраційне повітря забирається з виробничого приміщення і після очищення повітря від пилу в пиловловлювачах викидається в атмосферу.

Циркулюючі системи – це системи, в яких аспіраційне повітря після очищення в пиловловлюючих апаратах не викидається в атмосферу, а повністю або частково повертається у виробниче приміщення, що дозволяє значно скоротити втрати тепла в зимовий період, отже, зменшити витрати на опалення [26–27, 30–32].

Основними структурними елементами системи аспірації є пиловловлювач, нагнітач, пилозбірний контейнер (бункер). Як правило, у прямоточній системі знепилювання нагнітач встановлюється після пиловловлювача, що знижує інтенсивність зношення його робочого колеса. Але порівняльний аналіз трьох варіантів компоновок чотирьох структурних елементів циркулюючої системи пиловловлювання свідчить про прискорене знепилювання циркулюючого потоку при встановленні пиловловлювача після відцентрового нагнітача (рис. 1.4) [33–36]. Імовірність перехідних станів даної пиловловлюючої системи буде мати такий вигляд:

$$a_{31} = \frac{(1 - \eta_3)(1 - \eta_4)(1 - \eta_2 + \eta_2\eta_4)}{1 - \eta_2 + \eta_2\eta_4 - \eta_3(1 - \eta_2)}, \quad a_{24} = \frac{\eta_2\eta_3}{1 - \eta_2 + \eta_2\eta_4 - \eta_3(1 - \eta_2)},$$

$$a_{23} = \frac{\eta_3(1 - \eta_2) - \eta_4(1 - \eta_2 + \eta_2\eta_4)}{1 - \eta_2 + \eta_2\eta_4 - \eta_3(1 - \eta_2)}, \quad a_{32} = \frac{\eta_2\eta_3(1 - \eta_4)}{1 - \eta_2 + \eta_2\eta_4 - \eta_3(1 - \eta_2)}.$$

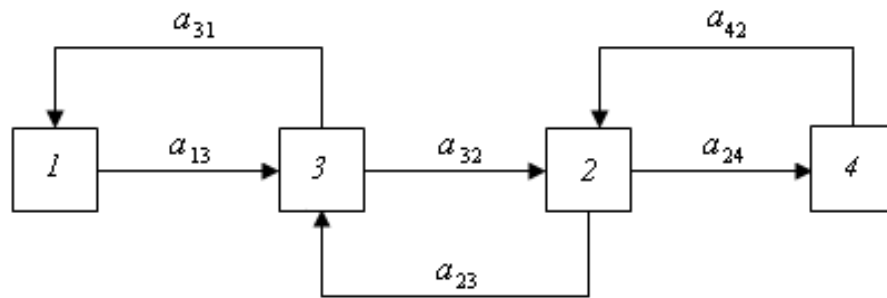


Рисунок 1.4 – Граф системи з виносним пиловловлювачем: 1 – джерело пилу;
2 – пиловловлювач; 3 – нагнітач; 4 – бункер

Найбільш ефективний варіант компоновки елементів пиловловлюючої системи [33] було реалізовано в зображеному на рис. 1.5. експериментальному стенді, який працював за циркулюючою схемою. В якості виносного пиловловлювача використовувалася система каналів із замкненими контурами й вертикальною віссю обертання потоку [37].

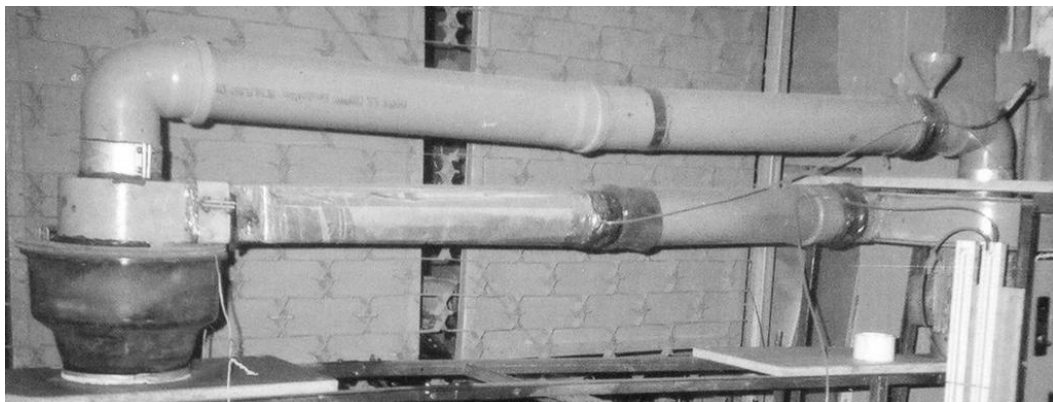


Рисунок 1.5 – Експериментальний стенд з виносним пиловловлювачем

Для проведення експериментів було використано 6,27 кг промислового пилу, утвореного у вакуумній установці внепічної дегазації рідкої сталі. Маса вловленої в пилозбірному контейнері пилу складала 3,27 кг, залишки пилу були вивантажені зі стенду при його демонтажі. Інтенсивне відкладення пилу на горизонтальних ділянках повітропроводів при невеликих швидкостях

циркулюючого у них запиленого повітря призводить до необхідності скорочення довжини загального циркулюючого контуру.

Вимоги до повноти уловлювання і очищення промислових викидів від пилу визначаються санітарно-гігієнічними вимогами до чистоти атмосферного повітря, необхідністю захисту технологічного устаткування або вимогами самої технології [38–39]. Для визначення ефективності аспірації необхідно враховувати два основні фактори: ефективність локалізації пилу в точках її виділення і ефективність роботи пристроїв для сепарації пилу. Ефективність локалізації пилу визначається устаткуванням і її значення лежить в межах 50–80%. Збільшити ефективність локалізації пилу до 98–99 % можна за допомогою конструювання, установки та модернізації місцевих відсмоктувачів і укриттів [10, 15, 23, 25, 39]. В даному випадку ефективність системи оцінюється співвідношенням видалених шкідливих домішок до шкідливих домішок, що потрапили в повітря робочої зони [23]. Локалізація пилу вирішує проблему забезпечення нормативів граничнодопустимих концентрацій (ГДК) в повітрі робочої зони. Однак при відсутності системи для очищення повітря від пилу всі шкідливі домішки викидаються в атмосферу, забруднюючи її. Тому етап пиловловлювання вважається невід'ємною частиною системи аспірації, а апарат очистки повітря від пилу – основним її елементом [7, 8, 40].

Завданням апарату очищення повітря від пилу може бути грубе або тонке поділ аерозолів, а його основними експлуатаційними показниками: вартість, якість, продуктивність.

Найбільш розповсюдженим способом очистки промислових викидів від зважених частинок є механічна очистка в сухих апаратах, більшість з яких можна виготовляти безпосередньо на монтажних майданчиках, вони дешевші від інших апаратів, простіші в експлуатації (табл. 1.3). Окрім того, використання таких апаратів дозволяє скоротити виробничі площі, зберегти водні ресурси і отримати економічний ефект за рахунок утилізації вловленого продукту.

Таблиця 1.3 – Техніко-економічні показники пиловловлювання [33]

Тип газоочисника	Проскок пилу, %	Витрати (в частках від низькоефективного циклону)		
		капітальні	експлуатаційні	Σ
Рукавний фільтр	0,1	5,15	4,1	9,25
Зрошуваний скруббер Вентурі	0,4	4,55	6,6	11,15
Сухий електрофільтр	8	9,1	1,9	11
Високоєфективний циклон	27	1,9	1,43	3,33
Низькоефективний циклон	73	1,0	1,0	2,0

Втрати тиску в пиловловлювачах визначають витрати на електроенергію, які становлять близько 80% [41] :

$$\Delta P = \xi \frac{\rho v_0^2}{2}, \quad (1.1)$$

де ξ – коефіцієнт опору апарата;

ρ – густина газового потоку, кг/м³;

v – швидкість газу, м/с.

Якість розділення аерозолів визначається коефіцієнтом уловлювання пилу [42]

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n}, \quad (1.2)$$

або коефіцієнтом проскоку пилу

$$\varepsilon = \frac{C_k}{C_n}, \quad (1.3)$$

де C_n , C_k – концентрація пилу в газовому потоці до і після його очищення відповідно.

Вартість розділення аерозолів буде однаковою, якщо порівняння проводити при однакових значеннях C_n , ΔP . В цьому випадку

$$\frac{\eta}{\sqrt{\xi}} > \frac{\eta_0}{\sqrt{\xi_0}}, \quad (1.4)$$

$$\frac{\varepsilon}{\sqrt{\xi}} < \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{\xi_0}}, \quad (1.5)$$

де η_0, ε_0 – показники еталонного апарата, який обрано для порівняння.

Критерії вловлювання $\eta \xi^{-0,5}$ і проскоку $\varepsilon \xi^{-0,5}$ визначають ефективність розділення аерозолі в пиловловлюючому апараті [43]. Це підтверджується наведеними в табл. 1.1 даними, які були отримані за результатами порівняльних випробувань циклонів [41, 44].

Таблиця 1.4 – Ефективність циклонів НІОГаз

Критерій	Тип циклону					
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15у	ЦН-24	СДК ЦН-33	СК ЦН-34
ξ	250	150	170	80	600	1270
$\Delta P = 1500$ Па, $D = 300$ мм, $\rho = 2670$ кг/м ³ , $\delta_{50} = 13$ мкм.						
η	0,875	0,865	0,845	0,800	0,905	0,910
$\eta \xi^{-0,5}$	0,055	0,068	0,065	0,090	0,037	0,027
$\eta \xi^{-0,5} / \eta_0 \xi_0^{-0,5}$	0,61	0,74	0,73	1,00	0,45	0,30
ε	0,125	0,135	0,155	0,200	0,095	0,090
$\varepsilon \xi^{-0,5}$	0,008	0,011	0,012	0,022	0,004	0,003
$\varepsilon \xi^{-0,5} / \varepsilon_0 \xi_0^{-0,5}$	207	3,7	4,0	7,3	1,3	1,0
$\Delta P = 1000$ Па, $D = 450$ мм, $\rho = 2500$ кг/м ³ , $\delta_{50} = 8$ мкм.						
η	0,71	0,70	0,66	0,50	0,70	0,71
$\eta \xi^{-0,5}$	0,045	0,055	0,051	0,070	0,028	0,022
$\eta \xi^{-0,5} / \eta_0 \xi_0^{-0,5}$	0,64	0,78	0,73	1,00	0,040	0,30
ε	0,29	0,30	0,34	0,40	0,30	0,29
$\varepsilon \xi^{-0,5}$	0,018	0,024	0,026	0,045	0,012	0,008
$\varepsilon \xi^{-0,5} / \varepsilon_0 \xi_0^{-0,5}$	2,6	3,0	3,2	5,6	1,5	1,0

Порівняльні випробування з метою визначення апарату з найвищими експлуатаційними показниками (ефективність, гідравлічний опір, металоємність при рівних енергетичних витратах) виділили як еталон циклон ЦН-11 [45–46]. За результатами розрахунку циклон ЦН-11 характеризується середнім значенням критерію вловлювання та проскоку.

1.4 Особливості роботи динамічних пиловловлювачів

Робота будь-якого сухого пиловловлювача заснована на використанні одного чи декількох механізмів осадження зважених у газі частинок: гравітаційний, інерційний, відцентровий. Найбільш широко розповсюджене виділення пилових частинок із запиленого газу при його криволінійному русі.

Вільний рух стоксівської частинки у криволінійному потоці в'язкого газу описується системою рівнянь [2, 47–48]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= \tau \frac{v_{\varphi}^2}{r} \\ \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{v_{\varphi}}{r} \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

де t – час;

r, φ – полярні координати центру частинки;

$\tau = \rho \delta^2 / 18\mu$ – час релаксації частинки;

δ – діаметр частинки;

ρ – густина частинки;

μ – динамічна в'язкість газу;

v_{φ} – окружна (тангенціальна) швидкість газу.

Криволінійний рух пилової частинки реалізується в різноманітних концентраторах, циклонних, динамічних апаратах.

Простіші динамічні пиловловлювачі – це механізм, який складається з робочого колеса й кожуху. Очистка газів від пилу в них здійснюється за

рахунок відцентрових сил і сил Коріоліса, що виникають при обертанні робочого колеса [38–39, 49–52]. Окрім осадження частинок пилу з газового потоку динамічні пиловловлювачі виконують роль тягодуттєвого пристрою.

Динамічний пиловловлювач споживає більше енергії, ніж звичайний вентилятор з ідентичними параметрами по продуктивності та напору. Але ця витрата енергії менше, ніж необхідно при окремому функціонуванні відцентрового сепаратора та вентилятора.

В залежності від місця підведення запиленого газового потоку динамічні пиловловлювачі можна розділити на кілька груп. До першої з них відносяться пиловловлювачі, в яких запилений потік подається в центральну частину колеса, що обертається у кожуху (рис. 1.6). Частинки за рахунок відцентрових сил і сили Коріоліса відкидаються на периферію диска, звідки потрапляють у пилзбірний контейнер. Очищені гази відводяться через патрубок чистого газу.

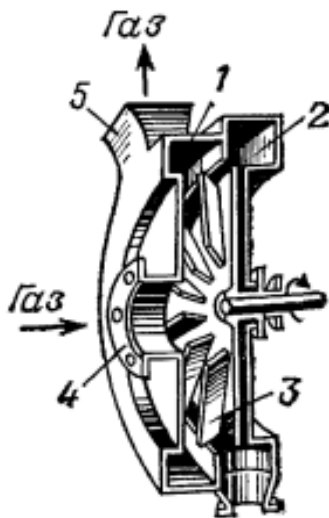


Рисунок 1.6 – Відцентровий пиловловлювач (сепаратор):
1 – корпус вентилятора;
2 – збірник пилу; 3 – колесо вентилятора; 4, 5 – патрубки

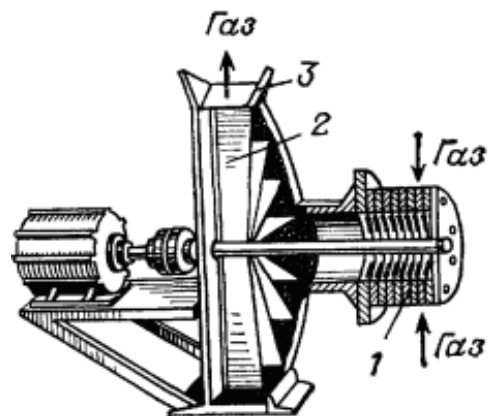


Рисунок 1.7 – Відцентровий пиловловлювач конструкції Грищенка:
1 – барабан; 2 – вентилятор;
3 – патрубок

Робоче колесо зазвичай складається з великої кількості лопаток, кут нахилу яких до диску ротора впливає на ефективність сепарації частинок із газів [53]. Відведення вловлених частинок пилу з периферійної зони в пилозбірний контейнер здійснюється за допомогою рециркуляції частини газового потоку.

До другої групи динамічних пиловловлювачів відносяться апарати, в яких уловлені частинки переміщуються в зворотному руху газів напрямку (рис. 1.7–1.11). Запилені гази всмоктуються у барабан, який обертається, через розташовані на його боковій поверхні отвори. В пограничному шарі частота обертання пилогазового потоку сягає окружної частоти обертання барабана. Внаслідок цього частинки пилу долають сили аеродинамічного опору і виділяються з газового потоку в радіальному напрямку до периферії. Різний ступінь уловлювання частинок пилу досягається в залежності від співвідношення відцентрових сил і сил аеродинамічного опору газового потоку.

Перевага динамічних пиловловлювачів у порівнянні з іншими відцентровими апаратами у компактності, скороченні металоемності, суміщенні в одному пристрої нагнітача і вловлювача, тобто в низьких енергетичних витратах, більшій продуктивності. Однак, вони мають і цілий ряд недоліків: абразивне зношення лопаток робочого колеса нагнітача, можливість утворення відкладень на лопатках, і, як наслідок, дисбаланс ротора [38–39, 51–52]. Різноманітність конструкцій динамічних пиловловлювачів [38–39, 44, 49, 54–57] забезпечує різну ефективність: в одних випадках має низьку у порівнянні з циклонами ефективність при уловлюванні частинок розміром менше 10 мкм [38–39, 51], в інших – має високий ступінь очистки дрібного пилу (до 5–8 мкм) [49].

Найбільше розповсюдження в промисловості серед динамічних пиловловлювачів отримав димосос-пиловловлювач (рис. 1.12). Апарат призначений для уловлювання частинок пилу з середнім розміром більше 15 мкм [50, 52, 56].

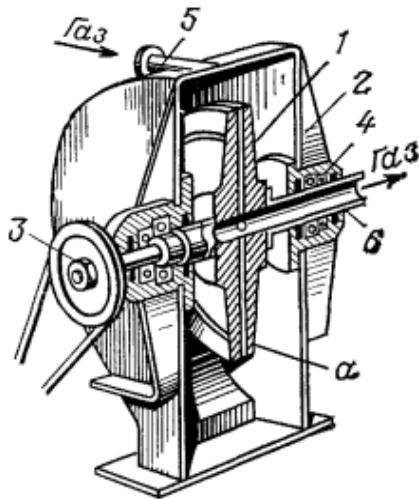


Рисунок 1.8 – Відцентровий пиловловлювач ЦРП: 1 – ротор; 2 – корпус; 3 – шків; 4 – опора; 5 – патрубок; 6 – полий вал; *a* – радіальний канал

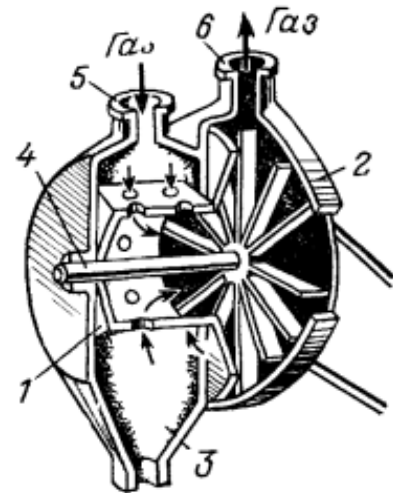


Рисунок 1.9 – Відцентровий пиловловлювач конструкції Розенкранца та Пречистенського: 1 – перфорований барабан; 2 – вентилятор; 3 – корпус; 4 – вал; 5, 6 – патрубки

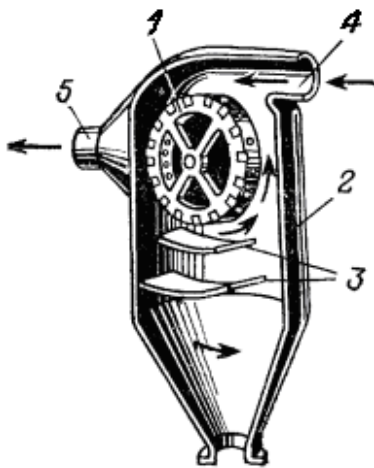


Рисунок 1.10 – Відцентровий пиловловлювач конструкції Якимова: 1 – перфорований барабан; 2 – корпус; 3 – полки; 4, 5 – патрубки

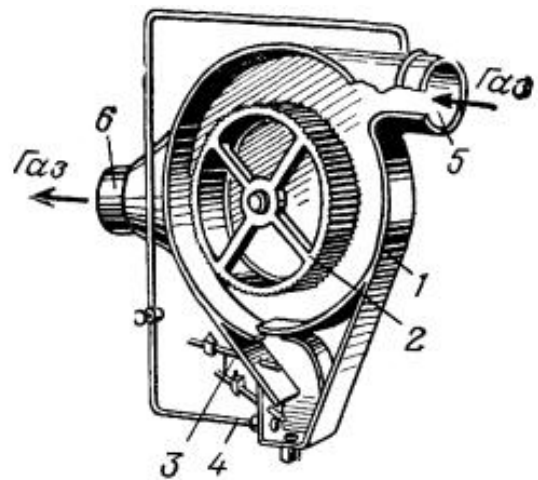


Рисунок 1.11 – Відцентровий пиловловлювач конструкції Харченка: 1 – корпус; 2 – барабан; 3 – трубки для подавання води; 4 – відсмоктувальна лінія; 5, 6 – патрубки

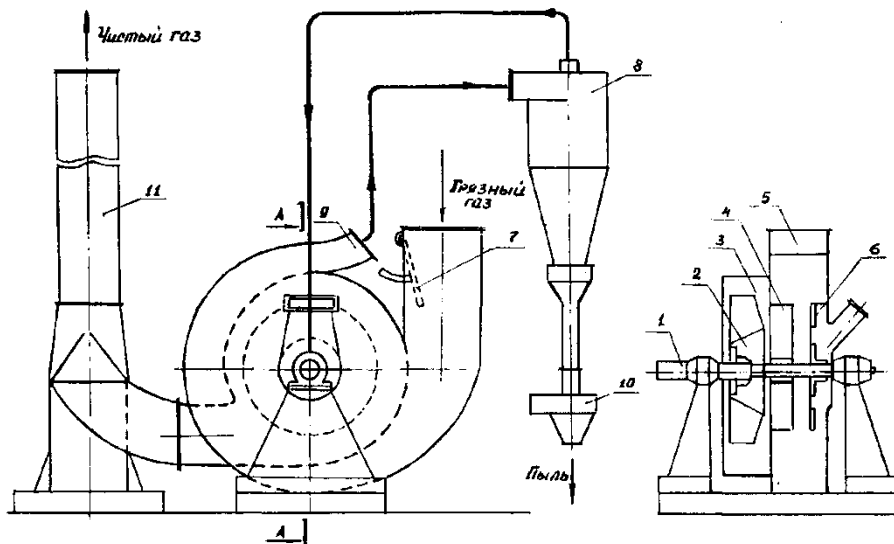


Рисунок 1.12 – Схема димососа-пиловловлювача

Димосос-пиловловлювач використовується для очистки димових газів у енергопіздах, малих котельнях, в ливарних виробництвах для очистки аспіраційних викидів і на асфальтобетонних заводах для очистки газів сушильних барабанів. Його робота заснована на наступному принципі. Запилений потік від джерела подається у вхідний завиток 5 і набуває криволінійного руху. Під дією відцентрових сил частинки пилю концентруються на периферії завитку і разом з невеликою кількістю газів (8–10 %) відводяться через патрубок 9 в рециркуляційний контур. В якості розвантажувача пилю рециркуляційного контуру використовують виносний малогабаритний циклон 8, який поєднано з завитком газоходами. Рух газу в рециркуляційному контурі здійснюється за рахунок різниці тисків між центром і периферією вхідного завитку 5. Окрім того, на приводному валу разом з основним робочим колесом 2 встановлена додаткова крильчатка 6, яка збільшує різницю тиску. На внутрішніх бокових поверхнях завитку для зменшення стирання корпусу встановлено додаткові пластини. Димососи-пиловловлювачі можуть працювати при температурі газу до 400 °С з частотою обертання ротора 980 об./хв.

В табл. 1.1 наведені технічні характеристики димососів-пиловловлювачів створені Семибратовським заводом газоочисної апаратури на базі серійних димососів [52].

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики димососів-пиловловлювачів

Показник	Марка апарата			
	ДП-8	ДП-10	ДП-12	ДП-13,5
1	2	3	4	5
Діаметр робочого колеса, мм	800	1000	1200	1350
Продуктивність, тис. м ³ /год.	8–10	14–20	22–35	35–55
Повний тиск при 20 °С, Па	1400– 1650	2100– 2500	3000– 3600	3400– 4700
Аеродинамічний ККД, %	50–52	50–52	50–52	50–52
Діаметр циклона, мм (ЦН-15У)	300	450	650	800
Гідравлічний опір циклона при 20 °С, Па	800	800	1000	1000
Ефективність уловлювання пилу з середнім розміром частинки 15–20 мкм	0,8–0,9	0,8–0,9	0,8–0,9	0,8–0,9
Допустима запиленість газів, г/м ³	100	100	150	200

Димосос-пиловловлювач з діаметром робочого колеса 1200 мм досліджувався в енергопоїзді з періодичним вивантаженням золи з пилозбірного контейнера виносного циклона ЦН 15у діаметром 600 мм і постійним гідрозоловидаленням з циклона того ж типу діаметром 750 мм [50]. При витраті димових газів до 32 тис. м³/год., зміна виносних пиловловлювачів і засобів золовидалення збільшила на 10 % вилучення з димових газів зольних частинок з медіанним діаметром $\delta_{50} = 30$ мкм.

Згідно з дослідними даними при початковій запиленості димових газів перед димососом приблизно 10 г/м^3 , ступінь уловлювання золи в виносному циклоні діаметром 600 мм сягала 97 %. Практично повна очистка в циклоні могла бути результатом збільшення концентрації пилу в газі, що подається в циклон – запиленість на вході сягала 50 г/м^3 . Таким чином, димосос в розглянутій системі пиловловлювання виконував роль концентратора золи. Окрім того, рециркуляція до 20 % від витрати вихідних димових газів збільшила сумарну продуктивність димососу з 35 до 42 тис. $\text{м}^3/\text{год}$.

Установка працювала 4500 годин при одному ремонті виносного циклона и лопаток робочого колеса димососа. Відзначено інтенсивне зношення максимально наближеної до робочого колеса спіралі з кутом повороту в межах 180° . Зношення різко зменшувалося при більшому куті повороту і практично був відсутнім у зоні вихідного патрубка димососа. Інтенсивно зношувалася циліндрична частина циклона навпроти вхідного патрубка і нижня частина конуса поблизу пиловипускового отвору.

1.5. Методи вдосконалення устаткування сухого очищення повітря від пилу

Запилені промислові гази у залежності від технології виробництва мають різні технологічні параметри і різний фізико-хімічний склад. Забезпечити високу ефективність, надійність і рентабельність очистки газів у таких умовах можна тільки тоді, коли кожний пиловловлювач буде працювати в оптимальному технологічному режимі, на який він розрахований. Саме впливом на ефективність процесу пиловловлювання великої кількості факторів [58–60] обумовлено велике різноманіття широко розповсюджених сухих інерційних пиловловлювачів [61–63]. Одним із шляхів підвищення ступеня уловлювання таких апаратів є [7, 8, 40]:

- спеціалізація апаратів;
- конструктивно-технологічне удосконалення;

- попередня обробка аерозолів;
- багатоступенева очистка.

До вибору схем пиловловлювання при вирішенні задач промислової аспірації в більшості випадків необхідно підходити індивідуально [7, 8, 13, 15, 40]. На сьогодні не існує універсальних пиловловлювачів здатних з однаковою високою ефективністю вловлювати усі види пилу у будь-яких умовах. Перспективними є апарати, спеціально розроблені для уловлювання пилу з певними властивостями [7, 8, 40].

Ефективному пиловловлюванню сприяє конструктивно-технологічне удосконалення пиловловлюючих апаратів. На підставі досвіду експлуатації, результатів натурних і експериментальних досліджень обирають оптимальне співвідношення частин пиловловлювачів, вносять конструкцію пиловловлювача нові елементи для сприяння інтенсифікації процесів, що в ньому проходять. Аналіз літературних даних визначив, що більшість удосконалень у корпусі апаратів сухого типу направлені на збільшення відцентрового фактора [45].

Висока ефективність, надійність і рентабельність пиловловлювання забезпечується тільки тоді, коли кожний пиловловлювач, що входить у склад системи очистки газів, працює в оптимальному технологічному режимі [38]. Для виконання цієї вимоги проводять підготовку пилогазової суміші до очистки від зважених частинок за наступними напрямками [7, 8, 39–40, 51–52]:

- збільшення розмірів частинок пилу за допомогою різноманітних механізмів коагуляції (турбулізації, іонізації або акустичної обробки пилогазового потоку [64–67]);
- зниження концентрації зважених часток за допомогою попередньої очистки газів в простих неенергоємних апаратах (така можливість реалізується в комбінованій системі очистки [68, 69]);
- охолодження та зволоження запилених газів (у випадку використання електричної чи мокрої очистки [70]).

Виконання сучасних вимог до якості повітря, в особливості при уловлюванні дрібнодисперсного пилю чи очищенні викидів з рідкими чи газоподібними хімічними домішками, можна досягнути багатоступеневою очисткою [7–8, 39–40, 49]. Для попередньої очистки можна використати жалюзійні решітки і циклонні, а для остаточної – рукавні фільтри, електрофільтри, мокрі пиловловлювачі. Іноді пиловловлювачі різних типів поєднують в одному апараті.

Іншим засобом боротьби із забрудненням атмосфери є проектування циркулюючих систем очистки газів від промислового пилю [71–72] – це один із варіантів створення маловідходних технологій. Використання циркулюючої схеми дозволяє виключити втрати готової продукції та забруднення ним навколишнього середовища.

1.6 Системи доочищення газів від промислового пилю

Проблему захисту атмосферного повітря на виробництві можна вирішити двома шляхами. Перший шлях пов'язаний з розробкою нових засобів і методів очистки пилогазових викидів. Другий шлях – створення мало- і безвідходних технологій на виробництві [43, 45]. Частково цей метод реалізується в циркулюючих системах доочистки газів від промислового пилю.

Наприклад, спочатку технічний вуглець вилучався з димових газів в шести послідовно встановлених одна за одною ступенях (рис. 1.13): електрофільтрі, двох циклонах, пінному апараті з однією полицею, скрубери Вентурі та пінному апараті з двома полицями. [43, 73–75]. Отриманий технічний вуглець транспортувався у відділення грануляції повітрям, яке очищувалося від технічного вуглецю в послідовно встановлених двох циклонах СКЦН-34 діаметром 1600 мм і рукавному фільтрі ФРД 6500/18 з викидом в атмосферу.

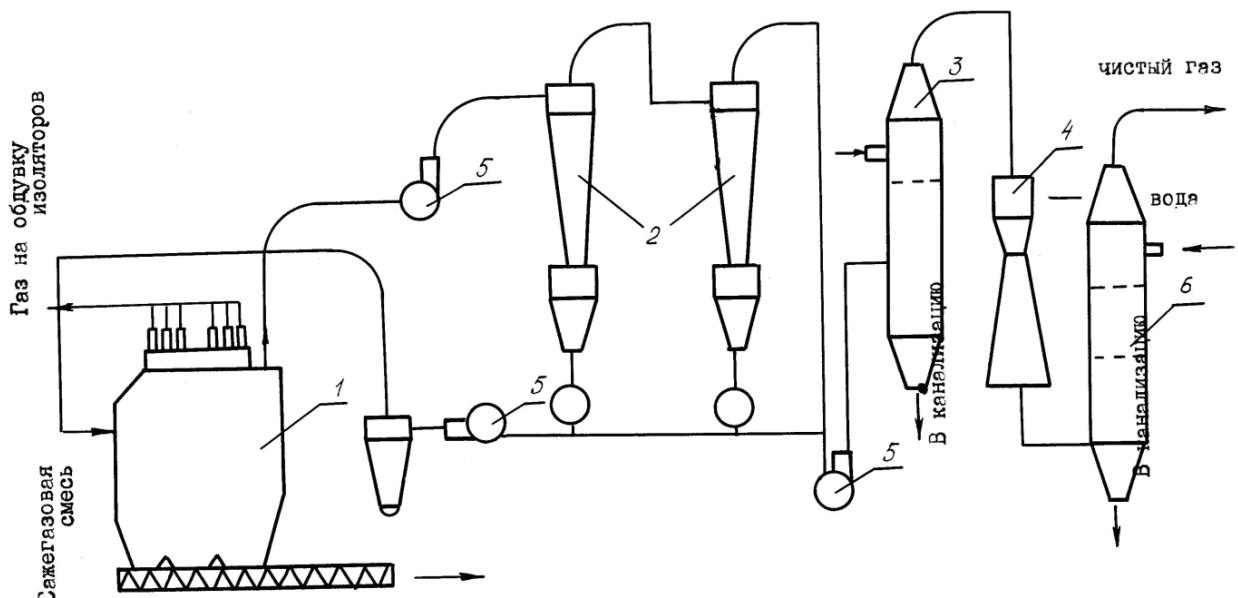


Рисунок 1.13 – Вилучення технічного вуглецю: 1 – електрофільтр;
2 – циклони; 3 – пінний апарат з однією полицею; 4 – скруббер Вентурі;
5 – димососи; 6 – пінний апарат з двома полицями

Під час реконструкції перший по ходу потоку газу циклон був замінений низьконапірним інерційним пиловловлювачем НІП-1, який складається з повороту на 180° із замкнутим контуром. Така заміна збільшила на 20 % витрату циркулюючих в замкнутому контурі димових газів без заміни димососа [75].

Зміна постійного перерізу повороту із замкнутим контуром в НІП-1 на конфузотно-дифузотний профіль при зближенні криволінійних стінок підвищило коефіцієнт уловлювання технічного вуглецю з 40 до 60 %.

Порівняльні випробування двох однакових рукавних фільтрів ФРД 6500/18 з різними розвантажувачами (циклоном СКЦН-34 і НІП-1) виявили в процесі експлуатації практично однакове збільшення виносу технічного вуглецю димовими газами (рис. 1.14). При цьому менший на порядок, у порівнянні з циклоном, опір повороту із замкнутим контуром дозволив підключити до системи пиловловлювання додатковий реактор і підвищити продуктивність технологічної лінії на 10 %. Заміна пневмотранспорту, що працював за прямоточною схемою, на циркулюючий

газотранспорт технічного вуглецю виключила його втрати і забруднення ним навколишнього середовища.

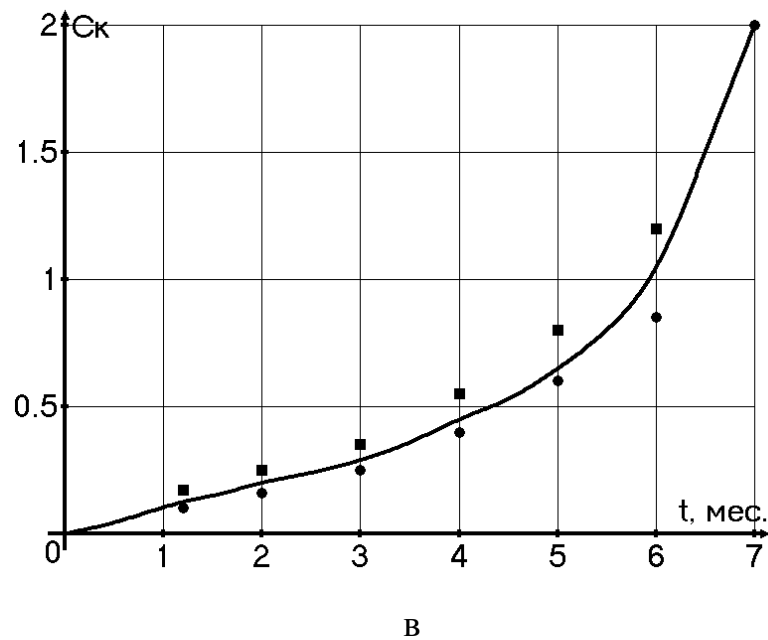


Рисунок 1.14 – Винесення готового продукту з фільтрів ФРД-6500/18:

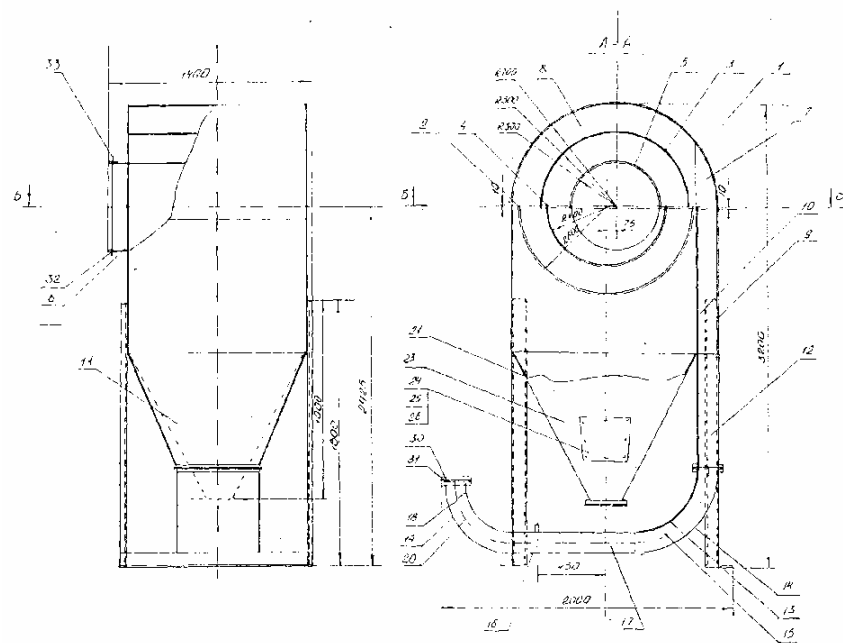
■ – низьконапірний пиловловлювач; ● – циклон СКЦН-34

На іншому виробництві димові газі обертової печі випалу клінкеру ЗАТ «Одесацемент» очищувалися в дванадцяти паралельно з'єднаних циклонах фірми братів Крейзель, діаметром 1400 мм кожен і встановленому за ними уніфікованому сухій горизонтальній електрофільтрі серії УГ з трьома секціями. Очищені таким чином димові газі з допомогою відцентрового димососа викидалися через трубу в атмосферу.

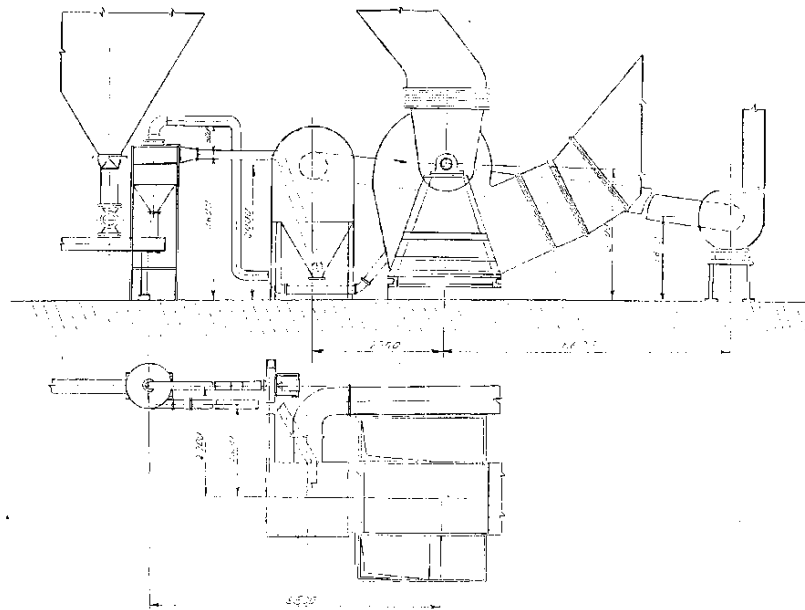
При витраті димових газів близько $100000 \text{ м}^3/\text{год.}$ і їх запиленості $80 \text{ г}/\text{м}^3$ масова витрата винесеного з печі пилу досягає $8 \text{ т}/\text{год.}$ З них близько $7 \text{ т}/\text{год.}$ вловлюється циклонами і близько $1 \text{ т}/\text{год.}$ – електрофільтром. В атмосферу через димову трубу за допомогою відцентрового димососа викидаються частинки розміром менш 1 мкм. Якщо в електрофільтр надходять частинки до медіанного діаметром близько 3 мкм, а виходять з нього з медіанним діаметром $0,3 \text{ мкм,}$ то кількість частинок в 1 кг пилу винесеного з електрофільтру в

атмосферу буде однаковим з кількістю частинок, що містяться в 1 тонні вловленого електрофільтром пилю. Ці субмікронні частинки закупорюють альвеоли легень і пори листя рослин. Таким чином, для вирішення актуального завдання по зниженню вмісту субмікронних твердих частинок в промислових викидах [17–20] в якості концентратора і коагулятора таких частинок можна використовувати димосос.

Відцентровий димосос ДВ-9а фірми братів Крейзель з двостороннім входом газового потоку встановлено між електрофільтром і димарем. При потужності електродвигуна 320 кВт і обертанні робочого колеса димососа з $n = 980$ об./хв., досягається максимальне розрідження на вході 2400 Па, максимальна витрата без підключення мережі досягає $180000 \text{ м}^3/\text{год}$. Ширина корпусу завитку димососа дорівнює 1250 мм. На криволінійній стінці змонтовано люк з розміром отвору 600 мм. Відстань від робочого колеса димососа до кришки люка так само 600 мм. Для відбору з корпусу завитку димососа концентрованої периферійної частини запиленого потоку димових газів до кришки люка було приварено забірна кишеня шириною 1250 мм і глибиною 30 мм. Концентрована частина надходила в горизонтальний пиловловлювач з чотирма криволінійними каналами [76–78]. Дві проекції загального вигляду представлені на рис. 1.15а. Пиловловлювач був встановлений між димососом і електрофільтром в обмеженому за висотою просторі. З пиловловлювача, забрана частина димових газів подавалася в напірний газохід після димососа за допомогою відцентрового вентилятора і поєднувалося з основним потоком. Максимальна продуктивність вентилятора досягала $18000 \text{ м}^3/\text{год}$. Наведена на рис. 1.15б. система доочистки димових газів після електрофільтра працювала за прямоточною схемою, щоб не допустити впливу на режим випалу клінкеру в печі.



а



б

Рисунок 1.15 – Системи доочистки димових газів після електрофільтру:

а – проєкції пиловловлювача з чотирма замкнутими контурами;

б – загальний вигляд прямої схеми

У розглянутій схемі пиловловлювач з замкнутими контурами – єдиний нестандартний елемент системи, його геометричні розміри, а також характеристика газів, для яких він розраховувався наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.6 – Характеристики пиловловлювача і газів, що очищаються

Параметр	Значення
Довжина l , мм	2000
Ширина b , мм	1500
Висота h , мм	3500
Допустимий опір ΔP , Па	2000
Максимальна витрата димових газів Q_{max} , м ³ /с	50
Витрата забраного з димососа газу q_{max}	$0,1Q_{max}$
Температура забраного газу T , °C	100
Концентрація вологи у димових газах f , г/м ³ ,	144
Густина клінкера ρ_k , кг/м ³	2750
Густина не ущільненого пилу ρ_n , кг/м ³	560
Густина ущільненого пилу ρ_y , кг/м ³	820
Медіанний розмір забраних частинок δ_{50} , мкм	0,5

При продуктивності печі 12,1 т/год., витрата газів приведений до нормальних умов на вході в димосос дорівнювала 72000 м³/год. При запиленості димових газів після їх очищення в електрофільтрі 0,2 г/м³, викидалося в атмосферу 14,4 кг/год субмікронних частинок пилу. Витрата частини димових газів, яка забирається з димососа і спрямовується в пиловловлювач, склала 8500 м³/год., їх запиленість – 1,25 г/м³, запиленість димових газів на виході з пиловловлювача із замкнутими контурами – 0,744 г/м³. Кількість вловленого пилу – 4,3 кг/год.

Доочищення димових газів цементної печі від клінкерного пилу, що виносився з електрофільтру, на третину скоротила викиди в атмосферу і підтвердила ефективність застосування відцентрового димососа як концентратора і коагулятора твердих частинок дрібніше 1 мкм [33, 77].

З метою зниження викиду в атмосферу продукту дитячого харчування «Деталакта» [79] при пневмотранспорті була розроблена і реалізована

циркулююча система доочищення. Загальний вигляд системи наведений на рис. 1.16.

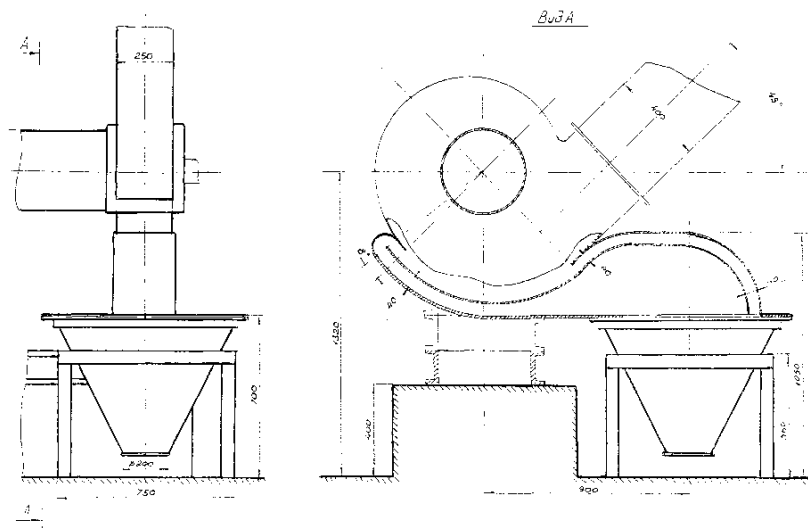


Рисунок 1.16 – Загальний вигляд циркулюючої системи доочищення продукту дитячого харчування після циклону

Система складається з модернізованого відцентрового вентилятору, усіченого бункеру, вхідного і вихідного повітропроводів прямокутного перетину, що з'єднують бункер з вентилятором. Пробний пуск виявив непрацездатність системи через малий об'єм бункера і винесення з нього пилу. Після установки на кришці бункера патрубк з фільтруючим рукавом щодоби у бункері уловлювалося від 36 до 70 кг «Деталакта».

1.7 Висновки до розділу 1

Встановлено, що більшість сучасних технологічних процесів супроводжується великим пилоутворенням, яке призводить як до економічних втрат, так і до забруднення навколишнього середовища. Існує два шляхи боротьби з забрудненням атмосфери: очищення пилогазових викидів і розробка мало- і безвідходних технологій.

Вплив на процес очищення великої кількості факторів не дає можливості створення універсальних пиловловлювачів. Але, використовуючи основні методи їх вдосконалення, можлива розробка відцентрових пиловловлювачів, які дозволять підвищити якість поділу фаз при зниженні енергетичних витрат. В апаратах сухого типу більшість таких удосконалень спрямовані на збільшення відцентрового фактору.

Одним з варіантів створення маловідходних технологій є проектування циркулюючих систем знепилювання. У таких системах для підвищення ефективності пиловловлювання за рахунок концентрації та коагуляції пилу можливе встановлення нагнітача перед пиловловлювачем.

Аналіз досвіду використання устаткування для сухого очищення повітря від полідисперсного пилу та можливих шляхів підвищення їх ефективності дозволив визначити основні напрями дослідження:

- обґрунтувати доцільність поєднання в одному апараті механізмів відцентрового та інерційного осадження і розробити математичну модель розподілу пилу у такому комбінованому пиловловлюючому апараті (КПА).

- провести математичне моделювання течії повітря у криволінійному каналі з кутом повороту 180° та оцінити можливість його використання, як елемента для концентрації пилової маси у КПА.

- довести переваги використання циркулюючої пиловловлюючої системи у порівнянні з прямою системою.

- провести фізичний експеримент на дослідному стенді, проаналізувати та узагальнити його результати, з'ясувати можливості використання відцентрового нагнітача для коагуляції дрібнодисперсного пилу.

- виробити рекомендації щодо розрахунку основних конструктивних та експлуатаційних параметрів КПА.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВЛОВЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ

У технологічному процесі сухого очищення повітряного потоку від пилу, яке проходить в результаті сепарації з нього твердих частинок під дією зовнішніх сил, можна виділити чотири етапи [25]:

- закручування потоку;
- концентрація та виведення частинок пилу з сепараційної зони;
- формування шару пилу у пилозбірному контейнері;
- видалення вловленого пилу з пилозбірного контейнеру.

2.1 Закручування потоку, концентрація та виведення частинок пилу з сепараційної зони

2.1.1 Обґрунтування конструкції пиловловлюючого апарату

В технічному устаткуванні закручування потоку відбувається за допомогою роторів чи направляючих лопатей, за рахунок спірального або тангенціального введення [80]. У динамічних пиловловлювачах для закручування потоку використовують робоче колесо, при обертанні якого виникають сили Коріоліса, які сприяють сепарації пилу. Найбільше розповсюдження в промисловості серед динамічних апаратів отримав димосос-пиловловлювач.

У [35] проведено порівняльний аналіз можливих варіантів знепилювання об'єкту «Укриття» на Чорнобильській АЕС, який виявив ефективність використання димососа-пиловловлювача в циркулюючих пиловловлюючих системах. Його використання зменшує габарити та металосміність системи в цілому, що важливо при вилученні радіоактивного пилу.

Конструкцію комбінованого пиловловлюючого апарату (рис. 2.1) було отримано шляхом внесення змін до схеми димососа-пиловловлювача. З схеми останнього було виключено циклон, а вентилятор об'єднано з пилозбірним контейнером – бункером. Відцентровий вентилятор у такій схемі виконує подвійну дію: нагнітання пилогазового потоку та сепарації пилу.

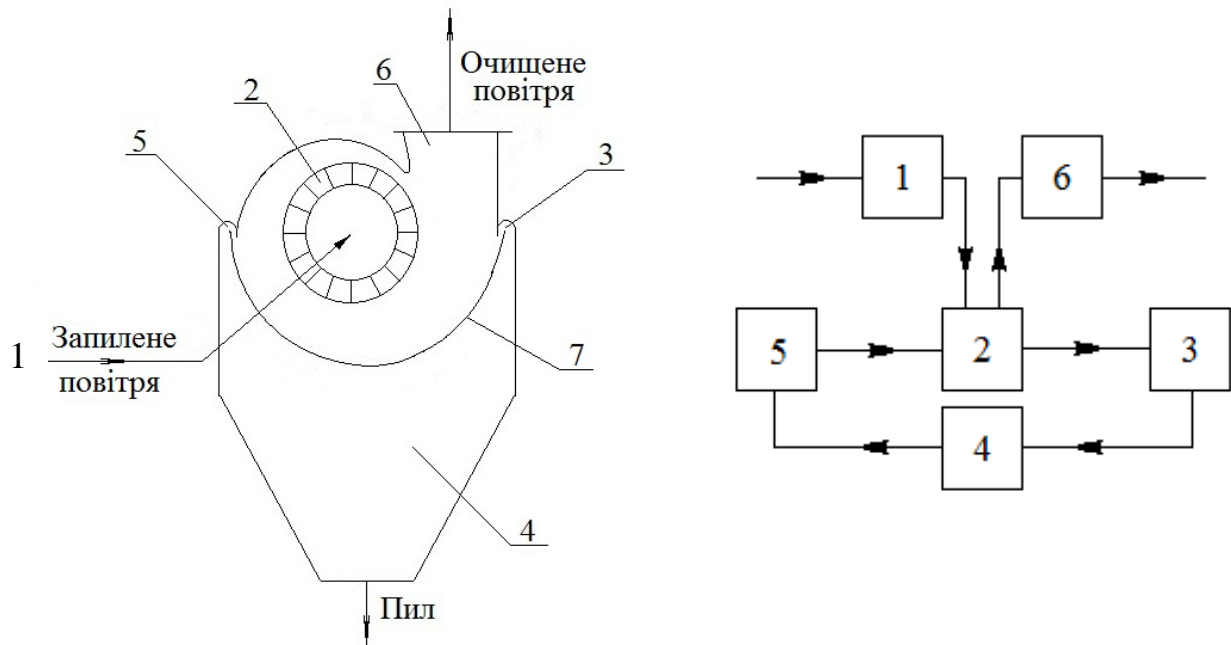


Рисунок 2.1 – Схема пиловловлюючого апарату: 1 – вхідний патрубок; 2 – робоче колесо нагнітача; 3 – щілина для відводу запиленого газового потоку; 4 – пилозбірний контейнер пиловловлювача; 5 – щілина для відводу очищеного від пилу газового потоку; 6 – вихідний патрубок; 7 – корпус нагнітача

Запропонований комбінований пиловловлюючий апарат працює наступним чином. Пилогазова суміш через вхідний патрубок 1 направляється в робоче колесо нагнітача 2 і набуває криволінійну траєкторію руху. Під дією відцентрових сил частинки пилу концентруються на периферії корпусу нагнітача 7 та разом з невеликою кількістю газів (10–15 %) відводяться через щілину 3 в бункер пиловловлювача 4, інша частина газу через вихідний

патрубок 6 виводиться з нагнітача пиловловлювача. В бункері частинки пилу під дією сил тяжіння осідають, а очищене повітря повертається у проточну частину нагнітача через щілину 5. Пиловловлювач може працювати за прямоточною схемою, коли очищене повітря через вихідний патрубок викидається в атмосферу, та циркулюючою, коли очищене повітря знову подається у вхідний патрубок. При заповненні бункеру пилом між вільною поверхнею пилу та криволінійною поверхнею корпусу нагнітача утворюється дифузорно-конфузорний криволінійний канал з циркулюючим контуром. Поступово канал змінного перерізу перетворюється у криволінійний канал сталого перерізу і пил не сепарується з циркулюючого запиленого потоку.

Циркуляція концентрованого запиленого потоку по контуру напівобичайки дозволяє накопичуватися пилу в пилозбірному контейнері. Більша у порівнянні зі стінками завитку товщина напівобичайки збільшує її довговічність. Окрім того, напівобичайка здатна функціонувати без помітного порушення ефективності пиловловлювання при наявності у ній свищів, сумарна площа яких менше граничної величини, що також підвищує надійність пиловловлюючого апарату. Можливе відновлення чи заміна напівобичайки при ремонті нагнітача.

Наявність замкненого контуру (негативного зворотного зв'язку) в пиловловлюючій системі компенсує безліч різноманітних збурень і стабілізує умови процесів, які в ній протікають [81].

На відміну від системи з виносним пиловловлювачем, циркулюючий в замкненому контурі апарата запилений потік не потрапляє в робоче колесо нагнітача. При цьому знижується зношення його лопаток, що також збільшує надійність пиловловлюючого апарату.

Загальний коефіцієнт вловлювання пилу в димососі-пиловловлювачі визначається відношенням [39]:

$$\eta = \frac{\eta_{ул} \eta_{ц}}{1 - \eta_{ул} + \eta_{ул} \eta_{ц}}, \quad (2.1)$$

де $\eta_{ул}$ – коефіцієнт вловлювання завитку;

$\eta_{ц}$ – коефіцієнт вловлювання виносного циклону.

Наведена залежність справедлива для пиловловлюючого апарату при заміні коефіцієнту вловлювання циклону на $\eta_{к}$ – коефіцієнт вловлювання пилу в пилозбірному контейнері. Згідно з (2.1), $\eta = 0,33$ при $\eta_{ул} = \eta_{к} = 0,5$ и $\eta = 0,33$ при $\eta_{ул} = 0,9$ и $\eta_{к} = 0,7$. Коефіцієнт вловлювання завитку підвищується з наближенням до початкової ділянки забору циркулюючого потоку. Зі збільшенням його запиленості збільшується коефіцієнт вловлювання у пилозбірному контейнері.

Доочистка димових газів після електрофільтра в відцентровому димососі і виносному пиловловлювачі з замкненими контурами підтвердила високу сепараційну здатність димососу [33], необхідність наближення забору циркулюючого потоку до початкової ділянки завитку і ефективність використання нагнітача для концентрації та коагуляції субмікронних частинок.

Ефективність вилучення пилу з циркулюючого потоку в пилозбірному контейнері визначається умовою обтікання опуклої сторони напівобичайки, тобто поворотом потоку на кут $\varphi = \pi$. Експериментальні дослідження траєкторій частинок [82], розподіл вугільного пилу по перерізу каналу з кутом повороту $\varphi = \pi$ [83] і золи уздовж периферійної границі такого ж каналу з замкненим контуром [84] підтверджують реальність допущення $\eta_{к} = 0,7$.

2.1.2 Імовірнісна модель пиловловлюючої системи з трьома структурними елементами

Запилений газовий потік – це складна імовірнісна система. Зміна стану циркулюючого в замкненій системі пилу, тобто знаходження певної частинки пилу в одному з елементів пиловловлюючої системи, представлено графом перехідних станів (рис. 2.2–2.3). Верхівки графів відповідають елементам системи пиловловлювання, ребра графу (стрілки) вказують напрям руху частинки з одного елементу системи в інший.

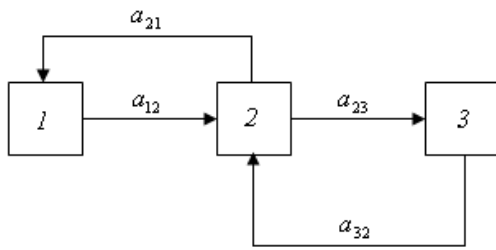


Рисунок 2.2 – Граф системи з комбінованим пиловловлюючим апаратом: 1 – джерело пилу; 2 – нагнітач; 3 – пилозбірний контейнер

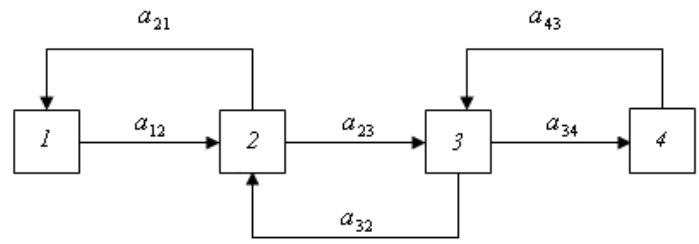


Рисунок 2.3 – Граф системи з виносним пиловловлювачем: 1 – джерело пилу; 2 – нагнітач; 3 – виносний пиловловлювач; 4 – пилозбірний контейнер

Кількість пилових частинок, що переходять з однієї верхівки графу до іншої за одиницю часу – це густина потоку подій a_{ij} , яка є імовірнісною інтерпретацією концентрації пилу у повітропроводі і знаходиться через коефіцієнти уловлювання η_i .

Для графу системи з комбінованим пиловловлюючим апаратом (рис. 2.2) справедливі рівність:

$$a_{21} = (1 - \eta_2)(a_{12} + a_{32});$$

$$a_{23} = \eta_2(a_{12} + a_{32});$$

$$a_{32} = (1 - \eta_3)a_{23}.$$

При $a_{12} = 1$ отримаємо співвідношення:

$$a_{21} = \frac{1 - \eta_2}{1 - \eta_2 + \eta_2 \eta_3};$$

$$a_{23} = \frac{\eta_2}{1 - \eta_2 + \eta_2 \eta_3}; \quad (2.2)$$

$$a_{32} = \frac{\eta_2(1 - \eta_3)}{1 - \eta_2 + \eta_2 \eta_3}.$$

Густина потоків подій дає можливість порівнювати ймовірність заповнення пілозбірного контейнеру пилом альтернативних варіантів пиловловлюючих систем.

Для графу системи з виносним пиловловлювачем (рис. 2.3) при $a_{12} = 1$ справедливі співвідношення:

$$\begin{aligned}
 a_{21} &= \frac{(1-\eta_2)(1-\eta_3 + \eta_3\eta_4)}{\eta_3\eta_4 + (1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \\
 a_{23} &= \frac{\eta_2(1-\eta_3 + \eta_3\eta_4)}{\eta_3\eta_4 + (1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \\
 a_{32} &= \frac{\eta_2(1-\eta_2)}{\eta_3\eta_4 + (1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \\
 a_{34} &= \frac{\eta_2\eta_3}{\eta_3\eta_4 + (1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \\
 a_{43} &= \frac{\eta_2\eta_3(1-\eta_4)}{\eta_3\eta_4 + (1-\eta_2)(1-\eta_3)}.
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Згідно (2.3), неможливе одночасне наближення до одиниці коефіцієнтів уловлювання виносного пиловловлювача (η_3) та пілозбірного контейнера (η_4).

Порівняння ефективності роботи знепилюючих систем з різною кількістю однакових структурних елементів зводиться до визначення знака нерівності між густиною потоків пилу a_{23} в (2.2) и a_{34} в (2.3). При рівності коефіцієнтів обох пілозбірних контейнерів достатньо визначити знак нерівності між співвідношеннями:

$$a_{23} = \frac{\eta_2}{1-\eta_2 + \eta_2\eta_3} \text{ и } a_{34} = \frac{\eta_2 x}{\eta_3\eta_4 + (1-\eta_2)(1-\eta_3)},$$

де $x = \eta_3$ в рівнянні (2.3).

Похідна $\frac{da_{34}}{dx} = \frac{\eta_2(1-\eta_2)}{(1-\eta_2)^2 + (\eta_2 + \eta_4)^2 x}$ завжди додатна, тому a_{34} зростає і в

інтервалі $0 < x < 1$ справедлива тотожність:

$$\max \frac{\eta_2 x}{1 - \eta_2 + (\eta_2 + \eta_4)x} = \frac{\eta_2}{1 + \eta_4}.$$

Послідовність оцінок при $x = \eta_3$ має вигляд:

$$\frac{\eta_2 \eta_3}{1 - \eta_2 (\eta_2 + \eta_4) \eta_3} = \frac{\eta_2 \eta_3}{\eta_3 \eta_4 + (1 - \eta_2)(1 - \eta_3)} = a_{34} < \frac{\eta_2}{1 + \eta_4} = \frac{\eta_2}{1 - \eta_2 (\eta_2 + \eta_4)} < \frac{\eta_2}{1 - \eta_2 (\eta_2 + \eta_4)} = a_{23},$$

отже, нерівність $a_{34} < a_{23}$ свідчить про більшу густину потоку пилу на вході в пилосбірний контейнер системи з меншою кількістю структурних елементів.

Взаємодію між трьома структурними елементами можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -a_{12}P_1 + a_{21}P_2 \\ \frac{dP_2}{dt} = a_{23}P_1 - (a_{21} + a_{23})P_2 + a_{32}P_3, \\ \frac{dP_3}{dt} = a_{23}P_2 - a_{23}P_3 \\ P_1(0) = 1; P_2(0) = P_3(0) = P_4 = 0 \end{cases}$$

звідки отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = a_{12} - (a_{12} + a_{21})P_1 - a_{21}P_3 \\ \frac{dP_3}{dt} = a_{23} - a_{23}P_1 - (a_{23} + a_{32})P_3. \\ P_1(0) = 1 \\ P_3(0) = 0 \end{cases}$$

Її вирішення залежить від характеристичних коренів матриці

$$A = \begin{vmatrix} (a_{12} + a_{21}) & -a_{21} \\ -a_{23} & -(a_{23} + a_{32}) \end{vmatrix}$$

і має вигляд

$$P_j = \begin{cases} q_j - \alpha_j e^{-\lambda_1 t} n p u D > 0 \\ q_j + e^{-\lambda_2 t} (m_j \cos \beta t + n_j \sin \beta t) n p u D < 0 \end{cases},$$

де q_j – граничні імовірності;

$-\lambda_1$ и $-\lambda_2$ – дійсні характеристичні корені матриці A ;

– α и β – комплексні характеристичні корені матриці A ;

$$D = (a_{12} + a_{21} + a_{23} + a_{32})^2 - 4(a_{12}a_{23} + a_{12}a_{32} + a_{21}a_{32}).$$

Значення показників для кожного структурного елемента визначається відповідними залежностями:

$$q_1 = \frac{1}{1 + \frac{a_{12}}{a_{21}} + \frac{a_{12}a_{23}}{a_{21}a_{32}}}; \quad q_2 = 1 - q_1 - q_3; \quad q_3 = \frac{1}{1 + \frac{a_{32}}{a_{23}} + \frac{a_{21}a_{32}}{a_{12}a_{23}}};$$

$$\alpha_1 = \frac{(1 - q_1)(a_{12} + a_{21} + \lambda_2)}{\lambda_2 - \lambda_1}; \quad \alpha_2 = -(\alpha_1 + \alpha_3); \quad \alpha_3 = \frac{\alpha_1(a_{12} + a_{21} + \lambda_1)}{a_{21}};$$

$$\beta_1 = \frac{a_{21}q_3(1 - q_1)(a_{12} + a_{21} + \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}; \quad \beta_2 = -(\beta_1 + \beta_3); \quad \beta_3 = \frac{-\beta_1(a_{12} + a_{21} + \lambda_2)}{a_{21}};$$

$$m_1 = 1 - q_1; \quad m_2 = -(1 - q_1 - q_3); \quad m_3 = -q_3;$$

$$m_1 = \frac{(a_{23} + a_{32} - \alpha)q_3(a_{12} + a_{21} - x)}{\beta}; \quad m_2 = -(n_1 + n_2); \quad m_3 = \frac{(a_{23} + a_{32} - x)q_3 - (1 - q_1)a_2}{\beta}$$

Якщо Q_0 – витрата джерела пилу, то витрата пилу, що накопичується

$$Q = Q_0 P_3(t) \text{ чи } Q = \begin{cases} Q_0(q_3 + \alpha_3 e^{-\lambda_1 t} + \beta_3^{-\lambda_2 t}) n p u D > 0 \\ Q_0(q_3 e^{-\alpha t}), (m_3 \cos \beta t + n_3 \cos \beta t) n p u D < 0 \end{cases}$$

При $D > 0$ маса накопиченого за час t пилу

$$M_t = Q_0 \left[q_3 t + \frac{\alpha_3}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_1 t}) + \frac{\beta_3}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right].$$

Корінь вирішення отриманого рівняння відносно часу наповнення пилозбірного контейнеру t є критерієм ефективності циркулюючої пиловловлюючої системи з трьома структурними елементами.

Таким чином, зменшення кількості числа структурних елементів з чотирьох до трьох в циркулюючій пиловловлюючій системі ізольованого простору скорочує час заповнення пилозбірного контейнеру, спрощує систему, підвищує її надійність.

2.1.3 Моделювання течії повітря у криволінійному каналі з кутом повороту 180°

Основними структурними елементами у пиловловлюючому апараті є повороти різної кривизни на кут $\varphi = \pi$ навколо вертикальної чи горизонтальної вісі.

Аналіз континуальної моделі криволінійної течії запиленого газу, що містить дрібнодисперсний пил, виявив зворотну залежність її локальної концентрації від окружної швидкості газу [85]. У цьому випадку наявність пилу поблизу криволінійних стінок каналу з поперечним прямокутним перерізом і кутом повороту $\varphi = \pi$ [83] повинна свідчити про малі окружні швидкості у вказаних областях течії. Задача турбулентної течії в'язкого газу в криволінійному каналі остаточно не вирішена аналітичними методами. Явища та процеси, що відбуваються у повороті, різними авторами аналізуються на основі рішень, отриманих для ідеального газу з урахуванням дослідних даних. Радіальний розподіл локальних окружних швидкостей ідеального газу у повороті описується гіперболічним законом [86].

Криволінійна течія в'язкого газу супроводжується двома основними процесами перетворення енергії. Перший – перехід механічної енергії потоку із однієї її форми в іншу: із потенціальної (тиску) в кінетичну і навпаки. Другий – перехід механічної енергії від макроскопічного руху газового потоку в теплову енергію. Він здійснюється молекулярним переносом імпульсу (в'язким тертям), визначає необоротні втрати механічної енергії та називається її дисипацією [87].

Моделювання криволінійної течії повітря проводилося у прикладному пакеті *Solid Works COSMOS Flow Works*. У комп'ютерній програмі була побудована твердотільна модель криволінійного каналу прямокутного перерізу з кутом повороту $\varphi = \pi$. В якості граничних умов задавався перепад тиску на вході і виході з каналу ΔP , кількість твердих частинок і їх діаметр δ .

Комп'ютерний експеримент виявив аналогію між полем дисипації механічної енергії повітряного потоку в криволінійному каналі з постійним прямокутним перерізом і загальною картиною траєкторій в ньому 300 твердих частинок діаметром $\delta = 1$ мкм (рис. 2.4). Ця аналогія підтверджує допустимість заміни в континуальній моделі криволінійної течії запиленого газу масової концентрації дрібнодисперсного пилу на тотожно рівну їй густину абстрактного суцільного середовища [85]. Максимальне значення дисипації енергії та запиленості повітряного потоку відповідають мінімальним величинам його окружної швидкості.

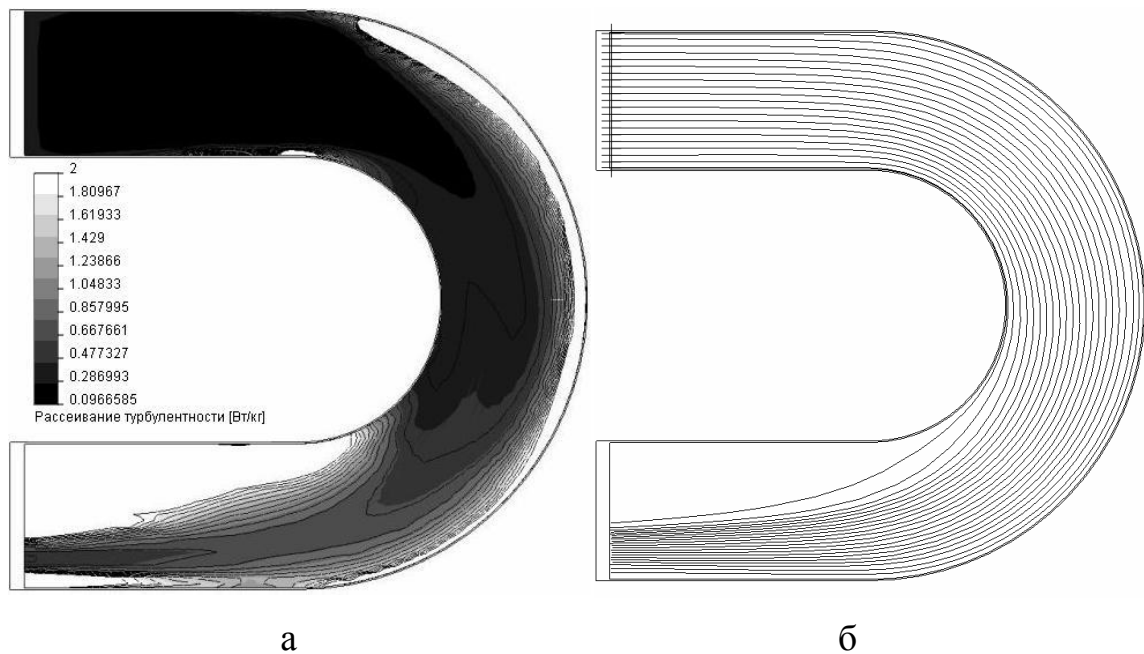
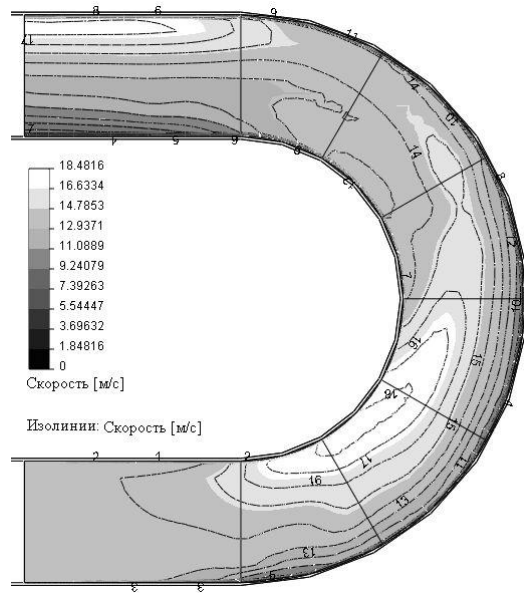
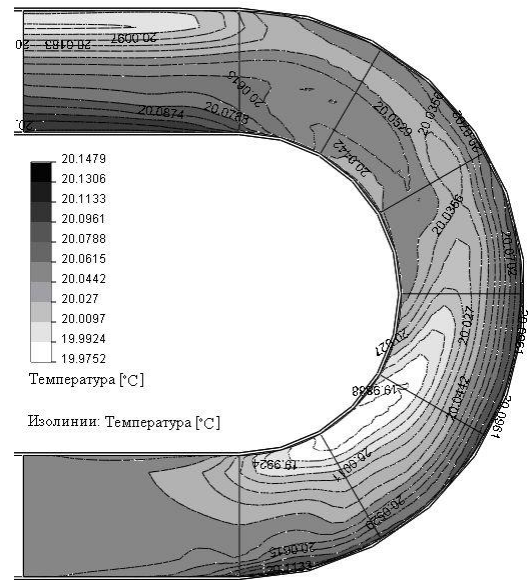


Рисунок 2.4 – Дисипація енергії (а) та траєкторії частинок пилу (б) в повітряному потоці при $\Delta P = 300$ Па

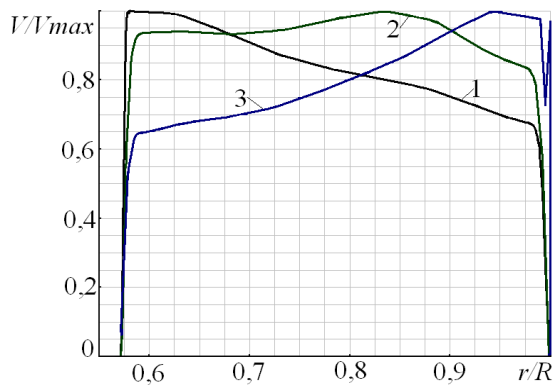
Радіальні та кутові розподілення відносних окружних швидкостей і температур повітря у вертикальній площині симетрії криволінійного каналу з прямокутним поперечним перерізом і кутом повороту на 180° свідчать про зворотну залежність температури і окружної швидкості (рис. 2.5). Максимум окружної швидкості переміщується від центральної до периферійної стінки каналу.



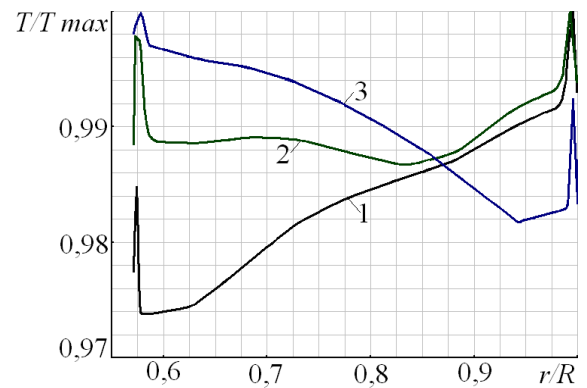
а



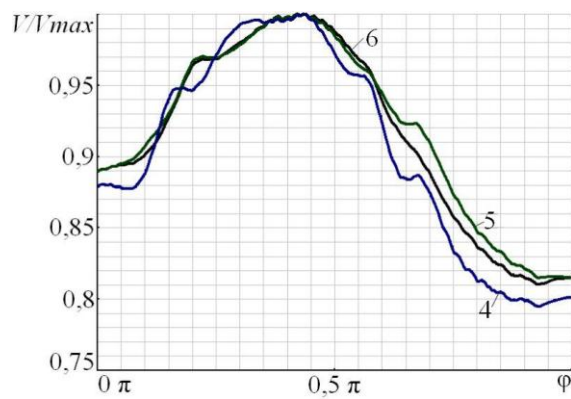
б



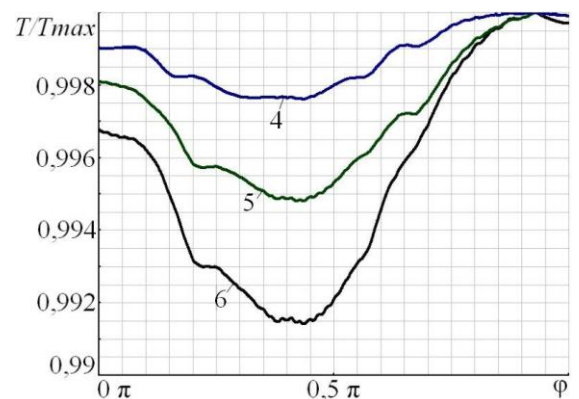
в



г



д



е

Рисунок 2.5 – Поля (а, б), радіальні (в, г) та кутові (д, е) розподілення відносних окружних швидкостей (а, в, д) і температур (б, г, е) повітря при $\varphi = 0$ (1), $\varphi = \pi / 2$ (2), $\varphi = \pi$ (3), $\Delta P = 100$ Па (4), $\Delta P = 200$ Па (5), $\Delta P = 300$ Па (6), $R = 100$ мм, $V_{max} = 32$ м/с, $T_{max} = 20$ °С.

Зміна температури свідчить про радіальне перенесення теплової енергії – основу ефекту Ранка, який вперше був відкритий наприкінці 1920-х років під час спостережень в циклоні та широко використовується у вихрових трубах для нагрівання та охолодження газів.

Відповідні радіальні та кутові розподілення тиску та густини повітря корелюють між собою (рис. 2.6). Додатний радіальний градієнт тиску на вході в канал ($\varphi = 0$) підсилюється в середині повороту ($\varphi = \pi / 2$) та зникає на виході з каналу ($\varphi = \pi$). Густина на виході має найбільший радіальний градієнт при достатньо близьких загальних картинах розподілення цих параметрів. Хвильовий характер змін по ходу потоку в його осьовій зоні є загальним для всіх п'яти розглянутих параметрів криволінійної течії повітря практично при всіх опорах каналу.

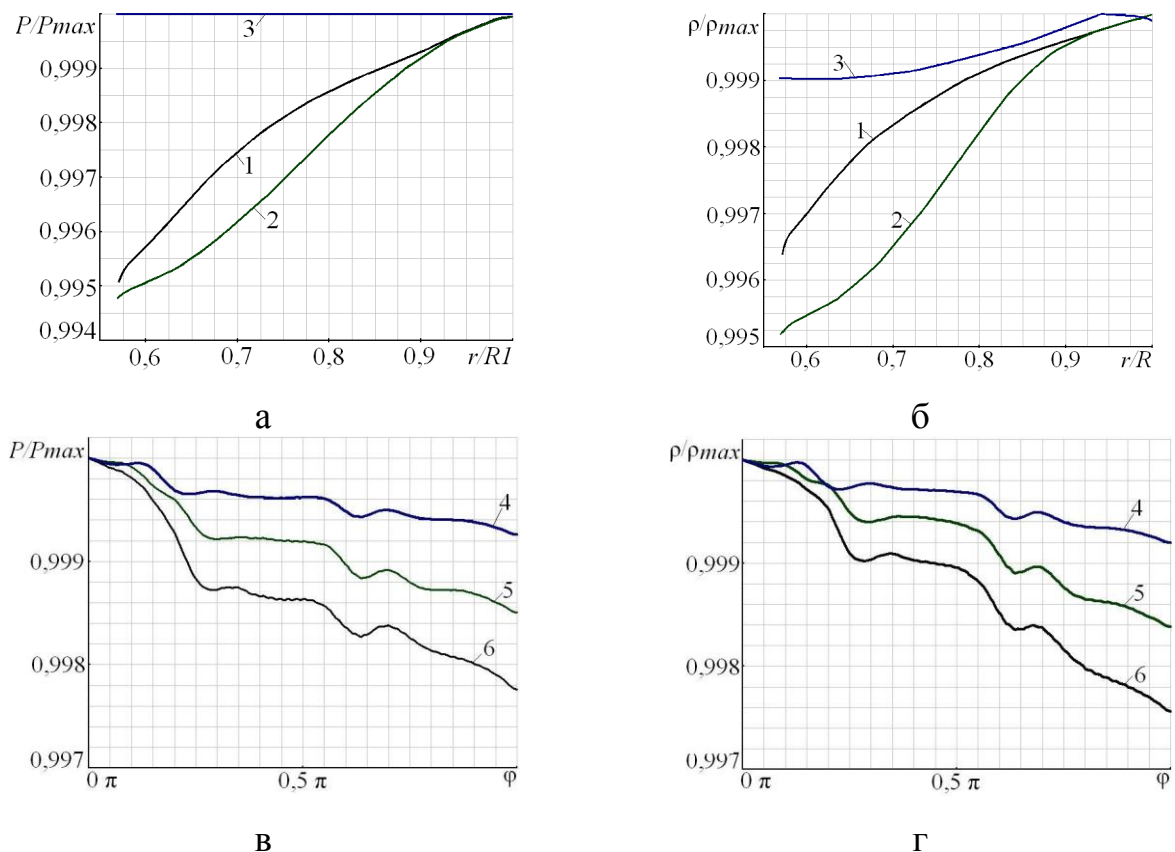


Рисунок 2.6 – Радіальні (а, б) та кутові (в, г) розподіли тиску (а, в) й густини (б, г) повітря в каналі при $\varphi = 0$ (1), $\varphi = \pi/2$ (2), $\varphi = \pi$ (3),

$\Delta P = 100$ Па (4), $\Delta P = 200$ Па (5), $\Delta P = 300$ Па (6), $R = 100$ мм,

$$P_{max} = 101315 \text{ Па}, \rho_{max} = 1,2036 \text{ кг/м}^3.$$

Криволінійний канал із зовнішнім (периферійним) замкнутим контуром – ефективний пиловловлювач [30–32, 41, 73–75], про що свідчать наведені на рис. 2.7 дослідні данні [88].

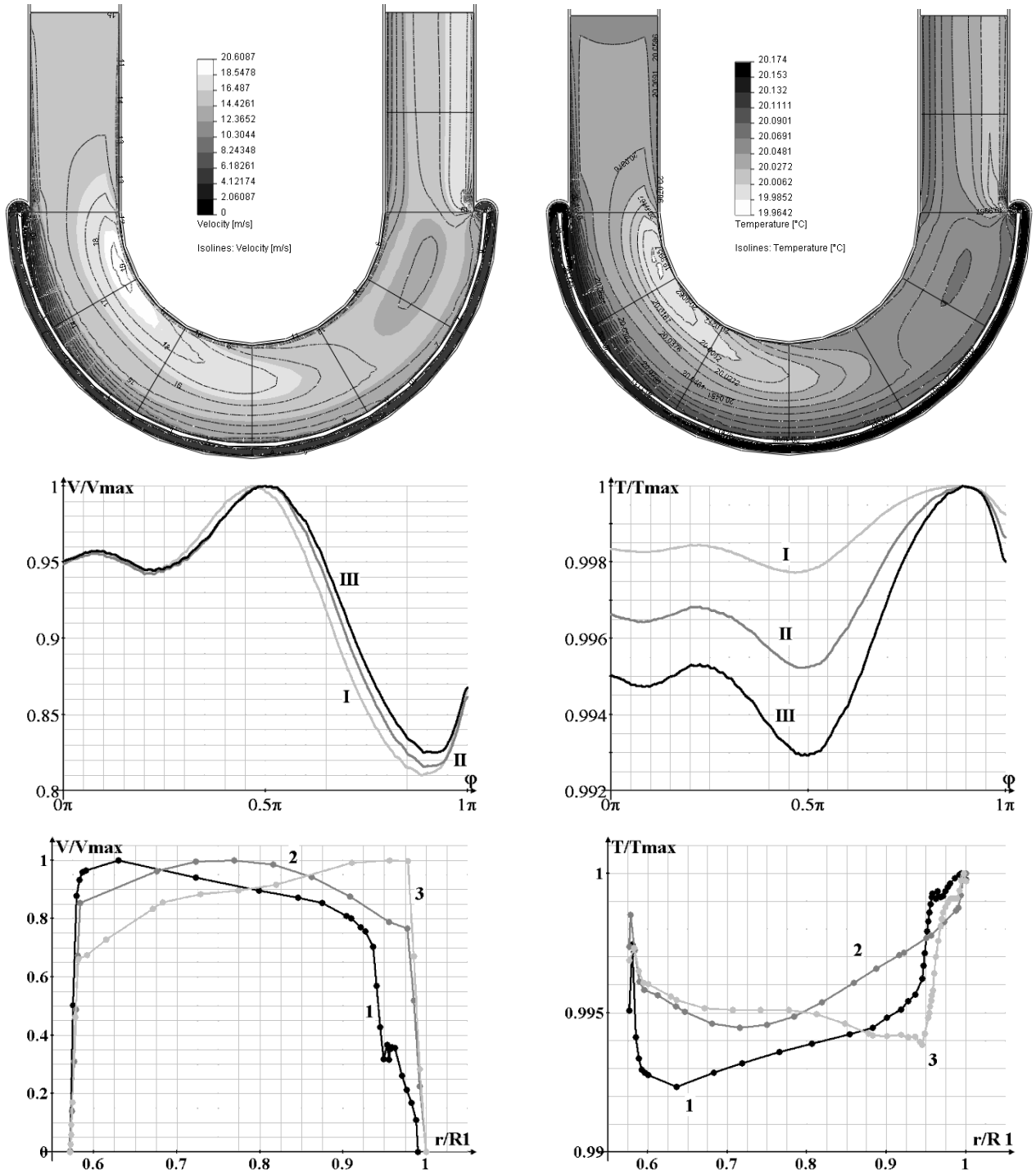


Рисунок 2.7 – Параметри в'язкого газу в криволінійному каналі з зовнішнім замкнутим контуром при $\varphi = 0$ (1), $\varphi = \pi/2$ (2), $\varphi = \pi$ (3),
 $\Delta P = 100$ Па(I), $\Delta P = 200$ Па (II), $\Delta P = 300$ Па(III)

Подібно рис. 2.5, швидкості і температури транзитних потоків з периферійним замкнутим контуром (рис. 2.7) розподіляються по перетинах на початку вхідних прямолінійних ділянок рівномірно і стратифікують після криволінійних каналів. Розшарування починається на вхідних ділянках перед входом в криволінійні канали.

Виділяються області прискорених і уповільнених течій зі зниженими та підвищеними температурами. Уповільнення течії з підвищеними температурами спостерігаються в обох циркуляційних каналах. У всіх випадках максимуми окружних швидкостей переміщуються від центру до периферії, а поблизу криволінійних границь течій відзначаються піки температур.

Загальмований центральний циркулюючий потік з підвищеною температурою зливаються і переміщуються з прискореними шарами і зниженими температурами транзитного потоку. Це ускладнює радіальні розподіли швидкостей і температур на вході в транзитний криволінійний канал. Шари транзитного потоку зі зниженими швидкостями і підвищеними температурами зливаються і перемішуються з загальмованим і нагрітим периферійним циркулюючим потоком. Тому на вході в транзитний канал не спостерігається помітних відхилень від відповідних радіальних розподілів.

2.2 Формування шару пилу в пилозбірному контейнері та видалення пилу з нього

При віддаленні опуклої стінки від увігнутої з каналу постійного перерізу утворюється дифузорно-конфузорний криволінійний канал з периферійним замкнутим контуром (рис. 2.8). Він реалізується у пиловловлюючому апараті при заповненні пилом пилозбірного контейнеру. Циркулюючий потік імітує певною мірою вільну поверхню пилу, що накопичується. При заповненні пилозбірного контейнеру пилом канал змінного перерізу перетворюється в криволінійний канал постійного перерізу і пил не вилучається з циркулюючого запиленого потоку.

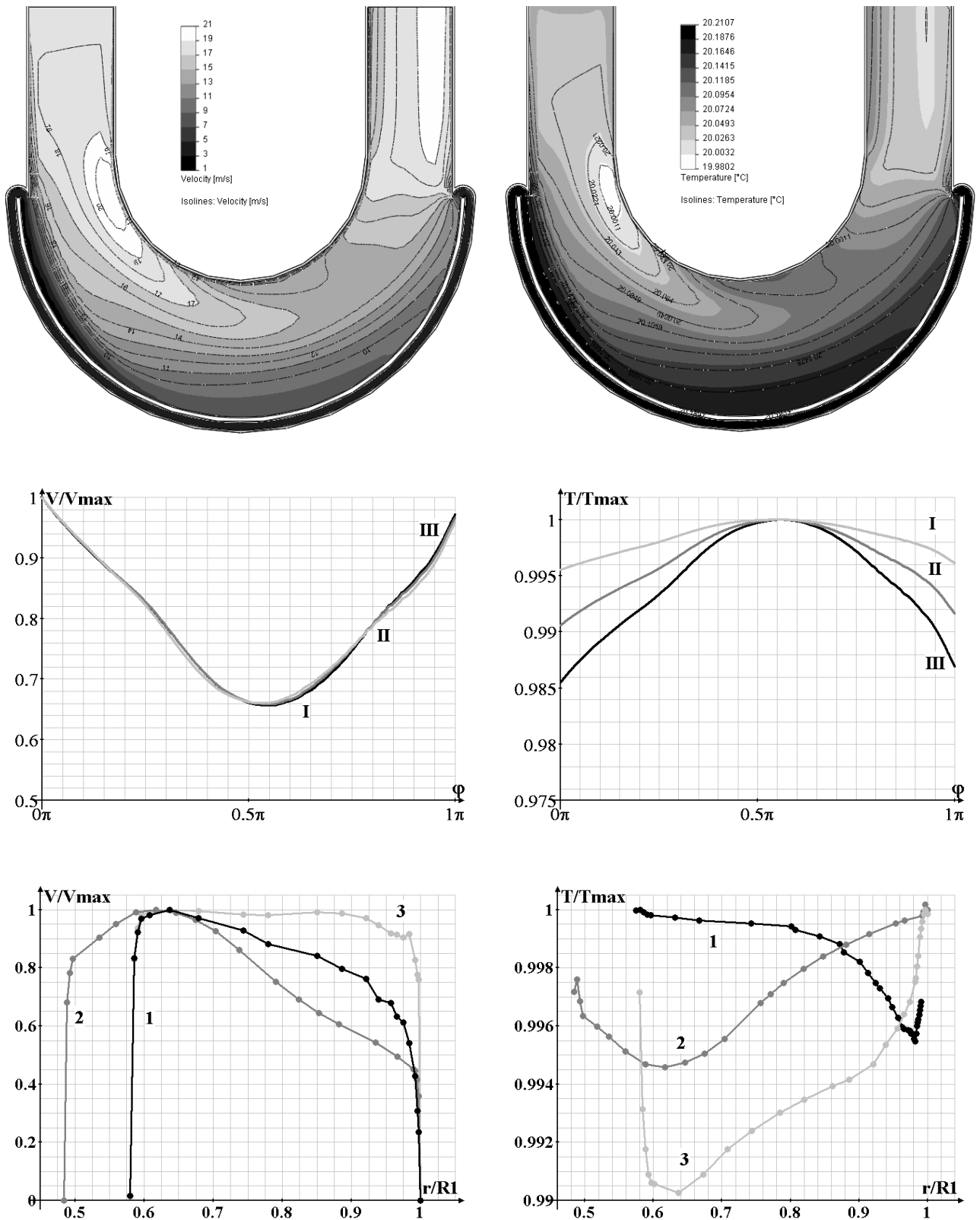


Рисунок 2.8 – Параметри в'язкого газу в криволінійному дифузорно-конфузорному каналі з зовнішнім замкнутим контуром при $\phi = 0$ (1), $\phi = \pi/2$ (2), $\phi = \pi$ (3), $\Delta P = 100$ Па (I), $\Delta P = 200$ Па (II), $\Delta P = 300$ Па (III).

Криволінійна дифузорно-конфузорна течія газу поєднує плавні зміни напрямку і площ поперечного перерізу транзитного газу з його розширенням і звуженням, і поворотом на 180° . В цілому, течія сповільнюється при куті повороту $\varphi < 0,5\pi$ і прискорюється при $\varphi > 0,5\pi$. Кінцевий результат – чітка стратифікація по температурі і швидкості в периферійній частині всього повороту і прямолінійної ділянки на виході. Вона виявляється при порівнянні відповідних полів швидкостей розглянутих параметрів.

Залежності швидкості і температури від кута повороту транзитного потоку мають по одній екстремальній точці при $100 \leq \Delta P \leq 300$ Па. Зміна в цьому інтервалі різниці тисків на вході і виході транзитного потоку не впливає на характер залежностей окружних швидкостей. Вони практично поєднані одна з одною на половині повороту ($\varphi \approx 0,5\pi$) і помітно відрізняються в дифузорній ($\varphi < 0,5\pi$) і конфузорній ($\varphi > 0,5\pi$) частинах повороту. Температури помітно підвищуються по радіусу зі збільшенням різниці тисків до 300 Па. При $\Delta P = 100$ Па температура знижується від центру до периферії.

Конфузорно-дифузорний криволінійний канал з периферійним замкнутим контуром (рис. 2.9) утворюється з каналу постійного перетину при зближенні опуклої і увігнутої стінок. Він реалізується при інтенсивному налипанні пилу на опуклу стінку каналу. Плавний поворот транзитного потоку на 180° поєднується з плавним звуженням і розширенням каналу.

Максимум окружних швидкостей і мінімум температур зміщується до середини повороту ($\varphi = 0,5\pi$). Швидкості і температури розподілені рівномірно по перерізу на всьому прямолінійній вхідній ділянці. Течія по всій довжині вихідного прямолінійної ділянки чітко стратифікується по швидкості і температурі. Поширення області високих швидкостей і низьких температур на всю глибину в перерізі з $\varphi \approx 0,5\pi$ інтенсифікує перемішування на конфузорній ділянці циркулюючого і транзитного потоків з підвищенням енерговитрат останнього.

Глибина конфузорно-дифузорного криволінійного каналу в перерізі з $\varphi = 0,5\pi$ в два рази менше, ніж на вході або на виході і нього.

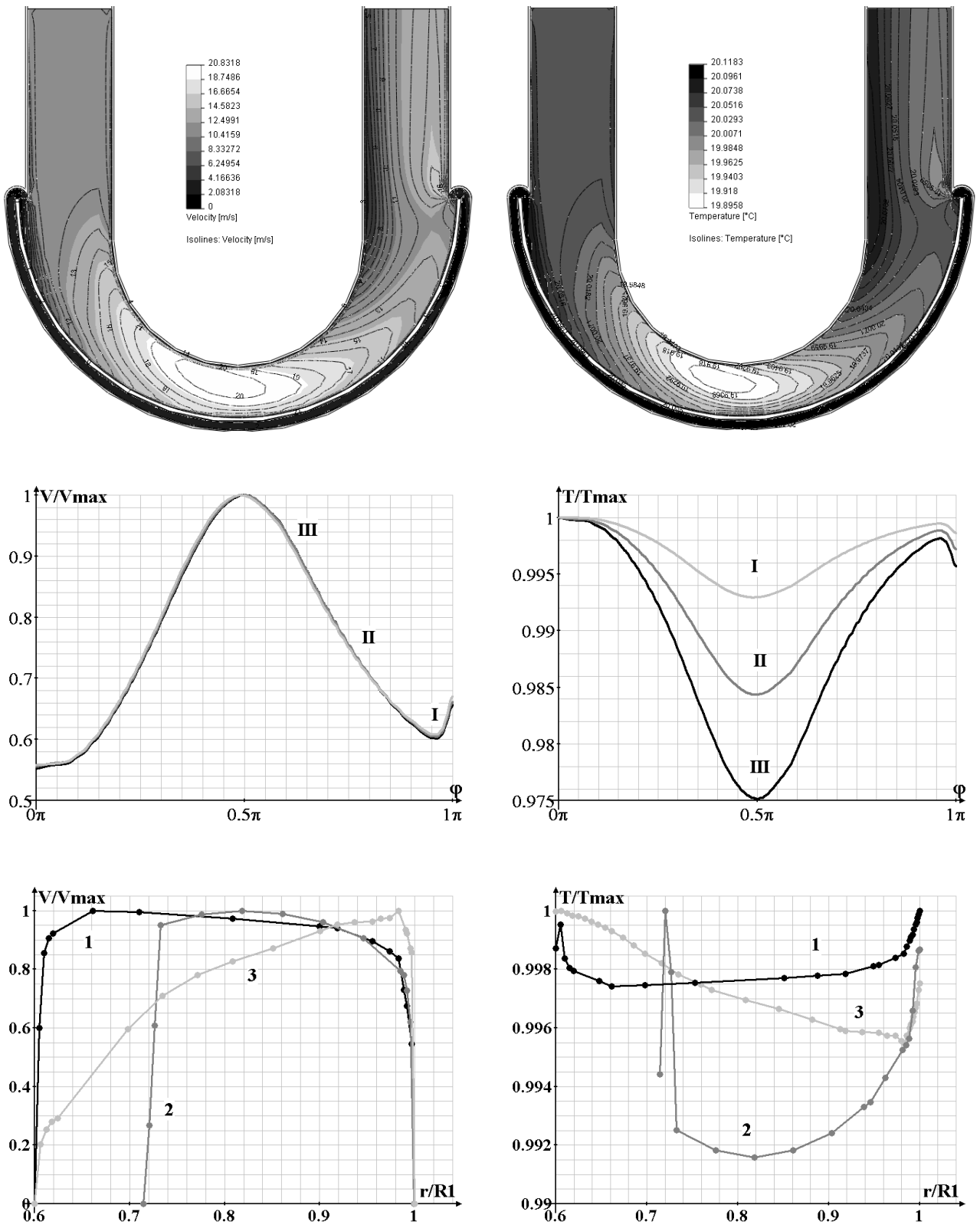


Рисунок 2.9 – Параметри стану в'язкого газу в криволінійному конфузорно-дифузорному каналі з зовнішнім замкнутим контуром при $\phi = 0$ (1), $\phi = \pi/2$ (2), $\phi = \pi$ (3), $\Delta P = 100$ Па (I), $\Delta P = 200$ Па (II), $\Delta P = 300$ Па (III).

Коефіцієнт опору каналу при $V_{cp} = 20$ м/с менше в два рази коефіцієнта опору дифузорно-конфузорного каналу з глибиною в тому ж перерізі в три рази більше зазначеної.

В обох розглянутих криволінійних каналах течія ділиться в цілому на дві частини: сповільнюється до зазначеного перетину і прискорюється після нього в дифузорно-конфузорному каналі, прискорюється і сповільнюється в конфузорно-дифузорному каналі. У першому каналі область з підвищеними швидкостями і зниженими температурами займають частину глибини каналу, у другому – практично всю глибину в перерізі з $\varphi = 0,5\pi$ при $\Delta P = 100$ Па. Зміна різниці тиску на вході і виході транзитного потоку від 100 Па до 300 Па також не впливає на залежності окружних швидкостей від кута повороту, розрахованої для площині симетрії з $z = 0,5h$. Залежності I–III суміщуються одна з одною і підтверджують прискорення течії при $\varphi < 0,5\pi$ і його уповільнення при $\varphi > 0,5\pi$. Різниця температурних залежностей від кута повороту при різних перепадах тиску свідчить про помітний вплив відцентрових сил інерції в середині повороту і його відсутності при $\varphi = 0$ і $\varphi = \pi$.

Практично рівномірні радіальний розподіл окружних швидкостей спостерігається на початку і середині повороту (залежності 1 і 2). В кінці швидкості зростають від мінімальної до максимальної величини по глибині транзитного потоку. Температура трохи підвищується по радіусу на початку повороту, в його кінці вона помітно знижується, а в середині залежність 2 має екстремальний характер. Сплески температур мають місце поблизу криволінійних стінок.

Усі розглянуті результати розрахунків справедливі для сталих течій. В цьому випадку лінії току збігаються з траєкторіями газових частинок. Тому всі представлені течії є вихровими. Обертання транзитних потоків в цілому і їх окремих областях прискорюються і сповільнюються. Вплив відцентрових сил інерції, що виникають, може бути консервативним або активним. У першому випадку посилюється стійкість криволінійної течії. В останньому вона

послаблюється, про що свідчать розглянуті коефіцієнти опору каналів при великих числах Re . Поворот транзитного потоку на 180° об'єднує розглянуті криволінійні канали з замкнутими контурами і без них. Він забезпечує переміщення максимуму окружної швидкості газової течії від центральної до периферійної криволінійної границі. Виняток становить дифузорно-конфузорна течія транзитного потоку. Найбільш повну характеристику течії отримуємо в площині симетрії $z = 0,5h$ і поперечному перерізі з $\varphi = 0,5\pi$. Поля швидкостей і температур в площині симетрії схожі між собою і відрізняються один від одного в поперечних перерізах.

Видалення вловленого пилу з пилосбірного контейнеру здійснюється за допомогою пилових затворів безперервної та періодичної дії.

2.3 Порівняння ефективності роботи циркулюючої та прямої систем пиловловлювання

Використання відцентрового нагнітача для концентрації і коагуляції дрібнодисперсного пилу скорочує втрати найцінніших фракцій подрібнених продуктів (борошна, сухого молока, цементу, вугільного пилу тощо) і знижує забруднення ними навколишнього середовища. Ці втрати і забруднення усуваються в циркулюючих системах аспірації технологічного обладнання. Висновок про перевагу системи з меншим числом структурних елементів справедливий для циркулюючих потоків з невеликою концентрацією пилу: циркулююча система ускладнює умови роботи пиловловлювача через підвищення концентрації твердих частинок, що прискорює зношення криволінійних поверхонь завитку нагнітача та його робочого колеса.

Збільшення концентрації, що надходить в робоче колесо нагнітача полідисперсної пилу, вимагає попереднього очищення запиленого потоку. Воно досягається в виносному розвантажувачі (рис. 2.10).

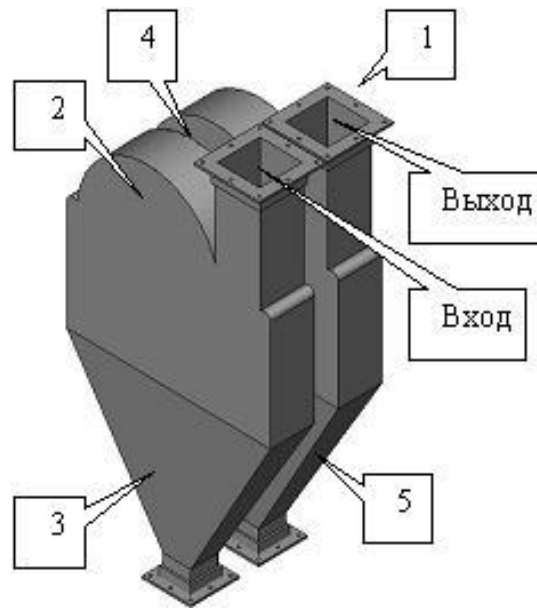


Рисунок 2.10 – Пиловловлюючий апарат з розвантажувачем: 1 – джерело пилу;
 2 – розвантажувачем; 3 – пилозбірний контейнер розвантажувача;
 4 – нагнітач; 5 – пилозбірний контейнер нагнітача

Аспіраційне повітря, що забирається з джерела пилу, надходить через тангенціальний вхідний патрубок в розвантажувач – вихрову камеру, з'єднану замкнутим контуром з пилозбірним контейнером. Звільнений від грубих фракцій пилу повітряний потік прямує в робоче колесо нагнітача, завиток якого з'єднаний замкнутим контуром з пилозбірним контейнером. Знепилене повітря повертається нагнітачем в джерело пилу. Графи еволюції пилу в циркулюючому і транзитному повітряних потоках представлені на рис. 2.11.

Коефіцієнти уловлювання визначають розподіл пилу за елементами, концентрація пилу має ймовірну інтерпретацію – густина потоку подій a_{ij} . Густина потоку подій знаходяться через коефіцієнти вловлювання η_i і дозволяють порівнювати ймовірності наповнення пилозбірних контейнер пилом альтернативних варіантів знепилюючих систем [89–90].

Значення a_{ij} залежить від фізичних, режимних, конструктивних та інших параметрів запиленних потоків. Приймаємо $a_{12} = 1$.

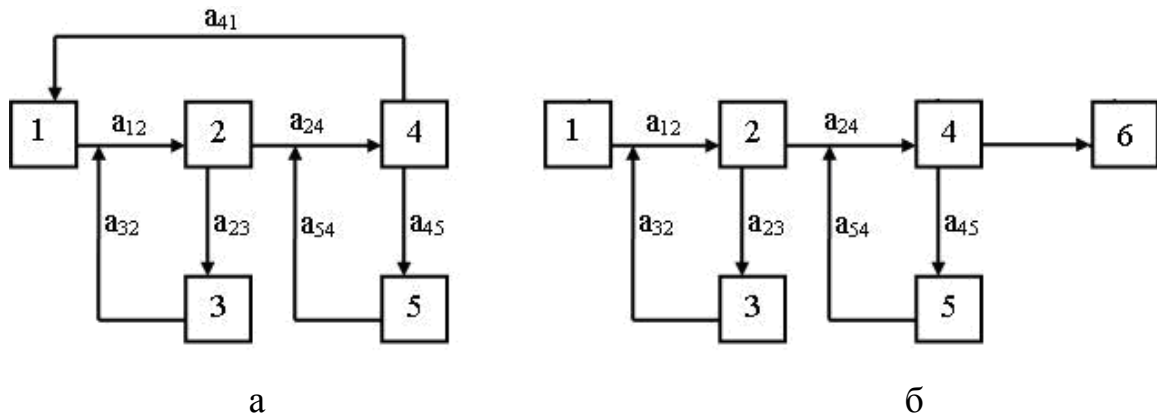


Рисунок 2.11 – Графи станів запилених потоків повітря для циркулюючої (а) і для прямої (б) пилоловлюючих систем: 1 – джерело пилу; 2 – розвантажувач; 3 – пилозбірний контейнер розвантажувача; 4 – нагнітач; 5 – пилозбірний контейнер нагнітача; 6 – навколишнє середовище

Густина потоку подій a_{ij} для прямої пилоловлюючої системи має вигляд:

$$\begin{aligned}
 a_{23} &= a_{12}(1-\eta_2)\eta_3, \\
 a_{24} &= a_{12}(1-\eta_2)(1-\eta_3), \\
 a_{45} &= a_{24}(1-\eta_4)\eta_5 = a_{12}(1-\eta_2)(1-\eta_3)(1-\eta_4)\eta_5, \\
 a_{46} &= a_{24}(1-\eta_4)(1-\eta_5) = a_{12}(1-\eta_2)(1-\eta_3)(1-\eta_4)(1-\eta_5).
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Аналогічно густина потоку подій a_{ij} для циркулюючої пилоловлюючої системи має вигляд:

$$\begin{aligned}
 a_{23} &= a_{12}(1-\eta_2)\eta_3, \\
 a_{24} &= a_{12}(1-\eta_2)(1-\eta_3), \\
 a_{45} &= a_{24}(1-\eta_4)\eta_5 = a_{12}(1-\eta_2)(1-\eta_3)(1-\eta_4)\eta_5, \\
 a_{41} &= a_{24}(1-\eta_4)(1-\eta_5) = a_{12}(1-\eta_2)(1-\eta_3)(1-\eta_4)(1-\eta_5).
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Для порівняння ефективності роботи циркулюючої та прямої пилоловлюючих систем задамо значення коефіцієнтів уловлювання: $\eta_2 = 0,01$, $\eta_3 = 0,7$, $\eta_4 = 0,02$, $\eta_5 = 0,9$. Тоді, згідно з (2.4) і (2.5), безрозмірні густини потоків приймають значення:

- для прямої пилоловлюючої системи $a_{23} = 0,7$, $a_{24} = 0,3$, $a_{45} = 0,27$, $a_{46} = 0,03$;

- для циркулюючої пилловловлюючої системи $a_{23} = 0,7$, $a_{24} = 0,3$,
 $a_{45} = 0,27$, $a_{41} = 0,03$.

Таким чином, перехідні ймовірності P_{ij} для прямої пилловловлюючої системи

$$\begin{aligned} P_{12} &= 1; \\ P_{23} &= a_{23}/(a_{23} + a_{24}) = 0,7/(0,7 + 0,3) = 0,7; \\ P_{24} &= a_{24}/(a_{23} + a_{24}) = 0,3/(0,7 + 0,3) = 0,3; \\ P_{45} &= a_{45}/(a_{45} + a_{46}) = 0,27/(0,27 + 0,03) = 0,9; \\ P_{46} &= a_{46}/(a_{45} + a_{46}) = 0,03/(0,27 + 0,03) = 0,1. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Аналогічно перехідні ймовірності P_{ij} для циркулюючої пилловловлюючої системи

$$\begin{aligned} P_{12} &= 1; \\ P_{23} &= a_{23}/(a_{23} + a_{24}) = 0,7/(0,7 + 0,3) = 0,7; \\ P_{24} &= a_{24}/(a_{23} + a_{24}) = 0,3/(0,7 + 0,3) = 0,3; \\ P_{45} &= a_{45}/(a_{45} + a_{41}) = 0,27/(0,27 + 0,03) = 0,9; \\ P_{41} &= a_{41}/(a_{45} + a_{41}) = 0,03/(0,27 + 0,03) = 0,1. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Враховуючи (2.6), система рівнянь Колмогорова для прямої пилловловлюючої системи приймає вигляд (t – час, P_i – ймовірність стану елемента системи)

$$\begin{cases} dP_1/dt = -P_{12}P_1 = -P_1; \\ dP_2/dt = P_{12}P_1 - P_{23}P_2 - P_{24}P_2 = P_1 - P_2; \\ dP_3/dt = P_{23}P_2 = 0,7P_2; \\ dP_4/dt = P_{24}P_2 - P_{46}P_4 - P_{45}P_4 = 0,3P_2 - P_4; \\ dP_5/dt = P_{45}P_4 = 0,9P_4; \\ dP_6/dt = P_{46}P_4 = 0,1P_4. \end{cases} \quad (2.8)$$

Аналогічно, враховуючи (2.7), система рівнянь Колмогорова для циркулюючої пилловловлюючої системи приймає вигляд

$$\begin{cases} dP_1/dt = -P_{12}P_1 + P_{41}P_4 = -P_1 + 0,1P_4; \\ dP_2/dt = P_{12}P_1 - P_{23}P_2 - P_{24}P_2 = P_1 - P_2; \\ dP_3/dt = P_{23}P_2 = 0,7P_2; \\ dP_4/dt = P_{24}P_2 - P_{41}P_4 - P_{45}P_4 = 0,3P_2 - P_4; \\ dP_5/dt = P_{45}P_4 = 0,9P_4. \end{cases} \quad (2.9)$$

Характеристичні корені матриці системи рівнянь (2.8)

$$R_1 = 0, R_2 = 0, R_3 = 0, R_4 = -1, R_5 = -1, R_6 = -1,$$

тоді імовірність стану прямої піловловлюючої системи має вигляд

$$P_k(t) = (a_{k1} + a_{k2}t + a_{k3}t^2) + (b_{k1} + b_{k2}t + b_{k3}t^2)e^{-t}.$$

Характеристичні корені матриці системи рівнянь (2.9)

$$R_1 = 0, R_2 = 0, R_3 = -1,1554 + 0,2691i, R_4 = -1,1554 - 0,2691i, R_5 = -0,6893,$$

тоді імовірність стану циркулюючої піловловлюючої системи має вигляд

$$P_k(t) = a_{k1} + a_{k2}t + b_{k1}e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t}(c_{k1} \cos(0,2691t) + d_{k1} \sin(0,2691t))$$

Методом невизначених коефіцієнтів отримаємо загальне рішення системи рівнянь для прямої піловловлюючої системи

$$\begin{aligned} P_1(t) &= (b_{11})e^{-t}, \\ P_2(t) &= (b_{21} + b_{11}t)e^{-t}, \\ P_3(t) &= a_{31} - 0,7(b_{11} + b_{21} + b_{11}t)e^{-t}, \\ P_4(t) &= (b_{41} + 0,3b_{21}t + 0,15b_{11}t^2)e^{-t}, \\ P_5(t) &= a_{51} - (0,27(b_{11} + b_{21}) + 0,9b_{41} + 0,27(b_{11} + b_{21})t + 0,135b_{11}t^2)e^{-t}, \\ P_6(t) &= a_{61} - (0,03(b_{11} + b_{21}) + 0,1b_{41} + 0,03(b_{11} + b_{21})t + 0,015b_{11}t^2)e^{-t}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Аналогічно отримаємо загальне рішення системи рівнянь для циркулюючої піловловлюючої системи

$$\begin{aligned} P_1(t) &= 0,3219b_4e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t}((-0,2786d_4 - 0,1609c_4)\cos(0,2691t) + \\ &+ (0,2787c_4 - 0,1609d_4)\sin(0,2691t)); \\ P_2(t) &= 1,036b_4e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t}((0,8968d_4 - 0,5176c_4)\cos(0,2691t) + \\ &+ (-0,8968c_4 - 0,5174d_4)\sin(0,2691t)); \\ P_3(t) &= a_3 - 1,0521b_4e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t}((-0,4462d_4 + 0,4175c_4)\cos(0,2691t) + \\ &+ (0,4461c_4 + 0,4174d_4)\sin(0,2691t)); \\ P_4(t) &= b_4e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t}(c_4 \cos(0,2691t) + d_4 \sin(0,2691t)); \\ P_5(t) &= 1 - a_3 - 1,3058b_4e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t}((-0,172d_4 - 0,739c_4)\cos(0,2691t) + \\ &+ (0,172c_4 - 0,7391d_4)\sin(0,2691t)). \end{aligned} \quad (2.11)$$

У початковий момент часу ($t = 0$) всі пилові частинки знаходяться в джерелі ($P_1 = 1$), тобто $P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = 0$, тоді для прямої відкритої піловловлюючої системи імовірності стану (2.10) будуть наступні:

$$\begin{aligned}
 P_1(t) &= e^{-t}; \\
 P_2(t) &= te^{-t}; \\
 P_3(t) &= 0,7(1 - e^{-t} - te^{-t}) \\
 P_4(t) &= 0,15t^2 e^{-t}; \\
 P_5(t) &= 0,27(1 - e^{-t} - te^{-t} - 0,5t^2 e^{-t}); \\
 P_6(t) &= 0,03(1 - e^{-t} - te^{-t} - 0,5t^2 e^{-t}).
 \end{aligned}$$

Аналогічно для циркулюючої пиловловлюючої системи знаходимо імовірності стану (2.11):

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 0,3334e^{-0,6893} + e^{-1,1554} (0,6666 \cos(0,2691t) + 0,0018 \sin(0,2691t)); \\
 P_2 &= 1,0731e^{-0,6893} + e^{-1,1554} (-1,073 \cos(0,2691t) + 1,8573 \sin(0,2691t)); \\
 P_3 &= 0,7215 - 1,0898e^{-0,6893} + e^{-1,1554} (0,3682 \cos(0,2691t) - 1,211 \sin(0,2691t)); \\
 P_4 &= 1,03585e^{-0,6893} + e^{-1,1554} (-1,0358 \cos(0,2691t) - 1,7943 \sin(0,2691t)); \\
 P_5 &= 0,2785 - 1,3526e^{-0,6893} + e^{-1,1554} (1,0741 \cos(0,2691t) + 1,148 \sin(0,2691t)).
 \end{aligned}$$

Рішення (2.10) і (2.11) дає можливість записати формули накопичення пилу в пиловловлюючій системі та порівняти ефективність прямої і циркулюючої систем (рис. 2.12):

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=2}^4 P_i^{\text{прям}} &= 0,97 - 0,97e^{-t} + 0,03te^{-t} + 0,015t^2 e^{-t}; \\
 \sum_{i=2}^4 P_i^{\text{цирк}} &= 1 - 0,3335e^{-0,6893t} + 0,6665e^{-1,1554t} \cos(0,2691t).
 \end{aligned}$$

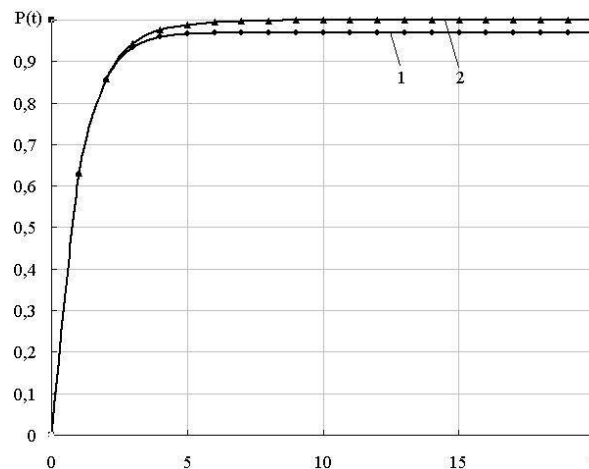


Рисунок 2.12 – Ймовірність накопичення пилу у прямої (1) і циркулюючої (2) пиловловлюючій системі

Різниця між ймовірностями накопичення пилу у прямоточній системі (1) і циркулюючій системі (2) на рис. 2.12 – є тим дрібнодисперсним пилом, який при роботі пиловловлюючої системи за прямоточною схемою викидається в атмосферне повітря.

Ймовірності знаходження певної частинки пилу в одному з елементів прямоточної або циркулюючої пиловловлюючої системи наведені на рис. 2.13.

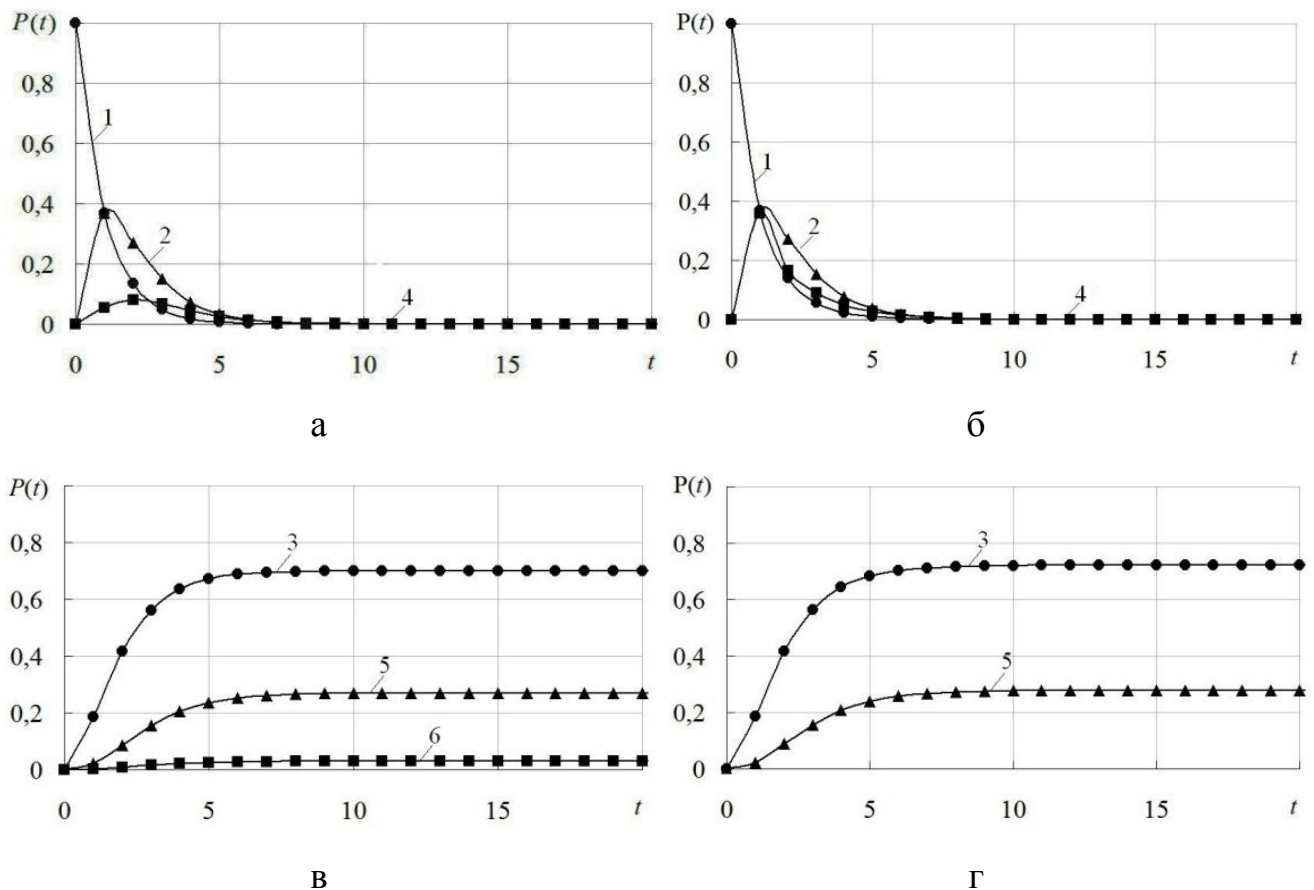


Рисунок 2.13 – Ймовірність станів прямоточної (а, в) та циркулюючої (б, г) систем пиловловлювання: 1 – джерело пилу P_1 ; 2 – розвантажувач P_2 ; 3 – пилозбірний контейнер розвантажувача P_3 ; 4 – нагнітач P_4 ; 5 – пилозбірний контейнер нагнітача P_5 ; 6 – навколишнє середовище P_6 ; t – час; P_i – ймовірність стану елемента системи

Для практичних висновків замість нескінченного часу зручно обчислювати час, необхідний для видалення пилу з її джерела або час,

необхідний для заповнення пилом пилозбірного контейнеру (табл. 2.1–2.3). Так, для заповнення пилозбірного контейнеру нагнітача пилом на 25 % у відкритій системі пиловловлювання потрібно 5,7505 одиниць часу, а для замкнутої системи – 5,4929 одиниць часу.

Таблиця 2.1 – Час вилучення пилу з джерела пилу, од. часу

$P, \%$	10	20	30	40	50
Открытая система	2,3026	1,6094	1,204	0,9163	0,6931
Замкнутая система	2,3678	1,6315	1,2133	0,9206	0,6951

Таблиця 2.2 – Час заповнення пилом пилозбірного контейнеру розвантажувача, од. часу

$P, \%$	10	20	30	40	50	60
Прямоточна система	0,6624	1,0584	1,4596	1,9183	2,5077	3,4356
Циркулююча система	0,6630	1,0586	1,4588	1,9143	2,4931	3,3711

Таблиця 2.3 – Час заповнення пилом пиловловлюючої системи, од. часу

$P, \%$	80	85	90	95
Прямоточна система	1,6443	1,9618	2,4448	3,5235
Циркулююча система	1,631	1,9328	2,3672	3,1411

Таким чином, при роботі за відкритою схемою відбувається більш швидко вилучення пилу з її джерела, що можна пояснити відсутністю рециркуляції невловленого пилу, але при цьому відбувається викид пилу в навколишнє середовище. Пилозбірний контейнер розвантажувача в обох системах заповнюється швидше, ніж пилозбірний контейнер нагнітача. Для ймовірності накопичення пилу 0,95 в замкнутій системі пиловловлювання необхідно затратити трохи менше часу, що допоможе скоротити споживання енергоресурсів.

Основні результати досліджень розділу 2 опубліковані в [89, 91–100].

2.4 Висновки до розділу 2

1. Запропоновано конструкцію пиловловлюючого апарату з використанням відцентрового нагнітача для концентрації, коагуляції та вилучення з пилогазового потоку дрібнодисперсного пилу. Конструкція пиловловлюючого апарату отримана шляхом внесення змін до схеми промислового димососа-пиловловлювача з якої виключено циклон, а нагнітач поєднано з пилозбірним контейнером. Доведено підвищення ефективності обезпилення циркулюючого потоку при скороченні кількості структурних елементів системи аспірації.

2. За результатами моделювання аеродинаміки конфузорно-дифузорного криволінійного каналу із замкнутим контуром встановлено, що за рахунок інтенсивного прискорення течії потоку до середини повороту і таке ж інтенсивного його уповільнення у другій частині повороту, утворюється «застійна зона», яка обумовлює більш ефективну сепарацію пилу порівняно з каналом постійного перерізу.

3. На основі аналізу графів стану запиленого потоку повітря у системах знепилювання встановлено більшу ефективність циркулюючих систем порівняно з прямоточними, що досягається за рахунок зміни фракційного складу пилу внаслідок його коагуляції у нагнітачі.

РОЗДІЛ 3

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПИЛОВЛОВЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ

3.1 Експериментальний стенд

Для перевірки висновків зроблених у розділі 2 у відповідності до рис. 2.1. був змонтований дослідний стенд – пиловловлююча система з трьома структурними елементами (рис. 3.1а), до якої можна додати розвантажувач (рис. 3.1б). Розвантажувач і пиловловлювач геометрично подібні (табл. 3.1), їх характеристики та характеристики робочого колеса наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Характеристики розвантажувача і пиловловлювача

Параметр	Значення
Висота загальна, мм	290
Глибина конічної частини пило збірного контейнера, мм	100
Ширина, мм	160
Товщина, мм	32
Ширина з'єднувальної щілини, мм	5
Діаметр робочої напівобичайки, мм	132
Діаметр з'єднувальної напівобичайки, мм.	10

Таблиця 3.2 – Характеристики робочого колеса пиловловлювача

Параметр	Значення
Діаметр робочого колеса, мм	120
Кількість робочих лопаток, шт.	6
Ширина робочих лопаток, мм	17
Конструктивний кут робочих лопаток, градусів	38, 142
Кут нахилу робочих лопаток до диску робочого колеса, градусів	90

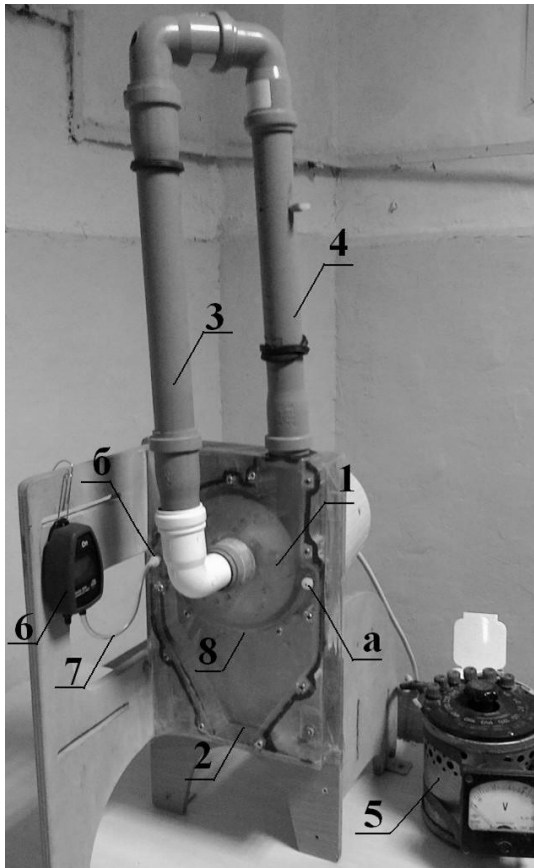


Рисунок 3.1а – Експериментальний
стенд: 1 – робоче колесо;
2 – бункер пиловловлювача;
3 – вхідний патрубок; 4 – вихідний
патрубок; 5 – трансформатор
напруги; 6 – дифманометр
testo-506; 7 – з'єднувальний шланг;
8 – напівобичайка; а, б – точки
вимірювання динамічного і
статичного тиску в бункері

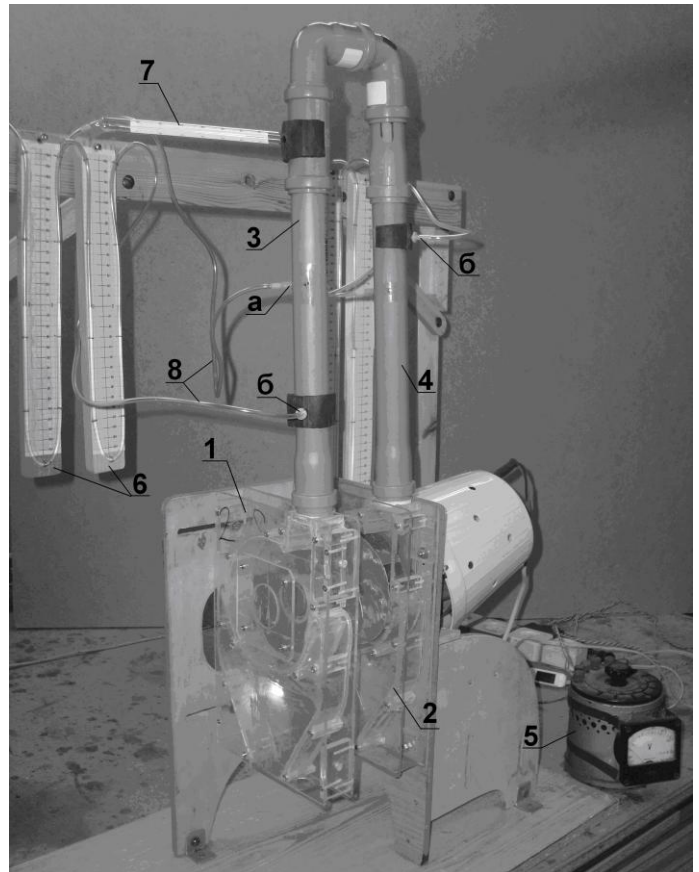


Рисунок 3.1 б – Експериментальний
стенд з розвантажувачем:
1 – розвантажувач; 2 – пиловловлювач;
3 – вхідний патрубок; 4 – вихідний
патрубок; 5 – трансформатор напруги;
6 – U-манометр; 7 – термометр;
8 – з'єднувальні шланги; а – точка
вимірювання статичного тиску;
б – точка вимірювання тиску

Вхід розвантажувача і вихід пиловловлювача з'єднані між собою патрубком круглого перерізу з зовнішнім діаметром 32 мм.

3.2 Аеродинамічний експеримент

3.2.1 Послідовність проведення аеродинамічних вимірювань

Експериментальне дослідження відцентрового нагнітача та побудову його характеристики $P = f(Q)$ проводили за методикою, описаною в [101]. При повністю закритому шибері вмикали нагнітач і записували покази статичного і повного тисків на вхідному і вихідному патрубку нагнітача (потужність холостого ходу). Повністю відкривали шибер і записували покази дифманометрів при найбільшій подачі. Експеримент повторювали прикриваючи шибер на $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$. Під час експерименту вимірювали барометричний тиск і температуру повітря.

Експериментальне визначення швидкостей в перерізі круглої труби здійснювалося за методикою, описаною в [101]. У вихідному патрубку дослідного стенду по радіусу були обрані сім мірних точок так, щоб їх розташування вздовж радіусу згущувалася до стінок. У кожній мірній точці по діаметру перерізу за допомогою пневмометричного зонду та манометру testo-506 вимірювався динамічний тиск. Після кожного переміщення трубки робилася деяка витримка, необхідна для стабілізації показів приладу. На вході та на виході з експериментальної установки манометром testo-506 також вимірювався статичний тиск на стінці. Одночасно за допомогою термометра вимірювалася температура повітря. Необхідна витрата встановлювалася за допомогою лабораторного трансформатора напруги та підтримувалася при замірах постійною.

При обробці результатів вимірювань були розраховані місцеві (локальні) швидкості

$$v_i = \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}}{\rho_{\text{в}}}}, \quad (3.1)$$

де $P_{\text{дин}}$ – динамічний тиск, Па;

$\rho_{\text{в}}$ – густина повітря, г/см³.

Густина повітря розраховувалася за формулою

$$\rho_e = 1,293 \frac{273}{273 + t}, \quad (3.2)$$

де t – температура повітря під час вимірювань, $^{\circ}\text{C}$.

Епюри швидкостей були побудовані у відносних координатах r/r_0 і v/v_{\max} (де r_0 – радіус мірного перерізу, r_{\max} – швидкість на осі).

Оскільки неможливо показати в масштабі епюри як змінюється швидкість у безпосередній близькості до стінки, епюру швидкостей плавно закінчували на стінці, де умовно приймали, що швидкість дорівнює 0,5 від швидкості на осі [101]. Потім перевірялась симетрія епюри відносно осі труби.

Визначено відношення середньої швидкості по перерізу до швидкості на осі. З літературних джерел можна встановити таке співвідношення максимальної швидкості до середньої швидкості [102]

$$\frac{u_{\max}}{v} = 1 + 1,3\sqrt{\lambda}, \quad (3.3)$$

де u_{\max} – максимальна швидкість, м/с;

v – середня швидкість, м/с;

λ – еквівалентна шорсткість труби.

Гідравлічний коефіцієнт тертя (коефіцієнт Дарсі) розраховувався за формулою Шифрінсона

$$\lambda = 0,11(\hat{\kappa}_e/d)^{0,25},$$

де $\hat{\kappa}_e$ – еквівалентна шорсткість, мм;

d – діаметр труби, мм.

На експериментальному стенді використовується труба ПВХ (полівінілхлоридна) діаметром 32 мм. За даними [102] еквівалентна шорсткість для труб малих діаметрів складає 0,005 мм. Таким чином, коефіцієнт Дарсі складає

$$\lambda = 0,11(0,005/28,4)^{0,25} = 0,0127.$$

Тоді співвідношення максимальної швидкості до середньої швидкості становить

$$\frac{u_{\max}}{v} = 1 + 1,3\sqrt{0,0127} = 1,15.$$

Витрата повітря ($\text{м}^3/\text{с}$) через обраний переріз визначалася за формулою

$$Q = Av_i, \quad (3.4)$$

де v – середня швидкість газу в повітропроводі, $\text{м}/\text{с}$;

A – площа перерізу повітропроводу, м^2 .

Коефіцієнт місцевого опору ξ визначався за формулою

$$\xi = \frac{2\Delta P}{\rho_v v^2}, \quad (3.5)$$

де ΔP – різниця тисків на вході та виході системи, Па ;

ρ_v – густина повітря, $\text{г}/\text{см}^3$;

v – середня швидкість газу в повітропроводі, $\text{м}/\text{с}$.

Попередньо виміряв середню температуру повітря під час експерименту і відповідну кінематичну в'язкість, розраховувалося число Рейнольдса

$$\text{Re} = vd/\nu, \quad (3.6)$$

де v – середня швидкість газу в повітропроводі, $\text{м}/\text{с}$;

d – діаметр труби, м ;

ν – кінематична в'язкість повітря, $\text{м}^2/\text{с}$.

Отримані в результаті дослідження значення ξ и Re були нанесені на графік.

Для порівняльного аналізу змінювалися наступні параметри експериментального стенду: витрата повітря, відстань між розвантажувачем і пиловловлювачем, орієнтація закручування потоку повітря в системі розвантажувач–пиловловлювач. При роботі стенду за циркулюючою схемою розвантажувач є джерелом пилу складної конструкції.

3.2.2 Оцінка похибок результатів вимірювань [101]

Похибка вимірювання є відхиленням результату вимірювання від дійсного значення величини. Розрізняють похибки абсолютні та відносні. Абсолютна похибка, виражається в одиницях вимірюваної величини:

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x, \quad (3.7)$$

де x – істинне значення.

Відносна похибка – відношення абсолютної похибки до істинного значення фізичної величини:

$$\delta = 100 \Delta x / x. \quad (3.8)$$

Дійсне значення вимірюваної величини невідоме, тому практично можна знайти лише наближену оцінку похибки вимірювання. Похибки вимірювань прийнято поділяти на систематичні, випадкові і грубі (промахи або брак).

Систематичні похибки викликаються чинниками, що діють однаковим чином при багаторазовому повторенні одних і тих самих вимірювань. Наприклад, похибки, що виникають від несправності приладу, можуть бути визначені дослідним шляхом і виключені введенням відповідних поправок.

Випадкові похибки – складова похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином при повторних вимірюваннях одного й того ж об'єкта через низку причин, що не піддаються обліку. Випадкові похибки виключити неможливо, проте, вплив їх можна зменшити за рахунок багаторазових повторених вимірювань однієї і тієї ж величини і грамотною обробкою експериментальних даних. Вплив випадкових похибок характеризується величиною розсіювання результатів вимірювань у серії.

Груба похибка – похибка вимірювання, яка істотно перевищує очікування при даних умовах. Результати, що містять грубу похибку повинні бути виключені як недостовірні. Відсів таких показів проводиться за спеціальною методикою.

Для оцінки можливої похибки вимірювань треба знати закономірність появи випадкових похибок. При великому числі вимірювань їх значення, як правило, розподіляються за законом Гауса (так званий нормальний закон розподілу). Криві нормального розподілу симетричні осі ординат і мають єдиний максимум на ній. Завдання зводиться до того, як на підставі отриманої групи результатів спостережень оцінити справжнє значення, тобто знайти результат, і як оцінити його точність. Для нормального закону розподілу похибок найбільш ймовірним значенням вимірюваної величини є математичне очікування, яке визначається як середнє арифметичне значення:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \approx X, \quad (3.9)$$

де X – істинне значення вимірюваної величини x .

Різницю $x_i - X = x_i - \bar{x}$ називають залишковою похибкою часткових вимірювань. Розсіювання значень випадкової величини навколо її математичного очікування характеризується дисперсією:

$$S_{n=1}^2 = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n-1} = \sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (3.10)$$

Корінь квадратний з дисперсії називають середнім квадратичним відхиленням (СКВ) і позначають σ , тобто $\sigma = \sqrt{S^2} = S$.

Під довірчим інтервалом розуміють інтервал, в якому із заданою ймовірністю знаходять справжнє значення вимірюваної величини. Наприклад, для ймовірності $p = 0,95$ довірчим інтервал становить $\pm 2 \sigma$ (ймовірності 0,95 вважається достатньою для технічних вимірювань).

Поява грубих похибок (промахів, браку) при проведенні дослідів може істотно спотворити результати дослідів і зробити хибні висновки. Тому на першому етапі аналізу експериментальних даних (незалежно від мети експерименту) необхідно, користуючись спеціальними математичними методами, виключити грубі похибки.

Статистичний критерій виявлення грубих похибок заснований на пропозиції про те, що аналізована група даних розподілена по нормальному

закону Гауса. У ряді вимірювань сумнівні може викликати або найбільший (x_{max}), або найменший (x_{min}) результат. Тому для виявлення промаху необхідно обчислити величини β_1 і β_2 :

$$\beta_1 = \frac{x_{max} - \bar{x}}{\sigma_n}; \quad \beta_2 = \frac{\bar{x} - x_{min}}{\sigma_n}, \quad (3.11)$$

де \bar{x} – середнє арифметичне з серії паралельних дослідів;

σ – середнє квадратичне відхилення серії паралельних дослідів

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (3.12)$$

де n – число експериментальних точок в серії.

Отримані значення β_1 і β_2 порівнюються з теоретичними максимальними значенням β_{max} (табл. 3.3) при вибраній довірчій імовірності. У технічних розрахунках достатньою вважається довірна ймовірність $p = 0,95$.

Таблиця 3.3 – Критерій розкиду β_{max}

n	3	4	5	6	7	8
β_{max}	1,412	1,689	1,869	1,996	2,093	2,172

Якщо обчислене значення β_1 (або β_2) виявиться більше β_{max} , то x_{max} (або x_{min}) є грубою помилкою і повинно бути виключене з подальшої обробки. Якщо після виключення одного (або двох) значення знову викликає сумнів якась точка, то описаний порядок дій може бути повторений.

Для аналізу серії паралельних дослідів використовували значення отримані на дослідному стенді – динамічний тиск виміряний у мірних точках за радіусом вихідного патрубку (табл. 3.4).

Теоретичне максимальне значення $\beta_{max} = 1,412$. Таким чином грубих помилок (промахів, браку) не виявлено.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку похибки прямого вимірювання динамічного тиску

Параметр	1 серія	2 серія	3 серія	4 серія	5 серія	6 серія	7 серія
1	2	3	4	5	6	7	8
2 мм від стінки							
Математичне очікування	691,333	569,000	473,000	376,667	290,667	191,667	108,333
Дисперсія	9,333	16,000	3,000	21,333	5,333	6,333	0,333
СКВ	3,055	4,000	1,732	4,619	2,309	2,517	0,577
β_1	0,873	1,000	1,155	1,155	0,577	0,927	1,155
β_2	1,091	1,000	0,577	0,577	1,155	1,060	0,577
6,2 мм від стінки							
Математичне очікування	844,333	702,333	580,667	465,000	358,333	237,333	136,667
Дисперсія	4,333	6,333	8,333	1,000	26,333	16,333	6,333
СКВ	2,082	2,517	2,887	1,000	5,132	4,041	2,517
β_1	0,801	1,060	1,155	1,000	1,104	0,907	0,927
β_2	1,121	0,927	0,577	1,000	0,844	1,072	1,060
10,2 мм від стінки							
Математичне очікування	982,667	837,667	676,000	542,667	418,667	288,000	170,333
Дисперсія	357,333	208,333	97,000	37,333	32,333	9,000	156,333
СКВ	18,903	14,434	9,849	6,110	5,686	3,000	12,503
β_1	1,129	0,577	1,117	0,873	1,114	1,000	0,693
β_2	0,776	1,155	0,812	1,091	0,821	1,000	1,146
14,02 мм від стінки (центр)							
Математичне очікування	1030,333	856,667	718,667	568,667	443,333	298,667	175,667

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8
Дисперсія	772,333	608,333	101,333	9,333	22,333	122,333	32,333
СКВ	27,791	24,664	10,066	3,055	4,726	11,060	5,686
β_1	1,139	1,149	0,927	1,091	0,776	0,934	1,114
β_2	0,732	0,676	1,060	0,873	1,129	1,055	0,821
18,2 мм від стінки							
Математичне очікування	820,333	697,333	573,667	466,333	356,333	230,667	135,000
Дисперсія	37,333	25,333	146,333	82,333	20,333	56,333	57,000
СКВ	6,110	5,033	12,097	9,074	4,509	7,506	7,550
β_1	1,091	0,927	0,772	1,065	1,035	0,577	0,927
β_2	0,873	1,060	1,130	0,918	0,961	1,155	1,060
22,2 мм від стінки							
Математичне очікування	719,667	618,667	517,667	403,000	315,333	212,000	121,333
Дисперсія	10,333	25,333	22,333	103,000	37,333	7,000	0,333
СКВ	3,215	5,033	4,726	10,149	6,110	2,646	0,577
β_1	0,726	1,060	1,129	0,887	1,091	1,134	1,155
β_2	1,141	0,927	0,776	1,084	0,873	0,756	0,577
26,4 мм від стінки							
Математичне очікування	580,333	494,333	408,000	327,667	251,333	168,667	101,000
Дисперсія	234,333	142,333	217,000	72,333	52,333	9,333	3,000
СКВ	15,308	11,930	14,731	8,505	7,234	3,055	1,732
β_1	1,154	0,810	0,882	0,980	0,645	1,091	1,155
β_2	0,610	1,118	1,086	1,019	1,152	0,873	0,577

При проведенні дослідних робіт, пов'язаних з гідромеханічними процесами, величин використовують також непрямі вимірювання, при цьому,

як правило, залежність між вимірюваними величинами і вимірюваними аргументами нелінійна. Наприклад, визначається величина R , пов'язана з величинами A , B і C функціональної залежністю, що має вигляд:

$$R = \kappa A^m B^n C^p, \quad (3.13)$$

де κ – константа; m , n , p – показники ступеня.

СКВ величина R для цього типового випадку оцінюється за співвідношенням.

$$\sigma_R = \sqrt{m^2 \sigma_A^2 + n^2 \sigma_B^2 + p^2 \sigma_C^2}, \quad (3.14)$$

де σ_A , σ_B и σ_C – СКВ величини A , B , C .

Для попередньої оцінки СКВ можна скористатися даними табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Наближене значення СКВ

Вимірювана величина	Метод і засоби вимірювання	Позначення	СКО, %
Витрата	Відградуваний звужуючий пристрій	σ_Q	1,8
Густина	Для води, якщо взяти $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$	$\sigma_{\rho ж}$	0,5
Густина	При використанні формул і вимірюванні температури з похибкою $\pm 1\%$	$\sigma_{\rho в}$	0,07
В'язкість	При використанні розрахункових формул	σ_{μ}	0,07

За результатами дослідів визначимо середню швидкість потоку на виході із системи, розрахункова формула

$$v = \sqrt{\frac{2P_g}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{ж} \cdot g \cdot h_g}{\rho_v}}, \quad (3.15)$$

де $\rho_{ж}$ – густина рідини;

ρ_v — густина повітря;

g – прискорення вільного падіння.

Структура формули (3.15) аналогічна формулі (3.13), тому для знаходження СКО використовуємо (3.14)

$$\sigma_v = \sqrt{2g} * \sqrt{0,5^2 \sigma_{p,жс}^2 + 0,5^2 * \sigma_h^2 + 0,5^2 * \sigma_{\rho_в}^2} \quad (3.16)$$

Підставимо всі значення в (3.16) і отримаємо σ_v (табл. 3.6)

Таблиця 3.6 – Середнє квадратичне відхилення для середньої швидкості на виході із системи

Параметр	1 серія	2 серія	3 серія	4 серія	5 серія	6 серія	7 серія
<i>L</i> = 107, односпрямоване закручування, відкрита система							
СКВ	1,268	2,098	2,098	1,268	0,825	0,548	0,437
<i>L</i> = 107, односпрямоване закручування, закрита система							
СКВ	0,576	1,683	1,130	0,687	1,240	0,687	0,687
<i>L</i> = 107, різноспрямоване закручування, відкрита система							
СКВ	4,424	4,424	4,424	1,656	1,822	1,102	0,770
<i>L</i> = 107, різноспрямоване закручування, закрита система							
СКВ	0,354	0,723	1,462	0,723	1,831	0,723	0,723

З табл. 3.6 максимальне значення $\sigma_v = 2,098$ %. Визначимо граничну похибку вимірювань, імовірність якої не перевищує $p = 0,95$. При цьому $\delta = 2 \cdot \sigma$, тобто $\delta_v = 2 \cdot \sigma_v = 2 \cdot 2,098 = 4,196$.

3.2.3 Перевірка відтворюваності вимірювань

Після виключення промахів результати дослідів перевіряють на відтворюваність за допомогою статистичних критеріїв Кохрена, або Бартлетта в залежності від результатів первинного аналізу. Якщо аналіз показав, що грубих похибок (промахів) в досліді немає, то використовують критерій Кохрена –

відношення максимальної дисперсії, отриманої в досліді (S_{max}^2), до суми всіх дисперсій ($\sum_{i=1}^n S_i^2$)

$$G_p = S_{max}^2 / \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (3.17)$$

Значення дисперсій розраховують за формулою (3.10). Отримане з (3.17) розрахункове значення критерію Кохрена необхідно порівняти з табличним (G_m) (табл. 3.7). Якщо $G_p < G_m$, то порівнювані дисперсії можуть вважатися однорідними і відноситися до однієї сукупності, досліді відтворювані.

Таблиця 3.7 – Значення критерію Кохрена при $p = 0,95$ (k – загальна кількість оцінок дисперсій; f – число ступенів свободи; n – число дослідів в паралельній серії.)

k	$f = n - 1$				
	1	2	3	4	5
2	0,9985	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772
3	0,9969	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071
4	0,9065	0,7679	0,6841	0,6287	0,5895
5	0,8412	0,6838	0,5981	0,5441	0,5065
6	0,7808	0,6161	0,5321	0,4803	0,4447
7	0,7227	0,5612	0,4800	0,4307	0,3974

Результати розрахунку критерію Кохрена наведені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Результати розрахунку критерію Кохрена

Відстань від стінки	Критерій Кохрена	
	для динамічного тиску	для статичного тиску
1	2	3
2	0,346	0,302
6,2	0,382	0,500

Продовження таблиці 3.8

1	2	3
10,2	0,398	0,375
14,2	0,463	0,374
18,2	0,344	0,356
22,2	0,501	0,339
26,4	0,321	0,453

Табличне значення критерію Кохрена $G_t = 0,5612$. Отримані розрахункові значення критерію Кохрена $G_p < G_t$, тобто дисперсії можуть вважатися однорідними і відносяться до однієї сукупності, тобто досліди відтворювані.

3.2.4 Результати аеродинамічного експерименту

Характеристика відцентрового нагнітача, що використовується в пиловловлюючому апараті наведена на рис. 3.2.

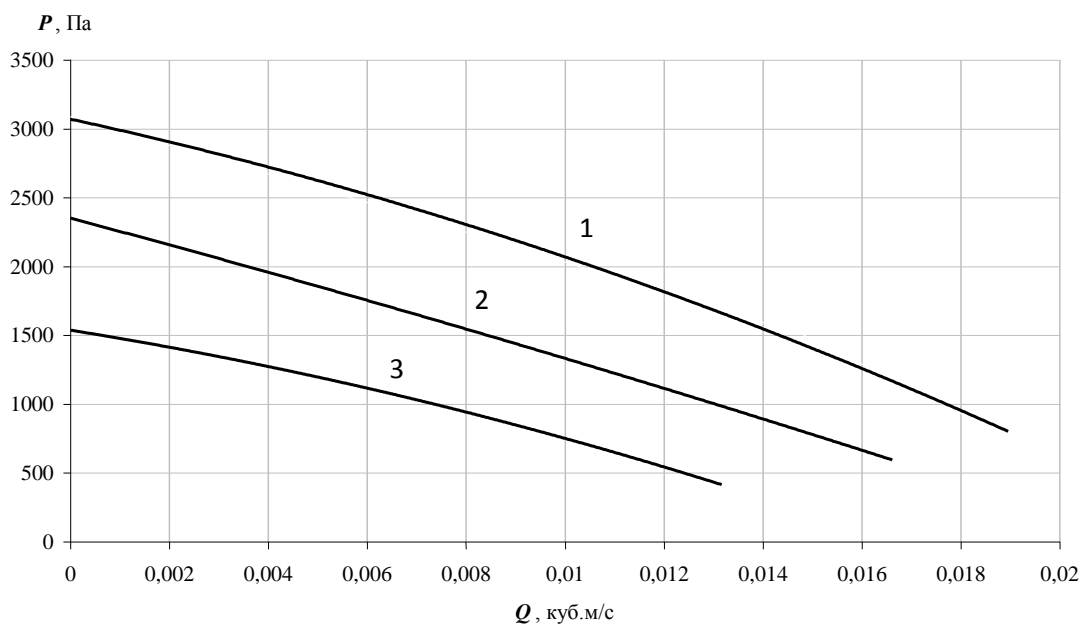


Рисунок 3.2 – Характеристика нагнітача при різній частоті обертання робочого колеса: 1 – $n = 7947$ об./хв.; 2 – $n = 7032$ об./ хв.; 3 – $n = 6005$ об./ хв.

За результатами розрахунку локальних швидкостей перерізі круглої труби були побудовані епюри швидкостей, які підтвердили достатньо однорідну течію в вихідному патрубку пиловловлювача рис. 3.3.

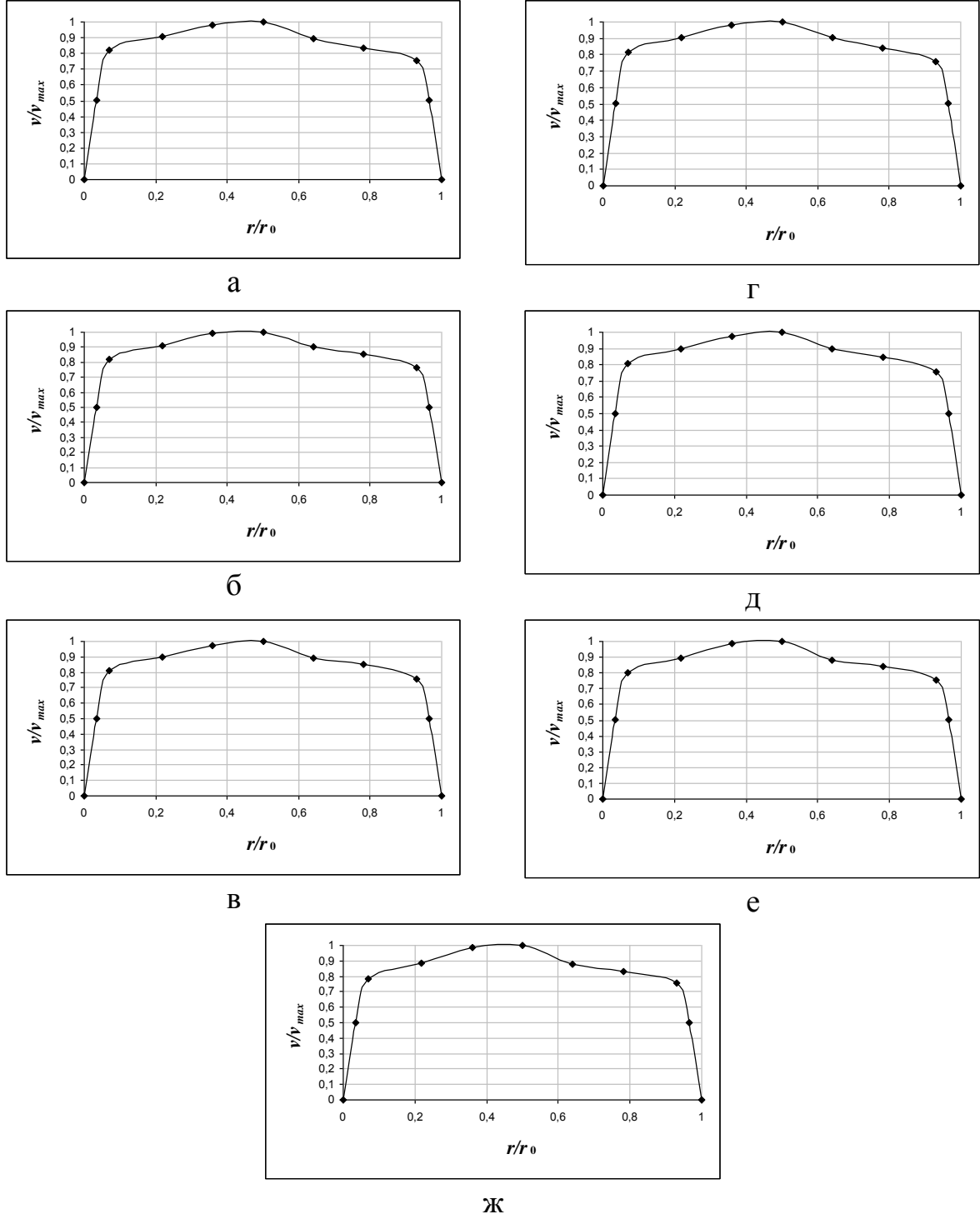


Рисунок 3.3 – Епюри швидкостей у вихідному патрубку: а – 10055 об./хв.;

б – 9554 об./хв.; в – 8629 об./хв.; г – 7947 об./хв.; д – 7032 об./хв.;

е – 6005 об./хв.; ж – 4757 об./хв.

Зовнішня характеристика місцевого опору, а також залежність $\xi = f(Re)$ для прямої пилоловлюючої системи з розвантажувачем наведена на рис. 3.4. Середні значення експериментально визначеного коефіцієнту втрат знаходились в межах від 0,8 до 1,5. Аналіз рис. 3.4 показав, що при роботі пилоловлюючої системи за прямою схемою відстані між розвантажувачем і пилоловлювачем не має суттєвого впливу на коефіцієнт опору.

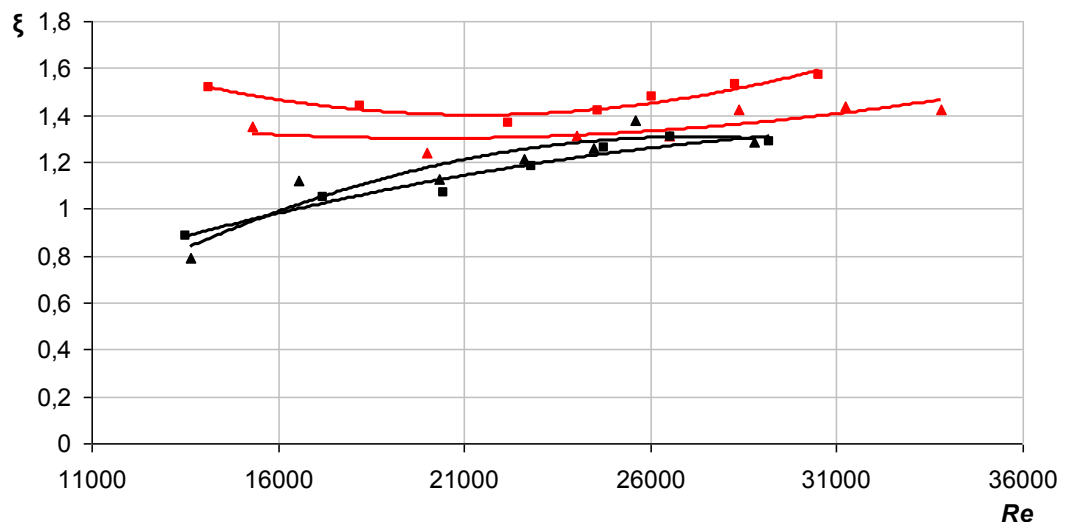
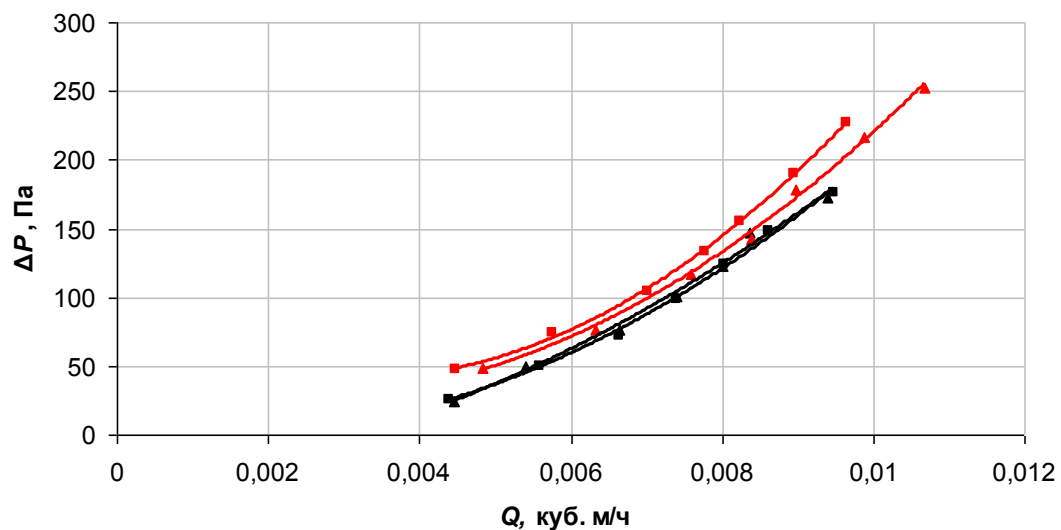


Рисунок 3.4 – Результати аеродинамічного експерименту для прямої пилоловлюючої системи при відстані розвантажувача від пилоловлювача 107 мм (■,▲) і 56 мм (▲,▲) для однонаправленої (■,▲) та різнонаправленої (■,▲) орієнтації закручення газового потоку

Залежність місцевих втрат тиску від витрати повітря для циркулюючої пиловловлюючої системи з розвантажувачем наведена на рис. 3.5. Середні значення експериментально визначеного коефіцієнту втрат знаходились в межах від 0,72 до 4,4.

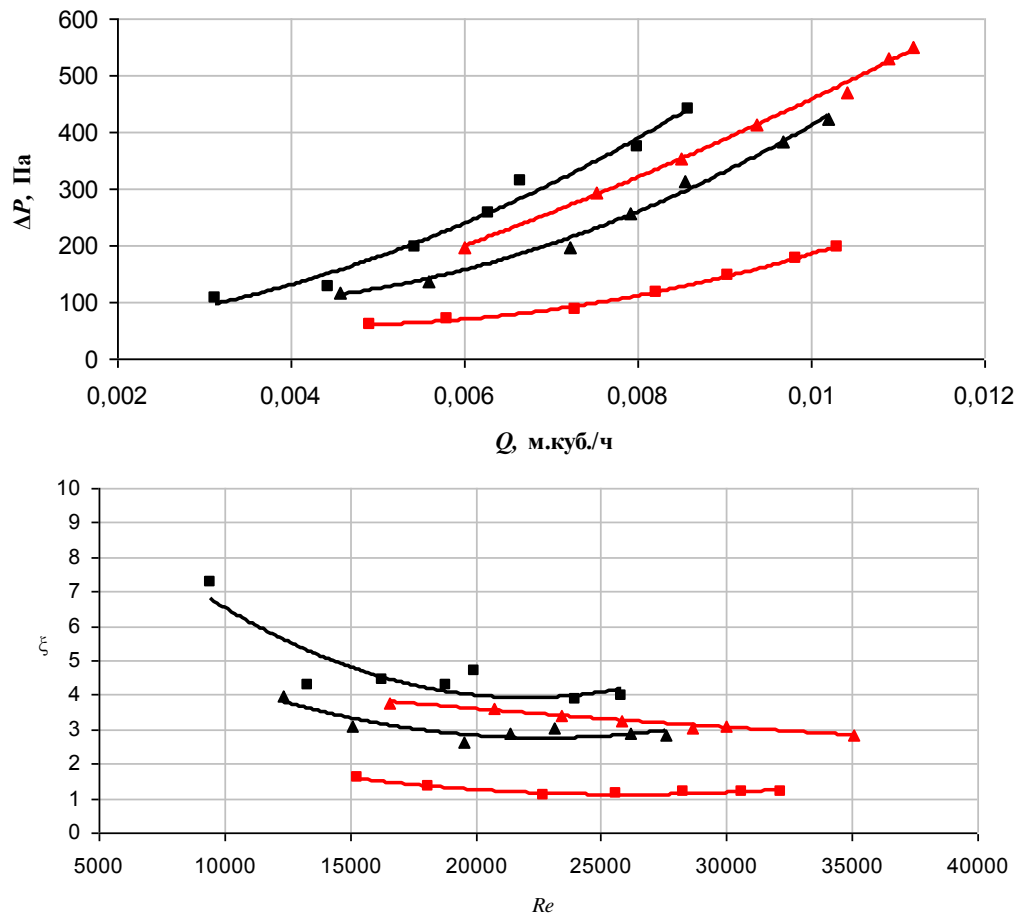


Рисунок 3.5 – Результати аеродинамічного експерименту для циркулюючої системи при відстані розвантажувача від пиловловлювача 107 мм (■,▲) і 56 мм (▲,▲) для однонаправленої (■,▲) та різнонаправленої (▲,▲) орієнтації закручення газового потоку

Аналіз рис. 3.4 показав, що при роботі пиловловлюючої системи за циркулюючою схемою вплив відстані між розвантажувачем і пиловловлювачем на коефіцієнт опору трохи зростає у порівнянні із прямоточною системою. А при меншій відстані між ними спостерігається зменшення впливу напрямку закручування на коефіцієнт опору.

3.3 Експеримент на запиленому повітрі

3.3.1 Методика визначення основних фізико-хімічних властивостей пилу [103–104]

Визначення дисперсного складу пилу.

Основною характеристикою, яка визначає тип апарата для очистки газу, є розмір частинок пилу. Сукупність розмірів усіх пилових частинок називають дисперсним складом. Дисперсний склад може бути записаний у вигляді таблиці, кривої чи формули розподілу.

Частку частинок, розміри яких знаходяться в певному діапазоні значень, прийнятих в якості верхнього і нижнього меж, називають фракцією.

Одним із способів визначення дисперсного складу пилу є ситовий аналіз, який заснований на механічному поділі часток по крупності шляхом просіювання через сита з різними розмірами отворів. Нижня межа розмірів отворів у ситі в ГОСТ 3584-73, а також в ряді норм на сита інших країн прийнята рівною 40 мкм. У дослідженнях використовують ручний спосіб розсіювання.

При ручному просіві рекомендується пробу, що аналізують, поміщати на найбільш тонке сито, а отриманий залишок перекладати на наступне по крупності отворів сито. Перевага такої послідовності проведення аналізу в тому, що грубе зерно сприяє просіву на більш тонких ситах. Сито з піддоном і кришкою беруть однією рукою, нахиливши полотно до горизонтальної поверхні на 10–20° вгору від цієї руки, і вдаряють іншою рукою близько 120 разів на хвилину. Приблизно 4 рази на хвилину сито розташовують горизонтально і сильно вдаряють по обичайці.

Після закінчення просіювання прохід з піддону збирають в стаканчик і зважують, а залишок поміщають на наступне сито в порядку збільшення розміру отворів і продовжують просіювання описаним вище способом.

Ручний просів можна вважати закінченим, якщо через сито при повторному розсіві протягом 3 хв. проходить не більше 1 % пилу, що знаходиться на даному ситі.

За остаточний результат приймають середнє арифметичне результатів двох паралельних визначень.

Визначення густини пилу.

Для розрахунку обсягу бункерів пиловловлювачів і при виборі пристроїв для вивантаження пилу необхідно знати густину частинок. Розрізняють справжню і насипну густину частинок пилу. Справжня густина частинок пилу являє собою масу одиниці об'єму частинок, які не мають часу. Насипна густина – маса одиниці об'єму уловленого пилу або порошкоподібного матеріалу, вільно насипаного в якусь ємність безпосередньо після її заповнення. В її обсяг входять внутрішні пори частинок і проміжний простір між ними.

Метод визначення насипної густини полягає у визначенні маси вимірюваного обсягу пилу [103]. Для вимірювання обсягу проби пилу використовують мірний скляний циліндр об'ємом 50–100 см³ з діаметром 30 мм. Верхня частина циліндра вище шкали обрізана і відшліфована.

Спочатку визначають на вагах з точністю 0,01 г масу мірного циліндра і записують його обсяг. Потім заповнюють циліндр пилом. Пил, що знаходиться вище верхньої кромки циліндра, видаляють лінійкою і зважуванням визначають масу циліндра з пилом.

Обчислюють насипну густину пилу. За остаточний результат приймають середнє арифметичне з шести окремих визначень.

3.3.2 Визначення коефіцієнту уловлювання пилу

У дослідженнях використовували три експериментальні зразки пилу: зола, крохмаль, шліфувальний пил. Проба золи була відібрана з зольнику твердопаливного котла і перетерта товкачем у ступці. Проба крохмалю являла собою картопляний крохмаль отриманий промисловим способом. Проба

шліфувального пилю була відібрана з пилозбірника стрічкової шліфувальної машини.

Насипна густина досліджуваних зразків пилю становила: зола – 990 кг/м³, крохмаль – 560 кг/м³, шліфувальний пил – 210 кг/м³. Дисперсний склад експериментальних зразків пилю наведений в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Дисперсний склад експериментального пилю

Розмір отворів у ситі, мкм	% частинок в складі пилю		
	зола	крохмаль	шліфувальний пил
> 100	56,5	0	18
100–63	30	7	26
63–50	8,5	1	7
50–40	3,5	71	13
< 40	1,5	21	36

За класифікаційною номограмою пилю [53] медіанний розмір частинок досліджуваного пилю становив: зола – 85 мкм, крохмаль – 45 мкм, шліфувальний пил – 50 мкм.

Для визначення коефіцієнту пиловловлювання у бункері експериментальний стенд працював за прямоочною схемою. Пил масою 100 г з джерела подавався у робоче колесо нагнітача через вхідний патрубок. Установка працювала до повного опорожнення джерела пилю. Після припинення роботи пиловловлюючого апарату пил, який осів в бункері і який вилетів через вихідний патрубок, зважувався на електронних вагах.

Значення коефіцієнту вловлювання пилю розраховувався за формулою

$$\eta = \frac{m_{vl}}{m_{vh}}, \quad (3.18)$$

де m_{vl} – маса пилю, який осів у бункері, кг;

m_{vh} – маса пилу на вході в пиловловлювач, кг.

Значення коефіцієнтів вловлювання полідисперсного пилу у бункері пиловловлювача, визначені експериментальним шляхом, становили для золи – 88 %, крохмалю – 38 %, шліфувального пилу – 29 %. Досить високий, як для інерційного осадження, коефіцієнт уловлювання золи обумовлений високою густиною і крупністю часток пилу.

Результати визначення коефіцієнту вловлювання шліфувального пилу при різних витратах повітря і пилу на вході у пиловловлювач для пилових частинок різних фракцій наведені у табл. 3.10. Аналіз результатів показав, що зниження витрати повітря і збільшення витрати пилу призводить до зниження коефіцієнту виносу пилу, що є типовим для класичних інерційних пиловловлювачів [105–108].

Таблиця 3.10 – Коефіцієнт вловлювання шліфувального пилу

Витрата повітря · 10 ⁻³ , м ³ /год.	Ефективність вловлювання пилу, %					
	Розмір частинок пилу, мкм					
	< 40		40–50		63 –100	
	Витрата пилу на вході у пиловловлювач, г/с					
	0,092	0,167	0,092	0,167	0,092	0,167
5,535	45,5	60	55,5	60	63,6	70
9,374	27,3	30	28,2	30	27,3	40

Усереднені результати порівняльних дослідів при роботі за прямою та циркулюючою схемою, з протилежнонаправленим і однонаправленим закручуванням повітря, при різних витратах повітря для пиловловлюючої системи з розвантажувачем (рис. 3.1б) наведені в табл. 3.11–3.12. Аналіз результатів показав, що зниження витрати повітря призводить до збільшення частки пилу, що осідає в пилосбірному контейнері розвантажувача, і до зниження загального коефіцієнту проскоку.

Таблиця 3.11 – Порівняльні дослідження роботи прямої пилоловлюючої системи з розвантажувачем

Елемент системи	Ефективність пилоловлювання (%) при однонаправленому закручуванні з витратою повітря ($\text{м}^3/\text{год.}$):	
	$9,374 \cdot 10^{-3}$	$12,222 \cdot 10^{-3}$
Розвантажувач	85	65
Пилоловлювач	10	20

Таблиця 3.12 – Порівняльні дослідження роботи циркулюючої пилоловлюючої системи з розвантажувачем

Елемент системи	Ефективність пилоловлювання, %	
	протилежнонаправлене закручування	однаправлене закручування
Розвантажувач	58,52	50
Пилоловлювач	41,48	50

Пилозбірний контейнер розвантажувача заповнюється швидше, що узгоджується з результатами математичного моделювання.

3.4 Дослідження впливу відцентрового нагнітача на коагуляцію пилових частинок

Бункер пилоловлюючого апарату, що досліджувався, за геометричною формою подібний інерційному пилоловлювачу – камері з плавним поворотом газового потоку, у якій продовжується процес сепарації пилу. Для отримання значення коефіцієнта вловлювання пилу розрахунковим шляхом використовувалася методика розрахунку гравітаційних камер [39]. Вибір методики обумовлений спільними ознаками бункеру з гравітаційною камерою: присутність входу й виходу газового потоку, область осадження, вільна

поверхня осаду, наскрізний потік. Крім того завжди існує такий розмір частинок, що ймовірність їх потрапляння в осад дорівнює 0,5, для яких

$$\frac{w_{os}(\delta_{50})}{v} = K \cdot \frac{H}{L}, \quad (3.19)$$

де $w_{os}(\delta_{50})$ – швидкість витання пилових частинок, які вловлюються з ефективністю 50 %, м/с;

v – швидкість потоку повітря в гравітаційній камері, м/с;

K – конструктивна стала (для гравітаційної камери приймають $K = 1,5$);

H – висота гравітаційної камери, м;

L – довжина гравітаційної камери, м.

Швидкість потоку повітря v в робочому перерізі камери визначається за формулою

$$v = \frac{Q}{H \cdot B}, \quad (3.20)$$

де Q – витрата повітря, м³/с;

B – ширина гравітаційної камери, м.

Діаметр частинок d_{50} , які осідають в камері на 50 %, розраховувалися за формулою

$$d_{50} = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot w_{os}}{g \cdot (\rho_{ch} - \rho_p)}}, \quad (3.21)$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, Па·с;

w_{os} – швидкість витання пилових частинок, м/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ_{ch} – густина частинок пилу, кг/м³;

ρ_p – густина повітря, кг/м³.

Для визначення кількох точок залежності коефіцієнта пиловловлювання від розміру частинок пилу обиралися кілька співвідношень w_{os}/v , більших і менших значення $w_{os}(\delta_{50})/v$ та розраховувалися відповідні значення d_{50} .

Середню концентрацію частинок на виході з камери для кожного прийнятого співвідношення w_{os}/v можна визначити як середнє значення з

концентрацій у 4–5 точках. Для цього задавалося п'ять точок за висотою перерізу $h/H = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$.

Параметри функції парціального розподілу $\Phi(x)$ x_1 та x_2 розраховувалися за виразами

$$x_1 = \frac{1 + \frac{h}{H} - \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{os}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^3 \cdot \frac{L}{H}}}, \quad (3.22)$$

$$x_2 = \frac{1 - \frac{h}{H} + \frac{L}{H} \cdot \frac{w_{os}}{v}}{\sqrt{7 \cdot 10^3 \cdot \frac{L}{H}}}. \quad (3.23)$$

За таблицею значень нормальної функції розподілення та за значеннями x_1 и x_2 знаходилися інтеграли ймовірностей $\Phi(x_1)$ та $\Phi(x_2)$ [39]. Визначення відношення концентрації частинок пилу даного розміру у розрахунковій точці вихідного перерізу камери до її концентрації у вхідному перерізі (N_i) проводилося за рівнянням

$$N_i = \Phi(x_1) + \Phi(x_2) - 1, \quad (3.24)$$

Значення N_i усереднювали за перерізом та визначали середній парціальний коефіцієнт осадження часток визначеного розміру:

$$N_{ser} = \sum_{i=1}^k \frac{N_i}{k}, \quad (3.25)$$

$$\eta_{p.ser} = 100 \cdot (1 - N_{ser}). \quad (3.26)$$

За результатами вимірювань, пилозбірний контейнер пиловловлюючого апарату, що досліджувався, має висоту $H = 0,0218$ м, довжину $L = 0,316$ м та ширину $B = 0,03$ м. Витрата повітря через пилозбірний контейнер $Q = 0,00156$ м³/с, його густина $\rho_p = 1,217$ кг/м³.

На рис. 3.6 та рис. 3.7 зображено парціальні криві коефіцієнтів уловлювання для пилу з густиною 210 кг/м³, 560 кг/м³ і 990 кг/м³, які були отримані за методом розрахунку гравітаційної камери. Там же нанесені результати експериментальних досліджень для цих же матеріалів.

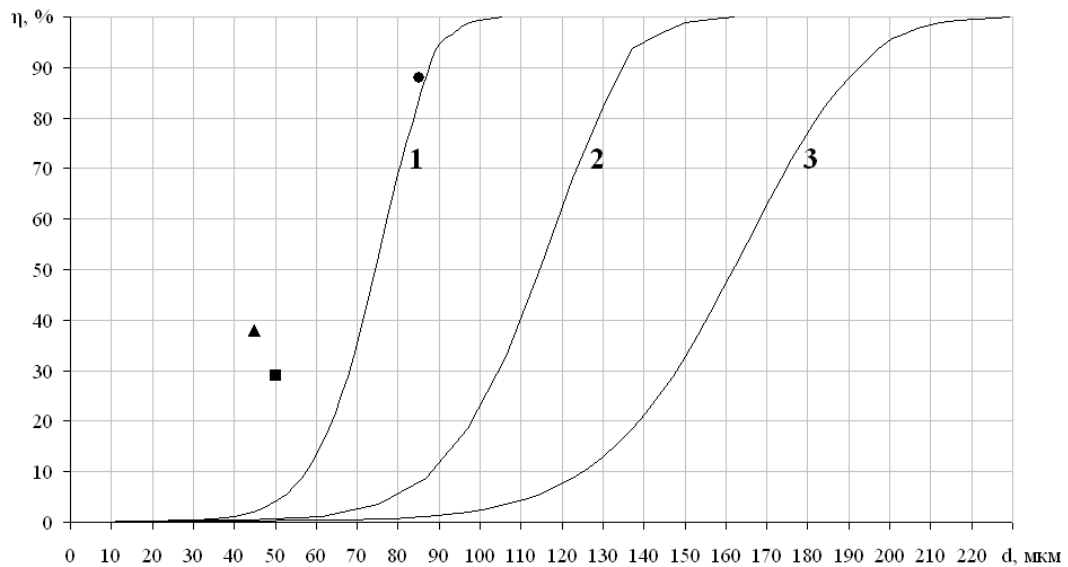


Рисунок 3.6 – Ефективність осадження пилових частинок η залежно від медіанного розміру пилових частинок d за умов дії механізму гравітаційного осадження (1, 2, 3) і сукупній дії механізмів гравітаційного і відцентрового осадження (\bullet , \blacktriangle , \blacksquare): 1, \bullet – зола; 2, \blacktriangle – крохмаль; 3, \blacksquare – шліфувальний пил

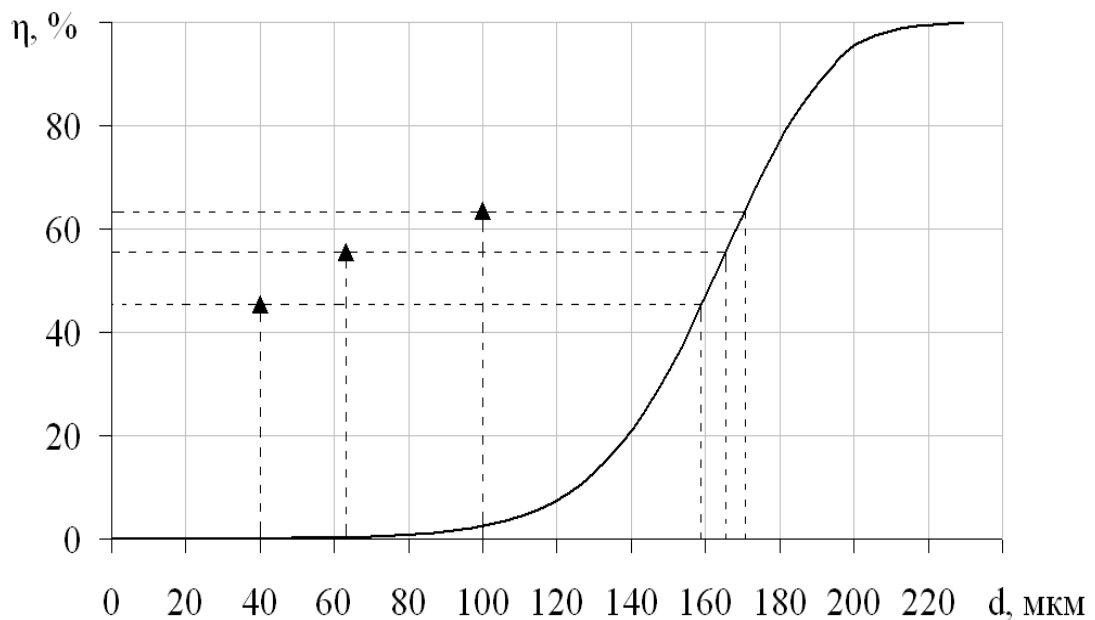


Рисунок 3.7 – Результати дослідження ефективності уловлювання шліфувального пилу за фракціями за умов дії механізму гравітаційного осадження (—) і сукупній дії механізмів гравітаційного і відцентрового осадження (\blacktriangle), (витрата повітря 5, 535 л/год., витрата пилу 0,092 г/с)

При порівнянні результатів експерименту з результатами розрахунків привертає увагу те, що у кожному з трьох випадків, що наведені на рис. 3.6–3.7, експериментальна точка не накладається на відповідну криву, а знаходиться вище очікуваного результату. Так, для золи при розмірі частинок 85 мкм розрахункове значення коефіцієнту уловлювання становить 83 %, а експериментальне – 88 %. Для крохмалю при розмірі частинок 45 мкм розрахункове значення коефіцієнту уловлювання становить менше 3 %, експериментальне – 38 %. Для шліфувального пилю при розмірі частинок 50 мкм розрахункове значення коефіцієнту уловлювання становить менше 3 %, експериментальне – 29 %. Велику різницю між очікуваними і отриманими результатами можна пояснити двома причинами. По-перше, завдяки концентруючій дії робочого колеса у бункер були відсепаровані частинки пилю найбільшого розміру, які добре осідають у інерційних пиловловлювачах. По-друге, завдяки коагулюючому ефекту робочого колеса була зменшена кількість дрібнодисперсних частинок пилю и збільшена кількість і розміри великодисперсних частинок пилю. Тобто був змінений початковий дисперсний склад пилю в бік збільшення маси великих фракцій. При цьому найбільшій зміні початкового дисперсного складу піддався зразок шліфувального пилю, а найменшій – зразок золи. Це можна пояснити ступенем їх полідисперсності. У зразках золи і крохмалю переважна більшість часток (майже 90 %) мала розміри понад 50 мкм і до 50 мкм відповідно. Розподілення за фракціями частинок шліфувального пилю майже рівномірне, тобто швидкості, які отримують часинки, мають найбільшу відмінність. Завдяки цій відмінності у швидкостях руху часток і відбувається їх зустріч, яка супроводжується коагуляцією [109]. Таким чином є доцільним поєднання відцентрової сепарації та гравітаційного осадження в одому пиловловлювачі для очищення повітря від пилю дрібних фракцій.

Основні результати досліджень розділу 3 опубліковані в [110–112].

3.5 Висновки до розділу 3

Проведено фізичний експеримент на дослідному стенді, проаналізовано та узагальнено його результати, зокрема:

1. Проведено оцінку похибок результатів прямих вимірювань динамічного тиску і непрямих вимірювань середньої швидкості у вихідному патрубку. Грубих помилок не виявлено. Проведено перевірку відтворюваності вимірювань. Отримані розрахункові значення критерію Кохрена менші табличного значення, тобто досліди відтворювані.

2. Результати визначення коефіцієнту вловлювання пилу показали, що зниження витрати повітря призводить до збільшення частки пилу, що осідає в пилозбірному контейнері розвантажувача, і до зниження загального коефіцієнту проскоку. Пилозбірний контейнер розвантажувача заповнюється швидше, що узгоджується з результатами математичного моделювання.

3. Одержано результати, які дають змогу стверджувати про зміну початкового фракційного складу пилу завдяки його коагуляції у робочому колесі вентилятора. Таким чином є доцільним поєднання відцентрової сепарації та гравітаційного осадження в одому пиловловлювачі для очищення повітря від пилу дрібних фракцій.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ПИЛОВЛОВЛЮЮЧОГО АПАРАТУ

4.1 Визначення мінімального розміру пилозбірного контейнеру

У комбінованому пиловловлюючому апараті (КПА) видалення твердих частинок із запиленого потоку проходить у дві стадії. На першій – пилові частинки за рахунок відцентрової сили виносяться в зону осадження, а ефективність сепарації визначається параметрами робочого колеса. На другій стадії відбувається осадження пилових частинок під дією сили гравітації, де ефективність сепарації визначається оптимально підібраними конструктивними розмірами пилозбірного контейнеру (бункера) [37, 45–46]. Одним з етапів конструювання бункера є визначення його мінімального (корисного) об'єму, який зводиться до визначення обсягу вловленого пилу за одиницю часу. Значення об'єму осадженого пилу прямопропорційно залежить від необхідної ефективності очищення. Оскільки універсальних пиловловлювачів, здатних вловлювати усі види пилу у будь яких умовах з однаково високою ефективністю, не існує, тому є необхідність у розрахунках ураховувати фізико-механічні властивості пилу, який уловлюється, та технологічні параметри газу, який очищується.

Огляд літературних джерел дозволив виділити основні фактори, що впливають на ефективність інерційних пиловловлювачів. Серед них можна виділити технологічні (Q – витрата запиленого газу, $\text{м}^3/\text{с}$; ΔP – гідравлічний опір пиловловлювача, Па; C_0 – початкова масова концентрація пилу, $\text{г}/\text{м}^3$) та фізико-механічні параметри (d – медіанний розмір частинки пилу, мкм ; ρ – густина пилу, $\text{кг}/\text{м}^3$; w – середня швидкість паріння частинки пилу, $\text{см}/\text{с}$). Об'єм вловленого пилу за одиницю часу становить

$$V = \frac{C_0 Q}{\rho} \eta, \quad (4.1)$$

тобто

$$V = f_1(Q, \Delta P, C_0, d, \rho, w),$$

або

$$f_2(V, Q, \Delta P, C_0, d, \rho, w) = 0.$$

Таким чином, процес вловлювання пилу в бункері пиловловлюючого апарату буде визначатися чотирма критеріями подібності

$$f_3(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0.$$

$$\pi_1 = V \rho^{x_1} Q^{y_1} d^{z_1}.$$

$$\dim \pi_1 = L^3 T^{-1} (ML^{-3})^{x_1} (L^3 T^{-1})^{y_1} L^{z_1} = L^{3-3x_1+3y_1+z_1} T^{-1-y_1} M^{x_1}.$$

Тоді

$$\begin{cases} 3-3x_1+3y_1+z_1=0 \\ -1-y_1=0 \\ x_1=0 \end{cases} ; \begin{cases} z_1=0 \\ y_1=-1 \\ x_1=0 \end{cases}.$$

Отже, $\pi_1 = \frac{V}{Q}$.

$$\pi_2 = \Delta P \rho^{x_2} Q^{y_2} d^{z_2}.$$

$$\dim \pi_2 = ML^{-1} T^{-2} (ML^{-3})^{x_2} (L^3 T^{-1})^{y_2} L^{z_2} = L^{-1-3x_2+3y_2+z_2} T^{-2-y_2} M^{1+x_2}.$$

Тоді

$$\begin{cases} -1-3x_2+3y_2+z_2=0 \\ -2-y_2=0 \\ 1+x_2=0 \end{cases} ; \begin{cases} z_2=4 \\ y_2=-2 \\ x_2=-1 \end{cases}.$$

Отже, $\pi_2 = \frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2}$.

$$\pi_3 = C_0 \rho^{x_3} Q^{y_3} d^{z_3}.$$

$$\dim \pi_3 = ML^{-3} (ML^{-3})^{x_3} (L^3 T^{-1})^{y_3} L^{z_3} = L^{-3-3x_3+3y_3+z_3} T^{-y_3} M^{1+x_3}.$$

Тоді

$$\begin{cases} -3 - 3x_3 + 3y_3 + z_3 = 0 \\ -y_3 = 0 \\ 1 + x_3 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} z_3 = 0 \\ y_3 = 0 \\ x_3 = -1 \end{cases} .$$

Отже, $\pi_3 = \frac{C_0}{\rho}$. Враховуючи (4.1), отримуємо $\pi_1 = \pi_3 \eta$.

$$\pi_4 = w\rho^{x_4} Q^{y_4} d^{z_4} .$$

$$\dim \pi_4 = LT^{-1} (ML^{-3})^{x_4} (L^3 T^{-1})^{y_4} L^{z_4} = L^{-3x_4 + 3y_4 + z_4} T^{-1-y_4} M^{x_4} .$$

Тоді

$$\begin{cases} 1 - 3x_4 + 3y_4 + z_4 = 0 \\ -1 - y_4 = 0 \\ x_4 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} z_4 = 2 \\ y_4 = -1 \\ x_4 = 0 \end{cases} .$$

Отже, $\pi_4 = \frac{wd^2}{Q}$.

Таким чином,

$$\pi_3 \eta = A \pi_2^a \pi_3^b \pi_4^c ,$$

або

$$\frac{C_0}{\rho} \eta = A \left(\frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2} \right)^a \left(\frac{C_0}{\rho} \right)^b \left(\frac{wd^2}{Q} \right)^c . \quad (4.2)$$

Позначимо $\frac{C_0}{\rho} \eta = K$, $\frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2} = L$, $\frac{C_0}{\rho} = M$, $\frac{wd^2}{Q} = N$, тоді

$$K = AL^a M^b N^c .$$

Логарифмуємо рівняння:

$$\ln K = \ln A + a \ln L + b \ln M + c \ln N .$$

Позначимо $\ln K = \lambda$, $\ln A = \varphi$, $\ln L = \alpha$, $\ln M = \beta$, $\ln N = \gamma$, тоді

$$\lambda = \varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma .$$

Для визначення коефіцієнтів φ , a , b , c використовуємо результати експериментальних досліджень, що наведені в табл. 4.1, та метод найменших квадратів.

Таблиця 4.1 – Результати експериментального визначення коефіцієнта вловлювання пилю у прямоточній пиловловлюючій системі

Параметр	Проба пилю 1	Проба пилю 2	Проба пилю 3	Проба пилю 4
$Q \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}$	9,374	12,222	12,222	9,374
$\Delta P, \text{ Па}$	16	37	37	16
$C_0, \text{ г/м}^3$	75,85	199,56	221,134	17,815
$d, \text{ мкм}$	85	50	45	80
$\rho, \text{ кг/м}^3$	990	210	560	210
$w, \text{ см/с}$	28,98	1,7	2,53	4,36
η	91,4	29	38	40

Запишемо систему рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial \varphi} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot 1 = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial \alpha} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot \alpha = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial \beta} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot \beta = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial \gamma} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot \gamma = 0 \end{cases}, \quad (4.3)$$

або

$$\begin{cases} 4\varphi + a \sum \alpha + b \sum \beta + c \sum \gamma = \sum \lambda \\ \varphi \sum \alpha + a \sum \alpha^2 + b \sum \beta \alpha + c \sum \gamma \alpha = \sum \lambda \alpha \\ \varphi \sum \beta + a \sum \alpha \beta + b \sum \beta^2 + c \sum \gamma \beta = \sum \lambda \beta \\ \varphi \sum \gamma + a \sum \alpha \gamma + b \sum \beta \gamma + c \sum \gamma^2 = \sum \lambda \gamma \end{cases}, \quad (4.4)$$

Результати розрахунку коефіцієнтів, що входять у систему (4.4), наведені у табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку коефіцієнтів

Коефіцієнти	Пил 1	Пил 2	Пил 3	Пил 4	Σ
α	-31,83	-32,54	-36,29	-30,97	-131,64
β	-9,48	-6,96	-7,84	-9,37	-33,65
γ	-15,09	-19,48	-20,47	-17,33	-72,36
λ	-9,57	-8,20	-8,80	-10,29	-36,86
α^2	1013,28	1058,92	1317,29	959,07	4348,56
$\alpha\beta$	301,66	226,45	284,44	290,33	1102,87
$\alpha\gamma$	480,41	633,80	742,79	536,69	2393,69
$\alpha\lambda$	304,53	266,73	319,56	318,70	1209,51
β^2	89,81	48,42	61,42	87,89	287,54
$\beta\gamma$	143,02	135,54	160,39	162,46	601,41
$\beta\lambda$	90,66	57,04	69,00	96,48	313,18
γ^2	227,77	379,35	418,84	300,32	1326,29
$\gamma\lambda$	144,38	159,65	180,19	178,34	662,56

Підставимо отримані значення коефіцієнтів у систему (4.4):

$$\begin{cases} 4\varphi - 131,64a - 33,65b - 72,36c = -36,86 \\ -131,64\varphi + 4348,56a + 1102,87b + 2393,69c = 1209,51 \\ -33,65\varphi + 1102,87a + 287,54b + 601,41c = 313,18 \\ -72,36\varphi + 2393,69a + 601,41b + 1326,29c = 662,56 \end{cases} \quad (4.5)$$

Розв'язав систему рівнянь (4.5) отримали: $a = -0,162$, $b = 1,0344$, $c = 0,308$, $\varphi = -0,277$, $A = 0,758$.

Тоді основне критеріальне рівняння для визначення корисного об'єму бункеру буде мати вигляд

$$V = 0,758Q \left(\frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2} \right)^{-0,162} \left(\frac{C_0}{\rho} \right)^{1,0344} \left(\frac{w d^2}{Q} \right)^{0,308} \quad (4.6)$$

4.2 Визначення геометричних параметрів пірамідально-призматичного бункеру

Монтаж запропонованого КПА здійснюється на основі стандартного промислового нагнітача, завиток якого поєднується циркуляційним каналом з пилосбірним контейнером. Криволінійна поверхня, біля якої концентруються пилові частинки і яка відокремлює бункер від завитку, називається робочою напівобичайкою з радіусом $R_{зав}$. Криволінійні поверхні, які поєднують завиток і бункер з утворенням циркуляційного каналу, називаються з'єднуючими напівобичайками з радіусом $r_{ц}$ ($r_{ц} \approx 0,1R_{зав}$).

Бункер КПА складається з двох частин: верхньої – призми і нижньої – воронки у вигляді усіченої піраміди. Методика розрахунку геометричних параметрів пірамідально-призматичного бункеру (рис. 4.1) наводиться в [113].

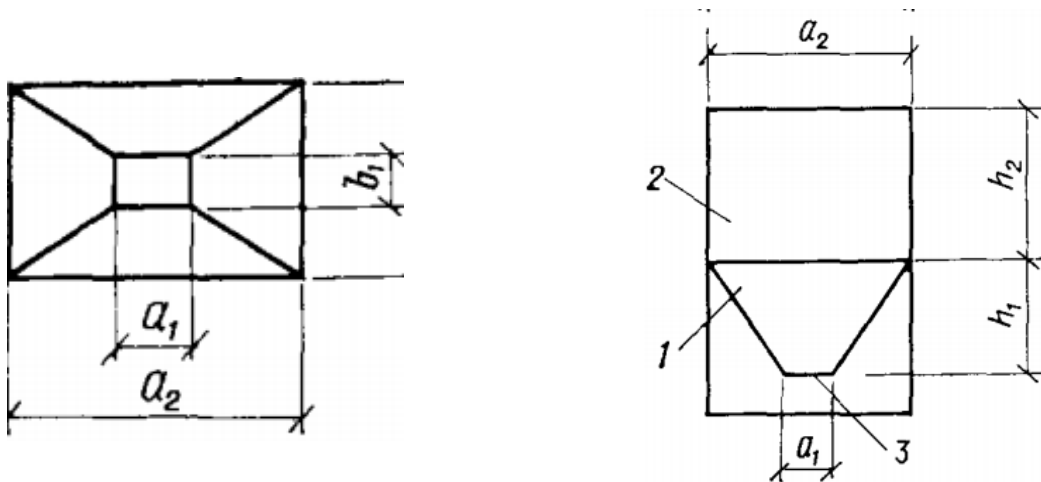


Рисунок 4.1 – Пірамідально-призматичний бункер: 1 – нижня частина у вигляді пірамідальної воронки; 2 – верхня частина з вертикальними стінками; 3 – вихідний отвір [113].

Корисний розрахунковий об'єм бункера повинен становити не менше 80 % геометричного об'єму бункера, який обчислюється за формулою:

$$V = V_{п} + V_{в} = a_2 b_2 h_2 + \frac{h_1}{6} [(2a_2 + a_1)b_2 + (2a_1 + a_2)b_1], \quad (4.7)$$

де V_{Π} – об’єм призматичної частини;

$V_{\text{В}}$ – об’єм воронки.

Висота вертикальної частини пірамідально-призматичних бункерів повинна дорівнює $1,5\sqrt{F}$, де F – площа горизонтального перерізу бункера над воронкою.

Отже, ширина бункеру дорівнюватиме

$$a_2 = R_{\text{зав}}^1 + R_{\text{зав}}^2 + 2 \cdot r_{\text{ц}}, \quad (4.8.)$$

де $R_{\text{зав}}^1$, $R_{\text{зав}}^2$ – відстані від осі симетрії нагнітача до його криволінійної поверхні, мм.

Оскільки ефективне вилучення пилу в бункері буде відбуватися поки робоча напівобичайка і пил, що осів, не утворять криволінійний канал постійного перерізу, то висота частини бункеру, у якій не відбувається сепарація становить

$$h_0 = R_{\text{зав}}^3 + r_{\text{ц}}, \quad (4.9)$$

де $R_{\text{зав}}^3$ – відстань від осі симетрії нагнітача до його криволінійної поверхні, мм.

Висота частини бункеру, у якій відбувається сепарація становить

$$h_1 + h_2 = 1,5 \cdot \sqrt{a_2 \cdot b_2}, \quad (4.10)$$

де b_2 – відстань між паралельними стінками нагнітача, мм.

Загальна висота бункеру складає

$$H = h_0 + h_1 + h_2. \quad (4.11)$$

Для забезпечення стійкого характеру витікання, багатьма дослідниками пропонуються різні формули визначення мінімально допустимих розмірів випускних отворів, які наведені в [114]. Так, в залежності тільки від розміру максимального куска сипкого матеріалу, ширина випускного отвору розраховується за формулою [113]:

$$b_1 \geq (3 \div 5)a_{\text{max}}, \quad (4.12)$$

де b_1 – мінімальний розмір випускного отвору (ширина);

a_{max} – розмір максимального шматка (при розмірі шматків до 100 мм приймають величину $5a_{max}$).

Кут нахилу стінок бункера повинен відповідати фізико-механічними властивостями сипкого матеріалу, щоб унеможливити зависання продукту. Зазвичай кут нахилу стінок визначають за формулою [114]:

$$\alpha = \alpha_1 + 10^\circ \quad (4.13)$$

де α_1 – кут внутрішнього тертя матеріалу, який для легкосипких матеріалів дорівнює куту природного укосу.

4.3 Методика розрахунку експлуатаційних характеристик комбінованого пиловловлюючого апарату

Для розробки методики розрахунку експлуатаційних параметрів КПА використано диференційну криву розподілу пилу [39], яка буде постійно змінюватися з плином часу через наявність у комбінованому пиловловлюючому апараті циркуляційного контуру, а також впливати на загальний коефіцієнт уловлювання пилу.

У КПА входить витрата запиленого повітря Q_0 ($\text{м}^3/\text{с}$) з масою пилу $M_{\text{вх}}$ ($\text{кг}/\text{с}$) та дисперсним складом, який характеризується диференціальною кривою розподілу (ДКР) $N_{\text{вх}} = f(\Delta)$. До цього потоку у позначенні 5 (рис. 2.1) корпусу нагнітача додається запилене повітря з витратою $Q_{\text{цирк}}$, масою пилу $M_{\text{проск}}$ та диференціальною кривою розподілу $N_{\text{проск}} = f(\Delta)$.

Таким чином, до точки відбору повітря у циркулюючий контур (позначення 3 на рис. 2.1) надходить запилене повітря з витратою:

$$Q = Q_0 + Q_{\text{цирк}}, \quad (4.14)$$

масою пилу –

$$M_{5-3} = M_{\text{вх}} + M_{\text{проск}} \quad (4.15)$$

і диференціальною кривою розподілу, яку можна представити у відсотках (весь діапазон розмірів частинок пилової маси поділяється на 10 рівних відрізків):

$$N_{5-3}^i(\Delta) = 100 \cdot (M_{\text{вх}}^i + M_{\text{проск}}^i) / 10 \cdot (M_{\text{вх}} + M_{\text{проск}}), \quad (4.16)$$

де $M_{\text{вх}}^i$ – маса i -тої фракції пилу, що входить у КПА;

$M_{\text{проск}}^i$ – маса i -тої фракції пилу, що надходить у корпус нагнітача з бункеру КПА.

До бункеру КПА потрапляє повітря витратою:

$$Q_{\text{цирк}} = Q_{5-3} \cdot q_{\text{розд}}, \quad (4.17)$$

де $q_{\text{розд}}$ – частка повітря, що потрапляє з корпусу нагнітача у бункер.

Маса пилу, яка потрапляє до бункеру КПА:

$$M_{3-4} = M_{5-3} \cdot \eta_{\text{розд}}, \quad (4.18)$$

де $\eta_{\text{розд}}$ – частка пилу, що потрапляє з корпусу нагнітача у бункер:

$$\eta_{\text{розд}} = \sum_{i=1}^{10} \eta_{\text{розд}}^i \cdot N_{5-3}^i \cdot \frac{10}{100}. \quad (4.19)$$

Диференціальна крива розподілу пилу, який потрапляє у бункер КПА:

$$N_{3-4}^i = N_{5-3}^i(\Delta) \cdot \eta_{\text{розд}} \cdot (M_{5-3} / M_{3-4}), \quad (4.20)$$

В бункері уловлюється пил масою:

$$M_{\text{уловл}} = M_{4-4} = M_{3-4} \cdot \eta_{\text{уловл}}, \quad (4.21)$$

де $\eta_{\text{уловл}}$ – частка пилу, що осаджується у бункері:

$$\eta_{\text{уловл}} = \sum_{i=1}^{10} \eta_{\text{уловл}}^i \cdot N_{3-4}^i \cdot \frac{10}{100}. \quad (4.22)$$

Пил масою:

$$M_{\text{проск}} = M_{4-5} = M_{3-4} \cdot (1 - \eta_{\text{уловл}}) \quad (4.23)$$

і диференціальною кривою розподілу –

$$N_{\text{проск}}^i = N_{4-5}^i = N_{3-4}^i(\Delta) \cdot (1 - \eta_{\text{уловл}}) \cdot (M_{3-4} / M_{4-5}), \quad (4.24)$$

повертається у корпус нагнітача.

На вихід з КПА направляється повітря з масою пилу:

$$M_{\text{вих}} = M_{\text{вх}} - M_{\text{уловл}} = M_{\text{вх}} + M_{\text{проск}} - M_{3-4} \quad (4.25)$$

і диференціальною кривою розподілу –

$$N_{\text{вих}}^i = N_{5-3}^i \cdot (1 - \eta_{\text{розд}}) \cdot (M_{4-5} / M_{\text{вих}}). \quad (4.26)$$

4.4 Проектування комбінованого пиловловлюючого апарату для доочищення пилових викидів системи аспірації

Запропонована у п. 4.3 методика була застосована для розрахунку показників КПА, як елемента доочищення пилових викидів системи аспірації приміщення подрібнення будівельних матеріалів ТОВ «Енергосервіс», яка наведена на рис. 4.2. Система працює наступним чином. Запилене повітря від джерела виділення пилу захоплюється зонтом 5 і направляється до розділювача 2, де відбувається розподілення пилу за фракційною ознакою. Потік з дрібними фракціями пилу рухається до вловлювача циркуляційного контуру 4, а потік з великими фракціями – до головного вловлювача 3 і після очищення у ньому нагнітачем 7 викидається в атмосферне повітря. Потік циркуляційного контуру після очищення потрапляє у апарат-змішувач 1 і далі знову на очищення. В якості вловлювачів використовуються циклони.

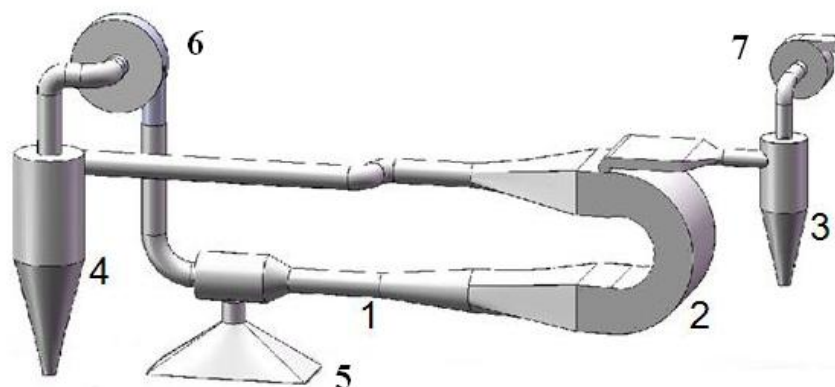


Рисунок 4.2 – Схема аспірації приміщення подрібнення будівельних матеріалів:

- 1 – ежектор-змішувач; 2 – розділювач; 3 – вловлювач головного контуру;
4 – вловлювач циркуляційного контуру; 5 – зонт; 6,7 – нагнітачі [115]

Пил для аналізу масою один кілограм був зібраний з металевих поверхонь елементів подрібнювача, які знаходилися вище або на рівні джерела виділення пилу. Дійсна густина пилу визначалася пікнометричним методом [14], її середнє значення становить 2230 кг/м^3 . Дисперсний склад пилу визначався ситовим аналізом (табл. 4.3), за результатами якого було побудовано диференційну криву розподілу пилу (рис. 4.3).

Таблиця 4.3 – Дисперсний склад експериментального пилу [116]

Розмір отворів у ситі, мкм	0–25	25–50	50–63	63–100	100–160
% частинок в складі пилу	16	40	21	22	1

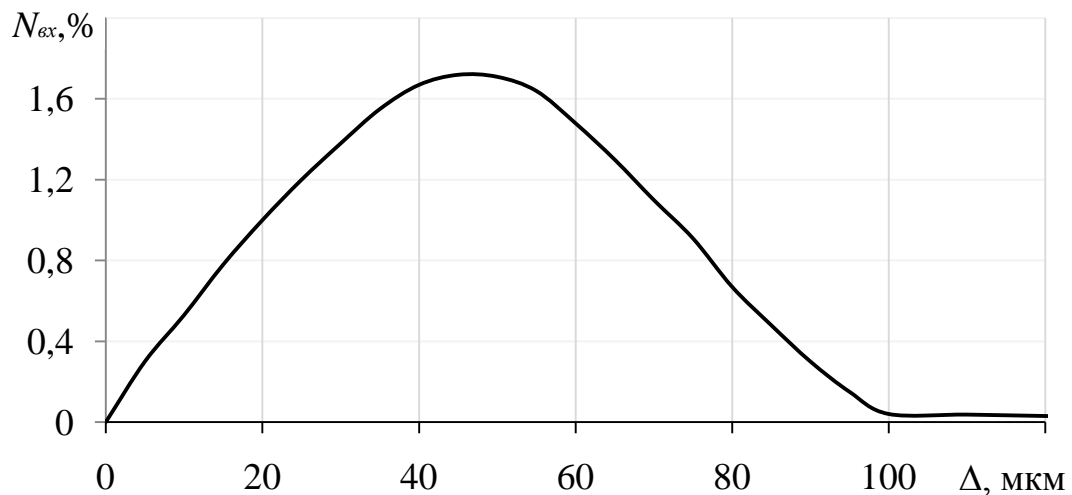


Рисунок 4.3 – Диференційна крива розподілу пилу подрібнення будівельних матеріалів [116]

Основою запропонованого КПА є вентилятор ВЦП-46-5. Об'ємна витрата пилогазового потоку становить $Q_0 = 6 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($1,67 \text{ м}^3/\text{с}$). Вихідний патрубок вентилятора має внутрішні розміри – $a \times b = 347 \times 349 \text{ мм}$, тоді площа його перерізу

$$S = 347 \cdot 349 = 0,12 \text{ м}^2.$$

Середня швидкість пилогазового потоку

$$v_{\text{сер}} = 1,67 / 0,12 = 13,8 \text{ м/с},$$

тоді число Рейнольдса

$$Re = \frac{13,8 \cdot 0,349 \cdot 1,24}{1,94 \cdot 10^{-5}} = 3,01 \cdot 10^5.$$

Товщина щілини для відводу запиленого газового потоку – $c = 34,7$ мм.

Частка повітря, що потрапляє з корпусу нагнітача у бункер, $q_{\text{розд}} = 0,0477$ [116].

Тоді

$$Q_{\text{цирк}} = 1,67 \cdot 0,0477 = 0,08 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ширина бункеру комбінованого пиловловлюючого апарату 1001 мм. Загальна висота бункеру – 1373 мм. За методикою наведеною у п. 3.3 було побудовано парціальну ефективність уловлювання пилу подрібнення будівельного матеріалу від розміру частинок (рис. 4.4).

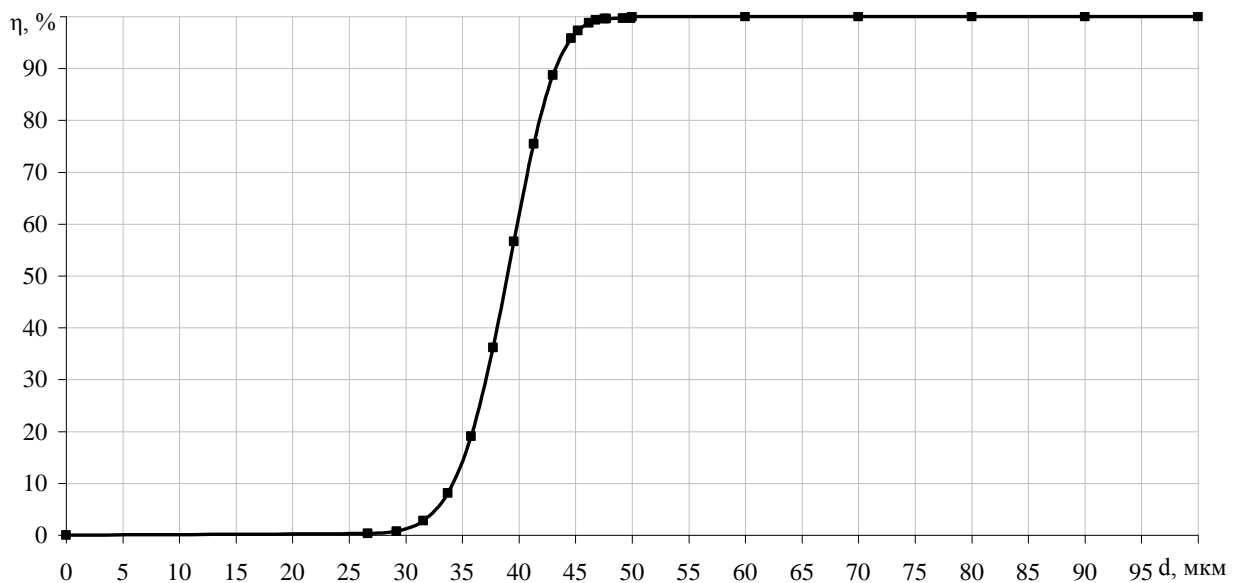


Рисунок 4.4 – Залежність коефіцієнта уловлювання пилу подрібнення будівельних матеріалів від розміру частинок

Для визначення частки пилу, що потрапляє з корпусу нагнітача у бункер ($\eta_{\text{розд}}$) використовуються залежності коефіцієнта розділення пилу подрібнення будівельного матеріалу від розміру частинок (рис. 4.5).

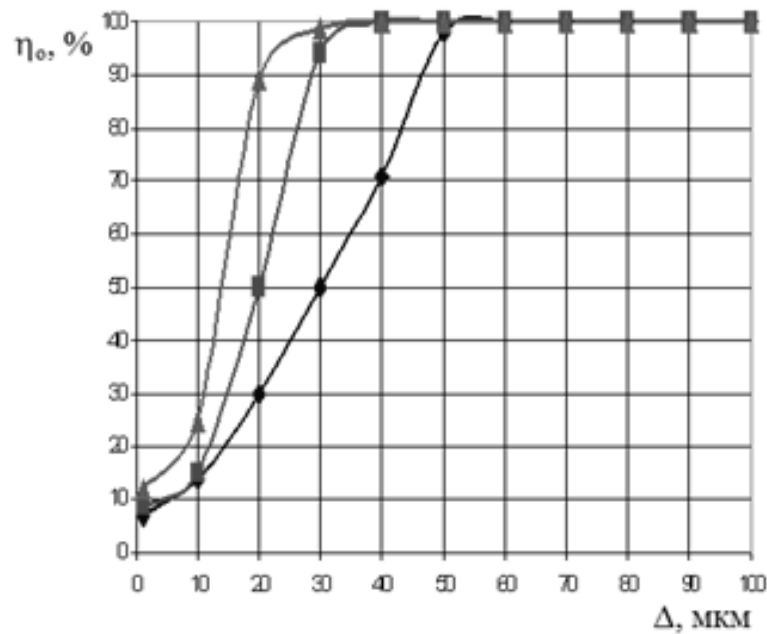


Рисунок 4.5 – Залежність коефіцієнта розділення пилу подрібнення будівельних матеріалів від розміру частинок:

◆ – $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$; ■ – $\rho = 2230 \text{ кг/м}^3$; ▲ – $\rho = 4505 \text{ кг/м}^3$ [116]

Секундну масу пилу умовно приймаємо рівною одиниці і розрахунки проводимо у частках від цієї величини. На початку роботи комбінованого пиловловлюючого апарату (нульовий цикл) до його корпусу потрапляє пил з диференційною кривою розподілу (рис. 4.3):

$$N_{\text{BX}}^5 = 0,0034;$$

$$N_{\text{BX}}^{15} = 0,0077;$$

$$N_{\text{BX}}^{25} = 0,0119;$$

$$N_{\text{BX}}^{35} = 0,0153;$$

$$N_{\text{BX}}^{45} = 0,0173;$$

$$N_{\text{BX}}^{55} = 0,0165;$$

$$N_{\text{BX}}^{65} = 0,0129;$$

$$N_{\text{BX}}^{75} = 0,0089;$$

$$N_{\text{BX}}^{85} = 0,0047;$$

$$N_{\text{BX}}^{95} = 0,0014.$$

До точки відбору повітря у циркулюючий контур надходить запилене повітря з масою пилу за (4.15):

$$M_{5-3}^5 = 0,034;$$

$$M_{5-3}^{15} = 0,077;$$

$$M_{5-3}^{25} = 0,119;$$

$$M_{5-3}^{35} = 0,153;$$

$$M_{5-3}^{45} = 0,173;$$

$$M_{5-3}^{55} = 0,165;$$

$$M_{5-3}^{65} = 0,129;$$

$$M_{5-3}^{75} = 0,089;$$

$$M_{5-3}^{85} = 0,047;$$

$$M_{5-3}^{95} = 0,014;$$

$$M_{5-3}^{\Sigma} = 1.$$

і диференціальною кривою розподілу за (4.16):

$$N_{5-3}^5 = 0,34;$$

$$N_{5-3}^{15} = 0,77;$$

$$N_{5-3}^{25} = 1,19;$$

$$N_{5-3}^{35} = 1,53;$$

$$N_{5-3}^{45} = 1,73;$$

$$N_{5-3}^{55} = 1,65;$$

$$N_{5-3}^{65} = 1,29;$$

$$N_{5-3}^{75} = 0,89;$$

$$N_{5-3}^{85} = 0,47;$$

$$N_{5-3}^{95} = 0,14.$$

За (4.19) і рис 4.5 частка пилу з густиною $\rho = 2230 \text{ кг/м}^3$, що потрапляє з корпусу нагнітача у бункер:

$$\eta_{\text{розд}}^5 = 0,1;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{15} = 0,3;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{25} = 0,74;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{35} = 0,98;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{45} = 0,99;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{55} = 1;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{65} = 1;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{75} = 1;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{85} = 1;$$

$$\eta_{\text{розд}}^{95} = 1.$$

Маса пилу, яка потрапляє до КПА за (4.18):

$$M_{3-4}^5 = 0,0034;$$

$$M_{3-4}^{15} = 0,0231;$$

$$M_{3-4}^{25} = 0,08806;$$

$$M_{3-4}^{35} = 0,14994;$$

$$M_{3-4}^{45} = 0,17127;$$

$$M_{3-4}^{55} = 0,165;$$

$$M_{3-4}^{65} = 0,129;$$

$$M_{3-4}^{75} = 0,089;$$

$$M_{3-4}^{85} = 0,047;$$

$$M_{3-4}^{95} = 0,014;$$

$$M_{3-4}^{\Sigma} = 0,87977.$$

Диференціальна крива розподілу пилу, який потрапляє у бункер КПА за (4.10):

$$N_{3-4}^5 = 0,038646;$$

$$N_{3-4}^{15} = 0,262569;$$

$$N_{3-4}^{25} = 1,000943;$$

$$N_{3-4}^{35} = 1,704309;$$

$$N_{3-4}^{45} = 1,946759;$$

$$N_{3-4}^{55} = 1,87549;$$

$$N_{3-4}^{65} = 1,466292;$$

$$N_{3-4}^{75} = 1,011628;$$

$$N_{3-4}^{85} = 0,534231;$$

$$N_{3-4}^{95} = 0,159133.$$

За (4.22) і рис. 4.4 частка пилу, що осаджується у бункер:

$$\begin{aligned}\eta_{\text{улов}}^5 &= 0; \\ \eta_{\text{улов}}^{15} &= 0; \\ \eta_{\text{улов}}^{25} &= 0; \\ \eta_{\text{улов}}^{35} &= 0,14; \\ \eta_{\text{улов}}^{45} &= 0,97; \\ \eta_{\text{улов}}^{55} &= 1; \\ \eta_{\text{улов}}^{65} &= 1; \\ \eta_{\text{улов}}^{75} &= 1; \\ \eta_{\text{улов}}^{85} &= 1; \\ \eta_{\text{улов}}^{95} &= 1.\end{aligned}$$

В бункері уловлюється пил масою за (4.21):

$$\begin{aligned}M_{4-4}^5 &= 0; \\ M_{4-4}^{15} &= 0; \\ M_{4-4}^{25} &= 0; \\ M_{4-4}^{35} &= 0,020992; \\ M_{4-4}^{45} &= 0,166132; \\ M_{4-4}^{55} &= 0,165; \\ M_{4-4}^{65} &= 0,129; \\ M_{4-4}^{75} &= 0,089; \\ M_{4-4}^{85} &= 0,047; \\ M_{4-4}^{95} &= 0,014; \\ M_{4-4}^{\Sigma} &= 0,631124.\end{aligned}$$

У корпус нагнітача повертається пил масою за (4.23):

$$\begin{aligned}M_{4-5}^5 &= 0,0034; \\ M_{4-5}^{15} &= 0,0231; \\ M_{4-5}^{25} &= 0,08806; \\ M_{4-5}^{35} &= 0,128948; \\ M_{4-5}^{45} &= 0,005138; \\ M_{4-5}^{55} &= 0;\end{aligned}$$

$$M_{4-5}^{65} = 0;$$

$$M_{4-5}^{75} = 0;$$

$$M_{4-5}^{85} = 0;$$

$$M_{4-5}^{95} = 0;$$

$$M_{4-5}^{\Sigma} = 0,248647.$$

і диференціальною кривою розподілу за (4.24):

$$N_{4-5}^5 = 0,13674;$$

$$N_{4-5}^{15} = 0,92903;$$

$$N_{4-5}^{25} = 3,541574;$$

$$N_{4-5}^{35} = 5,186013;$$

$$N_{4-5}^{45} = 0,206643;$$

$$N_{4-5}^{55} = 0;$$

$$N_{4-5}^{65} = 0;$$

$$N_{4-5}^{75} = 0;$$

$$N_{4-5}^{85} = 0;$$

$$N_{4-5}^{95} = 0.$$

На вихід з КПА за (4.25) направляється повітря з масою пилу $M_{\text{вих}} = 0,12023$.

У наступному циклі за (4.15) маса проскоку M_{4-5} додається до маси пилу яка потрапляє у КПА від джерела виділення пилу $M_{\text{вих}}$:

$$M_{5-3}^5 = 0,0374;$$

$$M_{5-3}^{15} = 0,1001;$$

$$M_{5-3}^{25} = 0,20706;$$

$$M_{5-3}^{35} = 0,281948;$$

$$M_{5-3}^{45} = 0,178138;$$

$$M_{5-3}^{55} = 0,165;$$

$$M_{5-3}^{65} = 0,129;$$

$$M_{5-3}^{75} = 0,089;$$

$$M_{5-3}^{85} = 0,047;$$

$$M_{5-3}^{95} = 0,014;$$

$$M_{5-3}^{\Sigma} = 1,248647.$$

Далі розрахунки ведуться подібно до нульового циклу. Кількість розрахункових циклів буде обумовлюватися певним значенням, при досягненні якого зміна параметрів буде зникаюче малою.

Результати розрахунку динаміки експлуатаційних характеристик КПА за методикою наведеною в п. 4.3, наведені на рис. 4.6–4.10, де час проходження пилогазового потоку вздовж циркуляційного контуру виділено в окремий цикл.

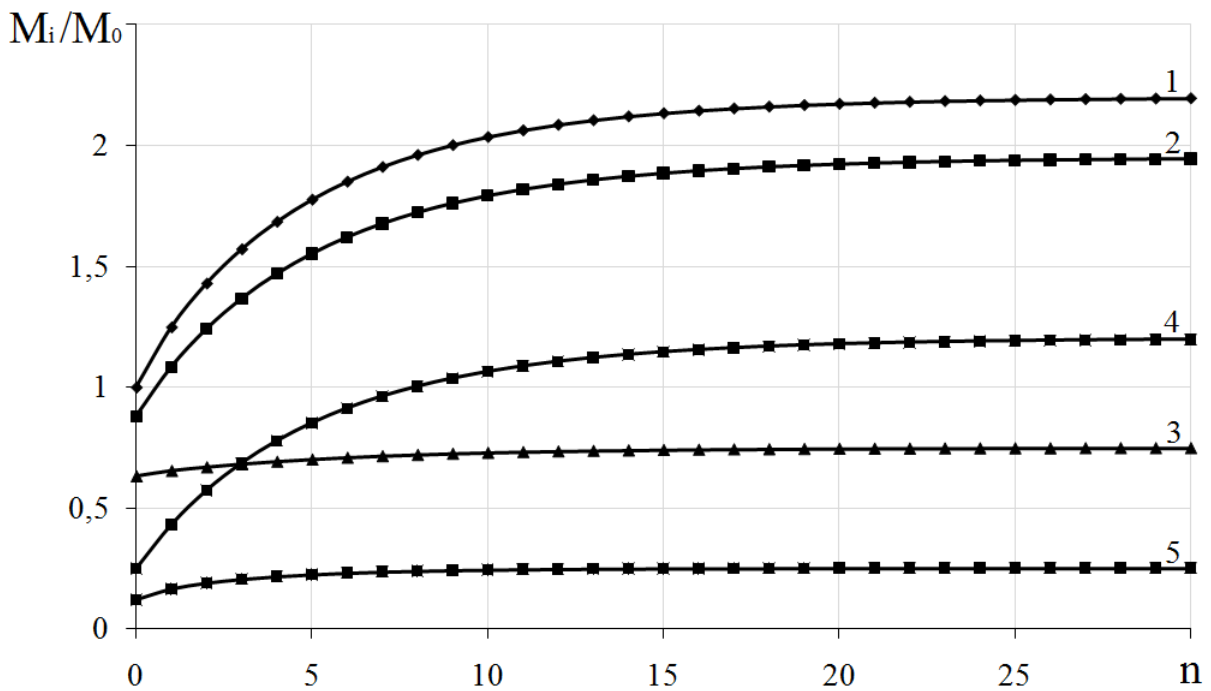


Рисунок 4.6 – Динаміка зміни відносних мас: 1 – маса пилу, що знаходиться у корпусі нагнітача (M_{5-3}); 2 – маса пилу, що надходить з корпусу нагнітача у пилозбірний контейнер (M_{3-4}); 3 – маса пилу, що осаджується у пилозбірному контейнері (вловлена маса, M_{4-4}); 4 – маса пилу, яка надходить з пилозбірного контейнеру у корпус нагнітача (маса проскоку, M_{4-5}); 5 – маса пилу, яка виходить з КПА ($M_{\text{вих}}$); n – цикл проходження пилогазового потоку вздовж циркуляційного контуру

Аналізуючи динаміку зміни відносних мас на рис. 4.6 можна виділити два періоди роботи КПА: у 1–15 циклах відбувається поступова зміна показників

(час розгону), у циклах 15–30 – значення показників майже сталі (час стабілізованої роботи). Також у межах цих циклів спостерігаються відповідно найбільші коливання у дисперсному складі пилової маси і їх поступове зникнення (рис. 4.8–4.10).

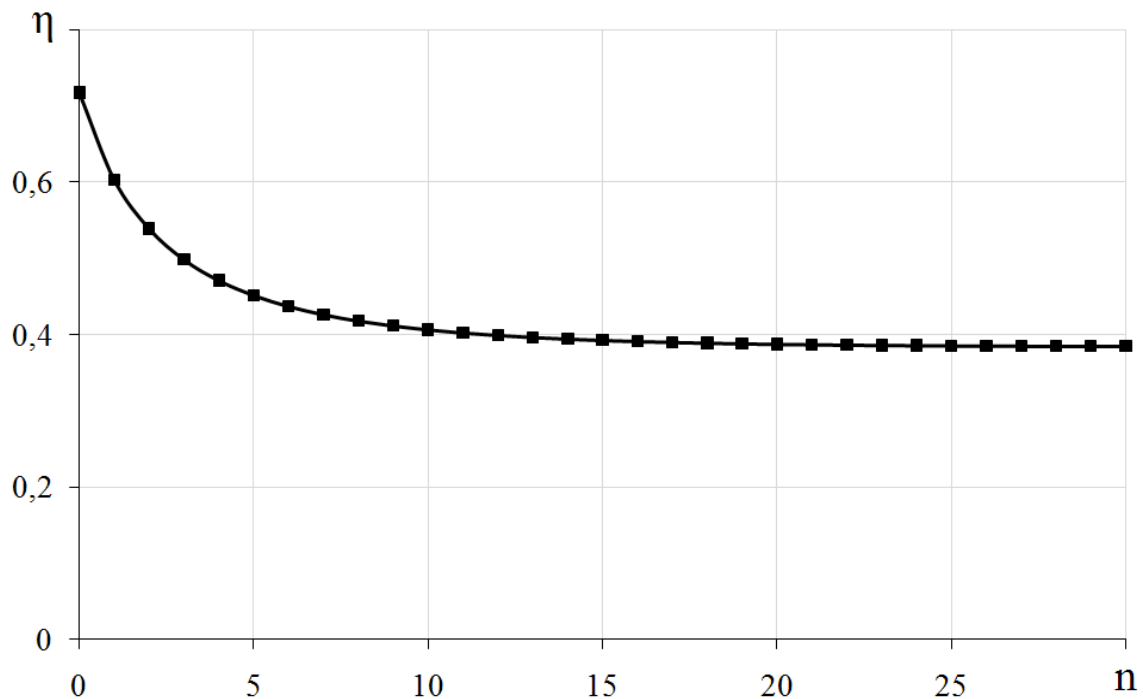


Рисунок 4.7 – Динаміка зміни ефективності осадження пилу у бункері:
 n – цикл проходження пилогазового потоку вздовж циркуляційного контуру

Аналіз динаміки зміни ефективності осадження пилу у бункері КПА рис. 4.7 показав, що коефіцієнт уловлювання протягом часу розгону зменшується з 0,71 до 0,38. Таке зниження обумовлено тим, що у кожному наступному циклі зростає кількість дрібних пилових частинок, які потрапляють з завитку нагнітача до бункеру. В період стабілізованої роботи пиловловлювача значення коефіцієнта уловлювання залишаються майже незмінними.

Для оцінювання змін, які відбуваються з фракційним складом пилу у КПА на рис. 4.8–4.10 наведена ДКР вихідного пилу.

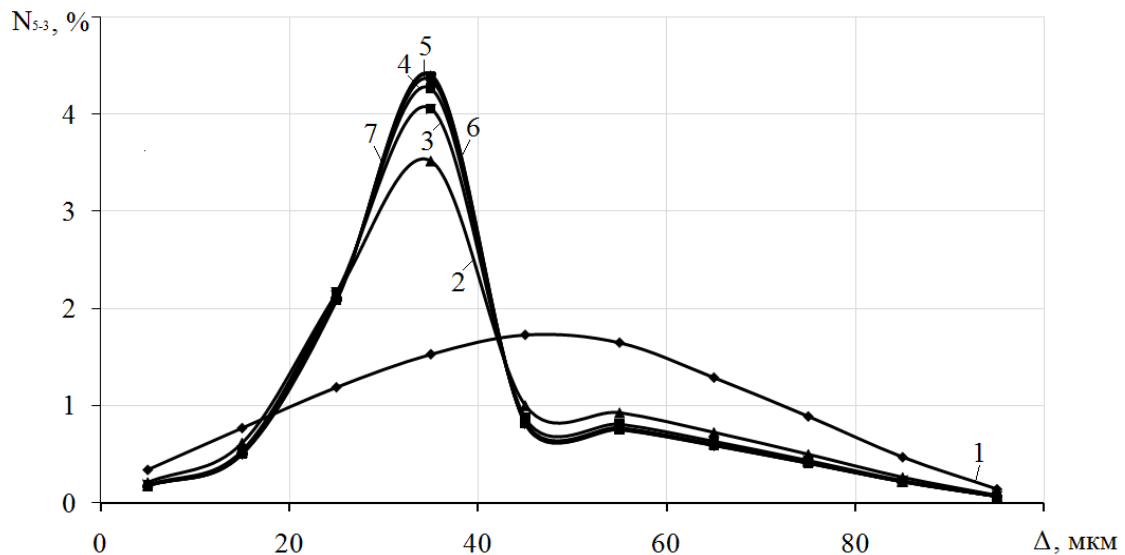


Рисунок 4.8 – Диференціальні криві розподілу маси пилу у корпусі нагнітача: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 цикли проходження пилогазового потоку вздовж циркуляційного контуру

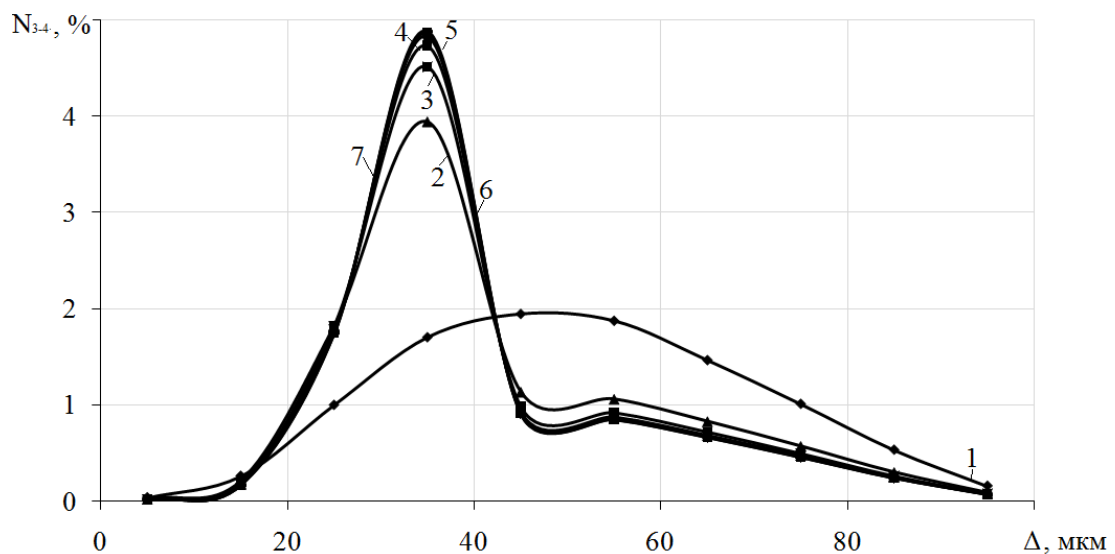


Рисунок 4.9 – Диференціальні криві розподілу маси пилу, який потрапляє у пилосбірний контейнер: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 цикли проходження пилогазового потоку вздовж циркуляційного контуру

Фракційний склад пилу в корпусі нагнітача (рис. 4.8) змінюється в сторону збільшення кількості пилових частинок розміром 35 мкм. Це відбувається вже на п'ятому циклі і постійно зникає після 15 циклу.

Одночасно з цим спостерігається незначне зменшення кількості пилових частинок розміром менше 20 мкм.

Фракційний склад пилу, який потрапляє у пилозбірний контейнер (рис. 4.9) змінюється в сторону збільшення кількості пилових частинок розміром 35 мкм. Це відбувається на п'ятому циклі і постійно зникає після 15 циклу. Одночасно з цим спостерігається незначне зменшення кількості пилових частинок розміром менше 15 мкм.

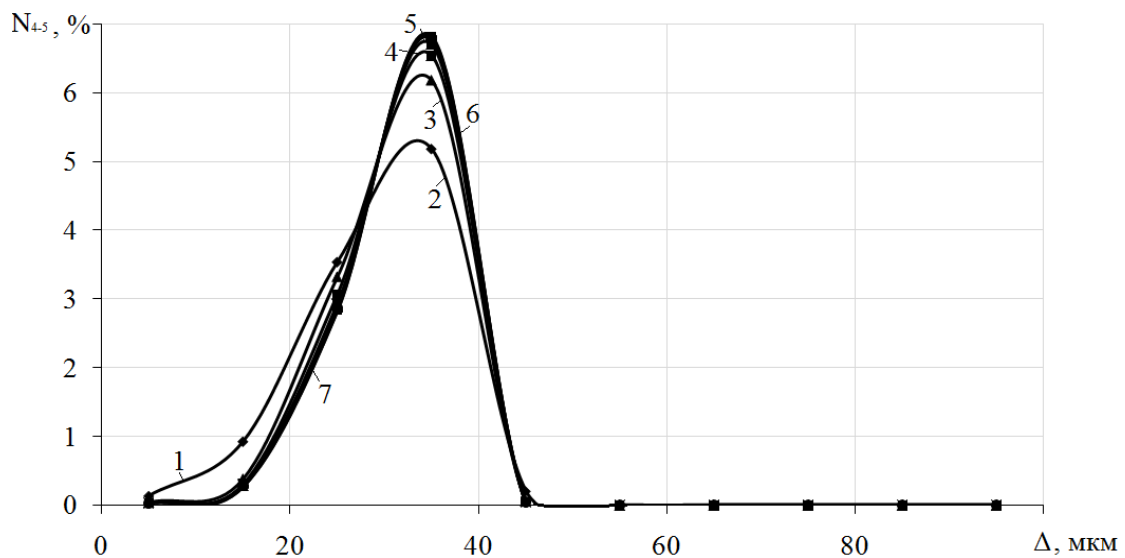


Рисунок 4.10 – Диференціальні криві розподілу маси пилу, який надходить з пилозбірного контейнеру у корпус нагнітача: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 – 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 цикли проходження пилогазового потоку вздовж циркуляційного контуру

Фракційний склад пилу, який надходить з пилозбірного контейнеру у корпус нагнітача (рис. 4.10) змінюється в сторону збільшення кількості пилових частинок розміром 35 мкм. і незначним зменшенням кількості пилових частинок розміром 25 мкм і менше. При цьому пил з розміром частинок більше 45 мкм повністю вловлюється у бункері КПА. Пил менших фракцій може бути вловлений за рахунок кількаретового проходження ними циркуляційного контуру.

Основні результати досліджень розділу 4 опубліковані в [117–119].

4.5 Висновки до розділу 4

1. На основі узагальнення результатів фізичного експерименту отримано залежність для визначення корисного об'єму бункеру КПА залежно від технологічних і фізико-механічних параметрів пилогазового потоку.

2. За допомогою диференційної кривої розподілу пилу и парціальної ефективності розділення і уловлювання, розроблено методику розрахунку експлуатаційних показників КПА.

3. За наведеними методиками спроектовано КПА для доочищення пилових викидів системи аспірації приміщення подрібнення будівельних матеріалів ООО «Енергосервіс», який надав можливість знизити кількість дрібнодисперсного пилу у повітрі, що викидається в атмосферу основною системою аспірації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі узагальнення результатів теоретичних та експериментальних наукових досліджень подано розв'язання актуального науково-практичного завдання з удосконалення технологічного процесу та устаткування сухого очищення повітря від полідисперсного пилу за рахунок застосування циркулюючих схем, що у сукупності забезпечує підвищення рівня екологічної безпеки завдяки зменшенню викидів пилоподібних речовин в атмосферне повітря. Зокрема:

1. Визначено, що перспективним засобом боротьби із забрудненням атмосферного повітря твердофазними речовинами є застосування циркулюючих систем очистки пилогазових потоків від промислового пилу. Показано, що застосування циркулюючих схем є одним з варіантів створення маловідходних технологій, що дозволяє виключити втрати готової продукції, а також суттєво знизити рівень екологічної небезпеки, сформованої надходженням полідисперсного пилу до атмосферного повітря за рахунок зменшення обсягів викидів.

2. Запропоновано конструкцію пиловловлюючого апарату з використанням відцентрового нагнітаючого обладнання для концентрації, коагуляції та вилучення з пилогазового потоку дрібнодисперсного пилу. Конструкція пиловловлюючого апарату отримана шляхом внесення змін до схеми промислового димососа-пиловловлювача з якої виключено циклон, а нагнітач поєднано з пилозбірним контейнером – бункером. Встановлено, що відцентровий нагнітач у такій схемі виконує подвійну роль – нагнітання пилогазового потоку та сепарації пилу.

3. Проведено математичне моделювання течії пилогазового потоку у криволінійному каналі з кутом повороту 180° з метою оцінювання доцільності використання як елемента для концентрації пилової маси у комбінованому пиловловлюючому апараті. За результатами моделювання аеродинаміки конфузотно-дифузотно криволінійного каналу із замкнутим контуром

встановлено, що за рахунок інтенсивного прискорення течії потоку до середини повороту і таке ж інтенсивного його уповільнення у другій частині повороту, утворюється «застійна зона», яка обумовлює більш ефективну сепарацію пилу порівняно з каналом постійного перерізу.

4. Визначено ефективність розподілу аерозолі в пиловловлюючій системі при різних варіантах компонування її елементів. На основі аналізу графів стану запиленого потоку повітря у системах знепилювання встановлено більшу ефективність циркулюючих систем порівняно з прямоточними, що досягається за рахунок зміни фракційного складу пилу внаслідок його коагуляції у нагнітачі. Доведено доцільність поєднання відцентрової сепарації та гравітаційного осадження в одному пиловловлювачі для очищення повітря від пилу дрібних фракцій.

5. Доведено ефективність запропонованої конструкції КПА за результатами фізичного моделювання на експериментальному стенді. Встановлено, що КПА може бути використаний як самостійний уловлювач у циркулюючих системах аспірації або як додатковий елемент у існуючих системах знепилення промислових газів для їх доочищення. Впровадження пиловловлюючого апарату не потребує значних капіталовкладень, а його експлуатація та обслуговування не висуває особливих вимог до кваліфікації персоналу.

6. Розроблено рекомендації з розрахунку основних конструктивних параметрів та експлуатаційних характеристик запропонованої конструкції КПА, а саме – динаміки зміни відносних мас, ефективності очищення, диференціальних кривих розподілу пилової маси. На основі узагальнення результатів фізичного експерименту отримано залежність для визначення корисного об'єму бункеру пиловловлюючого апарату залежно від технологічних і фізико-механічних параметрів пилогазового потоку.

Одержані наукові результати і практичні рекомендації використовуються в процесі доочищення пилових викидів системи аспірації приміщення подрібнення будівельних матеріалів ТОВ «Енергосервіс» (м. Одеса), а також,

реалізуються у навчальному процесі підготовки фахівців-екологів на кафедрі прикладної екології та гідрогазодинаміки ОНПУ під час вивчення навчальних дисциплін «Техноекологія» та «Охорона повітря», а також – виконання курсового та дипломного проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Белоусов В. В. Теоретические основы процессов газоочистки. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
2. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
3. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2015 році. К.: Міністерство екології та природних ресурсів України, ФОР Грін Д.С. 2017. 308 с.
4. Статистичний збірник. Довкілля України за 2016 рік. Державна служба статистики України / За редакцією О. М. Прокопенко. 226 с. URL: [http:// www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua) (дата звернення 19.02.2018 р.)
5. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2017 році. Київ: Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського, 2018. 50 с.
6. Рекомендации ВООЗ по качеству воздуха, касающиеся твердых частиц, озона, двуокиси азота и двуокиси серы. Глобальные обновленные данные. Всемирная организация здравоохранения, 2006 г. 28 с.
7. Ветошкин А. Г. Процессы и аппараты газоочистки: учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. 201 с.
8. Ветошкин А. Г. Процессы и аппараты пылеочистки: учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 210 с.
9. Ветошкин А. Г. Процессы инженерной защиты окружающей среды (теоретические основы): учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. 325 с.
10. Молчанов Б. С. Проектирование промышленной вентиляции. Ленинград: Стройиздат. Ленинградское отделение, 1970. 239 с.
11. Шмандій В. М., Климец В. В., Бахарев В. С. Зменшення рівня екологічної небезпеки від пилових викидів зернових елеваторів. *Екологічна безпека*. 2014. № 1. С. 103–108.

12. Юрченко В. О., Пономарьов К. С. Дослідження дисперсного складу пилу кондитерських підприємств. *Екологічна безпека*. 2017. № 2(24). С. 32–38.
13. Зиганшин М. Г., Колесник А. А., Посохин В. Н. Проектирование аппаратов пылегазоочистки. М. : «Экспресс–ЗМ», 1998. 505 с.
14. Методы анализа загрязнений воздуха / Другов Ю. С., Беликов А. Б., Дьякова Г. А., Тульчинский В. М. М.: Химия, 1984. 384 с.
15. Охрана труда в химической промышленности. Изд. 3-е. / Соловьев Н. В., Стрельчук Н. А., Ермилов П. И., Канер Б. Л.; под ред. Канера. М.: Химия, 1966. 527 с.
16. Тихомиров К. В. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 272 с.
17. Батлук В. А., Романцов Е. В., Стець Р. Є. Зниження концентрації пилу при роботі термопласавтоматів. *Промислова гідравліка і пневматика: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, 18–19 вересня 2013 р., м. Одеса. Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2013. С. 119–120.*
18. Батлук В. А., Козира І. М., Сукач Р. Ю. Покращення екологічної обстановки в процесах виготовлення торф'яних брикетів. *Промислова гідравліка і пневматика: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, 18–19 вересня 2013 р., м. Одеса. Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2013. С. 115–116.,*
19. Батлук В. А., Проскурина И. В. Решение современных проблем очистки воздуха в коксохимическом производстве. *Сборник трудов Донбасского государственного технического университета*. Алчевск, 2007. Вып. 24. С. 156–162.
20. Батлук В. А., Климец В. В., Мірус О. Л.. Створення пиловловлювача для зернопереробних підприємств. *Промислова гідравліка і пневматика: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, 18–19 вересня 2013 р., м. Одеса. Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2013. С. 113–114.*
21. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. Значение для разработки политики в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной

Азии. Всемирная организация здравоохранения. Европейское региональное бюро. 2013. 16 с.

22. Національна доповідь «Цілі Сталого Розвитку: Україна». Міністерство економічного розвитку і торгівлі, 2017. URL: http://www.un.org.ua/images/SDGs_NationalReportUA_Web_1.pdf 19.02.2018 р.) (дата звернення 19.02.2018 р.)

23. Бошняков Е. Н. Аспирационно-технологические установки предприятий цветной металлургии. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1987. 160 с.

24. Василевский М. В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 258 с.

25. Квашнин И. М. Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация. М. : АВОК-ПРЕСС, 2005. 392 с.

26. Богуславский К. Н. Общие системы аспирации от «Горлушка». *Деревообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2009. № 2. С. 58–59.

27. Уайт П., Смит С. Высокоэффективная очистка воздуха / Пер. с англ. М: Атомиздат, 1967. 311 с.

28. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / Юрьев А. С. и др.; под ред. А. С. Юрьева. С.Пб.: АНО НПО «Мир и семья», 2001. 1154 с.

29. Глебов И. Т. Подъемно-транспортные машины отрасли. Лекции и методы решения задач по аспирации и пневмотранспорту деревообрабатывающих предприятий: Учебное пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2009. 109 с.

30. Бутенко А. Г., Силин А. В. Разработка улавливающего устройства твердых частиц в замкнутой системе очистки воздуха. *Энергетика и электрификация*. 2007. № 3. С. 29–31.

31. Бутенко А. Г., Силин А. В. Замкнутая система очистки газа с обогащающими элементом. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2008. № 5. С. 61–64.

32. Бутенко А. Г., Осипенко Е. В., Силин А. В. Оценка эффективности двухконтурной замкнутой системы очистки газа (воздуха). *Экология и промышленность*. 2008. № 3. С. 53–57.

33. Буров О. О. Багатоканальний відцентровий золопилловловлювач для аспірації теплоенергетичного обладнання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.14.06. Одеса, 2002. 19 с.

34. Возможности использования замкнутой по газу системы обеспыливания для объекта «Укрытие» / Буров А. А., Буров А. И., Савельева О. С., Становский А. Л. *Ядерная и радиационная безопасность*. Одесса, 1999. Том.2. Вып.3. С. 77.

35. Возможные варианты обеспыливания объекта «Укрытие» / Балан С. А., Буров А. А., Буров А. И., Гамолич В. Я. *Ядерная и радиационная безопасность*. Одесса, 2000. Вып. 4. С. 43–44.

36. Об эффективности замкнутых систем обеспыливания / Балан С. А. и др. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2002. спецвыпуск. С. 9–13.

37. Серебрянский Д. О. Підвищення ефективності газоочистки теплових енергетичних установок. : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.14.06. Одеса, 2004. 19 с.

38. Алиев Г. М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. М. : Металлургия, 1986. 544 с.

39. Справочник по пыле- и золоулавливанію. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Биргер М. И. и др.; под общ. ред. А. А. Русанова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

40. Ветошкин А. Г. Защита литосферы от отходов. учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 189 с.

41. Банит Ф.Г., Мальгин А.Д. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов. М.: Строиздат, 1979. 352 с.
42. Русанов А. А., Урбах И. И., Анастасиади А. П. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике. М.: Энергия, 1969. 456 с.
43. Буров А. И. Гидравлика стратифицированных криволинейных течений в аппаратах с обратными связями: автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра. техн. наук. Л. : 1991. 38 с.
44. Коузов П. А, Мальгин А. Д., Скрыбин Г. М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Л.: Химия, 1982. 256 с.
45. Вплив бункера на ефективність уловлення пилу / Батлук В. А., Батлук В. В., Мота Я. В., Шибанов С. В. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2008. № 609: Хімія, технологія речовин та їх застосування. С. 204–207.
46. Вплив бункера на ефективність уловлення пилу / Батлук В. А., Батлук В. В., Макаруч В. Г., Проскуріна І. В. *Поліграфія і видавнича справа*. 2008. № 2 (48): Машинобудування та автоматизація. С. 132–141.
47. Центробежная очистка промышленных выбросов в атмосферу / Буров А. А., Буров А. И., Силин А. В., Цабиев О. Н. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2005. № 6. С. 44–51.
48. Пирумов А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. М.: Госстройиздат, 1961. 124 с.
49. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 5-е, стер. М. : Химия, 1968. 846 с.
50. Карпухович Д. Т. Исследование промышленных установок дымососов-золоуловителей Д-12 на электропоездах. *Механическая очистка промышленных газов*. М.: НИИОГАЗ, Машиностроение, 1974. С. 44– 60.
51. Ужов В. Н., Мягков Б. Н. Очистка промышленных газов фильтрами. М. : Химия, 1970. 319 с.
52. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. М. : Химия, 1975. 216 с.

53. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 296 с.
54. Бажанова В. В. Исследование кориолисовых вентиляторов-пылеотделителей. *Очистка воздуха от пыли*. М.: Стройиздат, 1966. № 19. С. 45–69.
55. Женишек Н.Н. Ротационные пылеотделители. М.: Промстройиздат, 1958. 67 с.
56. Карпухович Д. Т. Улиточные пылеуловители. *Водоснабжение и санитарная техника*. 1972. № 7. С. 28–31.
57. Страус В. Промышленная очистка газов / Пер. с англ. М.: Химия, 1981. 617 с.
58. Карамушко А. В., Гамолич В. Я., Буров А. А. Сравнительная оценка результатов промышленных испытаний циклонов «СИОТ» и многоканальных пылеуловителей «БУРАН». *Праці Одеського політехнічного університету*. 2012. №1 (38). С. 271–275.
59. Dominic Barone, Eric Loth, Philip Snyder. Influence of particle size on inertial particle separator efficiency. *Powder Technology*. 2017. Vol. 318. P. 177–185. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.04.044
60. Michail Vasilevsky, Aleksandr Razva, Alissa Pleschko, Ivan Kadurkin. The Calculated Ratio of the Gas Flow in a Countercurrent Cyclone Dust Concentrator. EPJ Web of Conferences. *Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015*. 2016. Vol. 110. P. 4. DOI: 10.1051/epjconf/201611001065
61. Pranas Baltrėnas, Diana Platova. Experimental analysis of the six-channel cyclone with spiral shell. *Environmental Technology*. 2016. Vol. 37. Issue 6. P. 652–661. DOI: 10.1080/09593330.2015.1077271
62. Žilvinas Venckus, Albertas Venslovas, Mantas Pranskevičius. Experimental research into aerodynamic parameters of a cylindrical one-level 8-channel cyclone. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2014. Vol. 22. Issue 4. P. 284–291. DOI: 10.3846/16486897.2014.973415

63. Baltrėnas P., Chlebnikovas A. Investigation into the Aerodynamic Parameters of the Recently Designed Two-Level Cylindrical Multi-Channel Cyclone-Separator. *Separation Science and Technology*. 2015. Vol. 50. Issue 8. P. 1257–1269. DOI: 10.1080/01496395.2014.9677749–12]

64. Jinpei Y., Liqi C., Linjun Y. Combined effect of acoustic agglomeration and vapor condensation on fine particles removal. *Chemical Engineering Journal*. 2016. Issue 290. P. 319–327. DOI: 10.1016/J.CEJ.2016.01.075

65. Deshuai S., Xiaodong Z., Long F. Coupling effect of gas jet and acoustic wave on inhalable particle agglomeration. *Journal of Aerosol Science*. 2013. Issue 66. P. 12–23. DOI: 10.1016/J.JAEROSCI.2013.08.008

66. Markauskas D., Kačianauskas R., Maknickas A. Numerical particle-based analysis of the effects responsible for acoustic particle agglomeration. *Advanced Powder Technology*. 2016. Issue 26, P. 698–704. DOI: 10.1016/J.APT.2014.12.008.

67. Dong Z., Zhongyang, L. Jianping J., & et al. Experimental study on improving the efficiency of dust removers by using acoustic agglomeration as pretreatment. *Powder Technology*. 2016. Issue 289, P. 52–59. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.11.009]

68. Butenko A. G., Smyk S. Y. Technology combined cleaning polydisperse airflow. *Industrial ecology*. 2014. Issue 4. P. 37–41.

69. Butenko O.G., Smyk S.Y. Assessment of cleaning efficiency of the polydisperse gas flow in double-flow dedusting system. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*. 2016. Issue 1(48). P. 49–53. DOI: 10.15276/opu.1.48.2016.09

70. Lamingerb T., Höflingerb W. Experimental study on particle removal with gas-liquid cross-flow array system. *Separation and Purification Technology*. 2017. Issue 174, P. 194–202. DOI: 10.1016/J.SEPPUR.2016.10.021

71. Сепарация и фильтрация газовых выбросов в атмосферу / Буров А. А. та ін. *Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии*. 2013. № 2. С. 12–17. DOI:10.23877/MS.TS.15.002

72. Буров О. О., Буров О. И., Винограденко Л. В. Знепилювання газових викидів сушильної установки. *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*. 2014. № 74. С. 140–143.

73. Буров А. И. Промышленное испытание низконапорных инерционных пылеуловителей на Барнаульском заводе технического углерода. *Проблемы охраны окружающей среда в районах с интенсивно развивающейся промышленностью: тезисы докладов I республиканской конференции*. Кемерово, 1979. С. 44–45.

74. Шопин В. М. Исследование процессов осаждения сажевого аэрозоля в производстве активного и полуактивного технического углерода : автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук. Л., 1975. 18 с.

75. Буров А. И., Жолос А. И., Лысенко. А. С. Промышленное испытания разделителя аэрозолей с поворотом воздушного потока на 180° вокруг вертикальной оси. *Тр. АПИ*. Барнаул, 1974. Вып. 49. С. 3–7.

76. Буров А. А., Буров А. И. Фильтр с обратными связями. *Перспектива XXI : материалы региональной научно-технической выставки вузов г. Одессы*. Одесса, 1996. С. 52.

77. Буров А. А., Буров А. И., Становский А. Л. Пылеулавливание клинкера после электрофильтра. *Моделирование в материаловедении: материалы 37-го семинара*. Одесса, 1998. С. 124.

78. Моделирование процесса пылеулавливания в системе пневмотранспорта цемента / Буров А. А., Буров А. И., Назарчук А. К., Эннан А. А. *Моделирование в материаловедении: материалы международного семинара*. Одесса, 1995. С. 8.

79. Пылеулавливание при пневмотранспорте сухого молока / Буров А. А., Левин А. П., Назарчук А. К., Торчинский В. П. *Применения вычислительной техники и математического моделирования в прикладных научных исследованиях: материалы второго городского семинара*. Одесса, 1995. С. 29.

80. Гупта А., Лили Д., Сайред Н. Закрученные потоки / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 588 с.

81. Бир С. Кибернетика и управление производством. М. : Госиздат физ.-мат. литературы, 1963. 275 с.
82. Маслов В. Е. Пылеконцентраторы в топочной технике. М.: Энергия, 1977. 207 с.
83. Певнев А. О. Экспериментальное исследование распределения угольной пыли в криволинейных воздушно-пылевых потоках. *Обогащение неметаллических полезных ископаемых*. Свердловск, 1976. Вып. 1. С. 150–154.
84. Балан С. А., Буров А. А., Буров А. И. Распределение пыли вдоль границы криволинейного потока с замкнутыми контурами. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2000. Вып. 2 (11). С. 56–59.
85. Буров А. А., Буров А. И., Гамолич В. Я. Континуальная модель запыленного криволинейного течения газа. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2007. Вып. 1 (27). С. 235–237.
86. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение, 1976. 502 с.
87. Тананаев А. В. Течения в каналах МГД-устройств. М.: Атомиздат, 1979. 364 с.
88. Буров А. А. Поворот газового потока с замкнутым контуром. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2010. Вып. 1 (33)–2 (34). С. 209–213.
89. Буров А. А., Гамолич В. Я., Карамушко А. В. Обеспыливание изолированного пространства. *Труды Одесского политехнического университета*. Одесса, 2006. Вып. 1 (25). С. 36–40.
90. Дж. Кемени, Дж. Снелл. Конечные цепи Маркова. М. : Наука, 1970. 272 с.
91. Буров А. А., Буров А. И., Карамушко А. В. Воздушное течение в криволинейном канале. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одесса, 2009. Вып. 2 (32). С. 174–177.
92. Буров А. А., Буров А. И., Карамушко А. В. Тепломассоперенос в криволинейном потоке вязкого газа. *Современная наука: исследования, идеи*,

результаты, технологи: сб. науч. ст. Киев: НПВК «Триакон», 2009. Вып. 1(1). С. 91–93.

93. Карамушко А. В., Гамолич В. Я., Буров А. А. Сравнительный анализ открытой и замкнутой обеспыливающих систем. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2011. Вып. 1(35). С. 185–189.

94. Буров А. А., Вишнякова Н. В., Карамушко А. В. Обеспыливание транзитных и циркулирующих воздушных потоков. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2011. Вып. 40. Том. 2. С. 367–371 .

95. Буров А. А., Карамушко А. В., Максимовская Е. С. Криволинейные каналы в системе с замкнутыми контурами. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологи*: сб. науч. ст. Киев: НПВК «Триакон», 2011. Вып. 3(8). С. 30–33.

96. Буров О. О., Буров О. І., Карамушко А. В. Вільний рух частки у криволінійному каналі. *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*. Одеса, 2012. Вып. 63. С. 140–143.

97. Сепарация и фильтрация газовых выбросов в атмосферу / Буров А. А. и др. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологи*: сб. науч. ст. Днепропетровск: НПВК «Триакон», 2013. Вып. 2(13). С. 12–17.

98. Карамушко А. В., Буров А. А., Буров А. И. Предотвращение потерь готового продукта и загрязнения окружающей среды. *Екологія міст та рекреаційних зон*: тези докл. всеукр. наук.-практ. конф., 3–4 червня 2010 р. Одеса: Інноваційно-інформаційний центр «ІНВАЦ», 2010. С. 154–157.

99. Карамушко А. В. Ресурсосбережение и повышение экологической безопасности топливного хозяйства ТЭС. *Проблемы теплоэнергетики*: сб. науч. тр. по материалам XII межд. науч.-технич. конф., 29–31 октября 2014 г. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2014. Вып. 3. С. 302–306.

100. Арсирий В. А., Карамушко А. В., Кравченко В. О. Улучшение экологических показателей энергетических систем с использованием визуализации потоков. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов*

енергетики: сборник трудов. К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2018. С. 151–155.

101. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидропередач: учебное пособие для машиностроительных вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. С. С. Руднева, Л. Г. Подвидза. М.: Машиностроение, 1974. 416 с.

102. Грабовский А. М., Цабиев О. Н. Гидравлика и нагнетатели : учеб. пособие. К.: УМК ВО, 1992. 288 с.

103. Коузов П. А., Скрыбина Л. Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. Л.: Химия, 1983. 143 с.

104. Швыдкий В. С. Ладыгичев М. Г. Очистка газов: справочное издание. М.: Теплоэнергетик, 2002. 640 с.

105. Очистка воздуха и дымовых газов от пыли огарка / Буров А. А. и др. *Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов*: сб. науч. статей XVI Международной научно-практической конференции. Т.1. УкрГНТЦ «Энергосталь». Харьков, 2008. С. 404–409.

106. Буров А. А. Эксплуатация буранов на металлургическом заводе. *Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов* : сб. науч. статей XVI Междунар. науч.-практ. конф. Т.1. УкрГНТЦ «Энергосталь». Харьков, 2008. С. 410–414.

107. Буров А. А., Толкач В. А. Система каналов с замкнутыми контурами и вертикальной осью вращения газового потока. *Охорона навколишнього середовища промислових районів як умова сталого розвитку України* : матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. Запоріжжя, 2010. С. 26–29.

108. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 700 с.

109. Карамушко А. В., Гамолитч В. Я., Буров А. А. Сравнительная оценка результатов промышленных испытаний циклонов «СИОТ» и многоканальных

пылеуловителей «БУРАН». *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2012. Вып. 1 (38). С. 271–275.

110. Карамушко А. В. Повышение эффективности аспирации технологического оборудования. *Промислова гідравліка і пневматика: матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, 18–19 вересня 2013 р., м. Одеса*. Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2013. С. 67.

111. Карамушко А. В., Буров О. О. Підвищення екологічної безпеки паливного господарство ТЕС за рахунок використання закритої системи аспірації. *Матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», 5–7 жовтня 2016 р. Одеса, 2016*. С. 176–177.

112. 97. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров. Ленпромстройпроект. М.: Стройиздат, 1983. 200 с.

113. 98. Рогинский Г. А. Дозирование сыпучих материалов / Под ред. Б. И. Мордковича. М.: Химия, 1978. 176 с.

114. 99. Бутенко А. Г., Смык С.Ю. Комбинированная система очистки воздуха. *Энеготехнологии и ресурсосбережение*. 2010. № 6, С. 66–69.

115. Смик С. Ю. Комбінована система очищення газів промислових енергоустановок від полідисперсного пилу: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук.: 05.14.06. Одеса, 2015. 22 с.

116. 10. Карамушко А. В. Моделювання бункеру динамічного пиловловлюючого апарату. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Science*. VI(17). Issue: 157. 2018. PP. 52–55.

117. Карамушко А. В. Очистка газового потока от полидисперсной пыли в аппарате динамического действия. *The international journal Sustainable development*. Year VIII. Volume 1/2018. PP. 68–73.

118. Уловлювання тонкодисперсного пилу завдяки коагулюючому ефекту у пиловловлювачі комбінованої дії / Бутенко О. Г., Васютинська К. А., Карамушко А. В., Ширшова В. О. *Актуальні проблеми енерго-*

ресурсозбереження та екології: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції, 12–13 грудня 2018 р. Одеса, 2018. С. 5–6.

119. Карамушко А. В., Подуфала Т. С. Розрахунок експлуатаційних показників комбінованого пиловловлюючого апарата. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції, 14–16 травня 2019 р. Чернігів: ЧНТУ, 2019. Т. 2. С. 159–160.

ДОВІДКА
 про впровадження результатів наукових досліджень
 з теми кандидатської дисертації
 Карамушко Анжеліки Володимирівни
 від «11» квітня 2018 р.

Результати дисертаційного дослідження за темою «Удосконалення технологічного процесу та устаткування сухого очищення повітря від полідисперсного пилу» були використані при організації системи доочищення пилових викидів системи аспірації приміщення подрібнення будівельних матеріалів ООО «Енергосервіс».

Запропонована система доочищення складається з вентилятору ВЦП-46-5, завиток якого поєднано з пилозбірним контейнером циркулюючим контуром, та повітропроводом з оцинкованого заліза діаметром 140 мм.

Впроваджений результат	Ефект
Використання відцентрового вентилятору та циркулюючого контуру для концентрації та коагуляції пилу.	Дає можливість знизити кількість дрібнодисперсного пилу у повітрі, що викидається в атмосферу основною системою аспірації.

Директор ООО «Енергосервіс»





ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження Карамушко Анжеліки Володимирівни на тему «Удосконалення технологічного процесу та устаткування сухого очищення повітря від полідисперсного пилу» у навчальний процес Одеського національного політехнічного університету

Результати дисертаційного дослідження Карамушко Анжеліки Володимирівни за темою «Удосконалення технологічного процесу та устаткування сухого очищення повітря від полідисперсного пилу» були впроваджені у навчальний процес підготовки бакалаврів за спеціальністю 101 – Екологія на кафедрі прикладної екології та гідрогазодинаміки ОНПУ.

З метою поглиблення знань студентів основних методів захисту довкілля та отримання ними навичок організації роботи у команді, обрання оптимальних методів та інструментальних засобів для проведення досліджень, розв'язання проблем у сфері захисту навколишнього середовища дисертантом було розроблено:

- методичні вказівки до практичних робіт з навчальної дисципліни «Техноекоекологія»;
- методичні вказівки до практичних робіт з навчальної дисципліни «Охорона повітря».

Результати впровадження обговорювалися на засіданні кафедри прикладної екології та гідрогазодинаміки (Протокол № 12 від «08» липня 2019 р.).

Довідка видана для подання в спеціалізовану вчену раду К 45.052.05 Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

Проректор з наукової та науково-педагогічної роботи,
д.т.н., проф.



Дмитришин Д. В.

Завідувач кафедри ПЕ ГГД,
д.т.н., проф.

Арсирій В. А.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Карамушко А.В., Буров А.А., Гамолич В.Я. Обеспыливание изолированного пространства. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2006. Вип.1 (25). С. 36–40.

2. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. Воздушное течение в криволинейном канале. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2009. Вип. 2 (32). С. 174–177.

3. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. Тепломассоперенос в криволинейном потоке вязкого газа. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. Киев: НПВК «Триакон», 2009. Вып. 1. С. 91–93.

4. Карамушко А.В., Гамолич В.Я., Буров А.А. Сравнительный анализ открытой и замкнутой обеспыливающих систем. *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, 2011. Вип. 1(35). С. 185–189.

5. Карамушко А.В., Буров А.А., Вишнякова Н.В. Обеспыливание транзитных и циркулирующих воздушных потоков. *Наукові праці ОНАХТ*. Одеса, 2011. Вип. 40. Том. 2. С. 367–371.

6. Карамушко А.В., Буров А.А., Максимовская Е.С. Криволинейные каналы в системе с замкнутыми контурами. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. Киев: НПВК «Триакон», 2011. Вып. 3(8). С. 30–33.

7. Карамушко А.В., Гамолич В.Я., Буров А.А. Сравнительная оценка результатов промышленных испытаний циклонов «СИОТ» и многоканальных пылеуловителей «БУРАН». *Праці Одеського політехнічного університету*. Одесса, 2012. Вып. 1 (38). С. 271–275.

8. Карамушко А.В., Буров О.О., Буров О.І. Вільний рух частки у

криволінійному каналі. *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*. Одеса, 2012. Вип. 63. С. 140–143.

9. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. [и др.]. Сепарация и фильтрация газовых выбросов в атмосферу. *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. Днепропетровск: НПК «Триакон», 2013. Вып. 2(13). С. 12–17.

10. Карамушко А.В. Моделирование бункера динамического пыловловлюющего аппарата. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Science*. VI(17). Issue: 157. 2018. P. 52–55.

11. Карамушко А.В. Очистка газового потока от полидисперсной пыли в аппарате динамического действия. *The international journal Sustainable development*. Year VIII. Volume 1/2018. P. 68–73.

Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації:

12. Карамушко А.В., Буров А.А., Буров А.И. Предотвращение потерь готового продукта и загрязнения окружающей среды. *Екологія міст та рекреаційних зон: тези докл. всеукр. наук.-практ. конф.*, (Одеса, 3–4 червня 2010 р.). Одеса: Інноваційно-інформаційний центр «ІНВАЦ», 2010. С. 154–157.

(Форма участі – очна).

13. Карамушко А.В. Повышение эффективности аспирации технологического оборудования. *Промислова гідравліка і пневматика: матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф. АС ПГП*, (Одеса, 18–19 вересня 2013 р.). Вінниця: «ГЛОБУС-ПРЕС», 2013. С. 67.

(Форма участі – очна).

14. Карамушко А.В. Ресурсосбережение и повышение экологической безопасности топливного хозяйства ТЭС. *Проблемы теплоэнергетики: сб. науч. тр. по материалам XII межд. науч.-технич. конф.*, г. Саратов (РФ), (Саратов, 29–31 жовтня 2014 р.). 2014. Вып. 3. С. 302–306.

(Форма участі – заочна).

15. Карамушко А.В., Буров О.О. Підвищення екологічної безпеки паливного господарства ТЕС за рахунок використання закритої системи

аспірації. *Актуальні проблеми енергетики та екології*: матеріали XII Всеукраїнської науково-технічної конференції, (Одеса, 5–7 жовтня 2016 р.). Одеса, 2016. С. 176–177.

(Форма участі – очна).

16. Арсирій В.А., Карамушко А.В., Кравченко В.О. Улучшение экологических показателей энергетических систем с использованием визуализации потоков. *Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики*: сборник трудов XXVIII международной конференции, (Одеса, 11–13 червня 2018 р.). К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2018. С. 151–155.

(Форма участі – заочна).

17. Бутенко О.Г., Васютинська К.А., Карамушко А.В., Ширшова В.О. Уловлювання тонкодисперсного пилу завдяки коагулюючому ефекту у пиловловлювачі комбінованої дії. *Актуальні проблеми енерго-ресурсозбереження та екології*: матеріали II міжнародної науково-технічної конференції, (Одеса, 12–13 грудня 2018 р.). Одеса, 2018. С. 5–6.

(Форма участі – очна).

18. Карамушко А.В., Подуфала Т.С. Розрахунок експлуатаційних показників комбінованого пиловловлюючого апарата. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції, (Чернігів, 14–16 травня 2019 р.): Чернігів: ЧНТУ, 2019. Т. 2. С. 159–160.

(Форма участі – заочна).