

ДИСПЕРСІЙНИЙ АНАЛІЗ ПИЛУ В СИСТЕМАХ АСПІРАЦІЇ ПІД ЧАС ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ УДОСКОНАЛЕНОЇ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Гаджисв Е.Н., Варламов Є.М.

Український науково-дослідний інститут екологічних проблем
вул. Бакуліна, 6, 61166, м. Харків
edwardsportik@gmail.com
varlamov.niiep@gmail.com

У статті наведено дані промислового обстеження систем аспірації під час виробництва мінеральної вати. Розглянуто функціональні залежності інтегрального розподілу за еквівалентним розміром часток пилу за результатами статистичної обробки дисперсійного аналізу регресивного виду. Наведено короткий опис і результати випробування запропонованої конструкції для дисперсійного аналізу пилу. На основі результатів дисперсійного аналізу пилу мінеральної вати запропоновано підхід до визначення функціональної залежності інтегрального розподілу залежно від еквівалентного розміру часток. *Ключові слова:* пил, частка, мінеральна вата, дисперсійний аналіз, мокра очистка, просок, викид, атмосфера, система, знепилювання.

Дисперсионный анализ пыли в системах аспирации при производстве теплоизоляционных материалов с применением усовершенствованной экспериментальной установки. Гаджиев Е.Н., Варламов Е.М. В статье представлены данные промышленного обследования систем аспирации при производстве минеральной ваты. Рассмотрены функциональные зависимости интегрального распределения по эквивалентному размеру частиц пыли по результатам статистической обработки дисперсионного анализа регрессивного вида. Представлены краткое описание и результаты испытания предложенной конструкции для дисперсионного анализа пыли. На основе результатов дисперсионного анализа пыли минеральной ваты предложен подход к определению функциональной зависимости интегрального распределения в зависимости от эквивалентного размера частиц. *Ключевые слова:* пыль, частица, минеральная вата, дисперсионный анализ, мокрая очистка, просок, выброс, атмосфера, система, обеспыливание.

Dispersion analysis of dust in aspiration systems in the production of thermal insulation materials using advanced experimental equipment. Hadzhiev E., Varlamov E. The article presents data from an industrial survey of aspiration systems in the production of mineral wool. The functional dependences of the integral distribution with respect to the equivalent size of dust particles are considered according to the results of statistical processing of dispersive analysis of a regressive form. A brief description and test results of the proposed design for the dispersive analysis of dust are presented. Based on the results of dispersion analysis of mineral wool dust, an approach is proposed to determine the functional dependence of the integral distribution depending on the equivalent particle size. *Key words:* dust, particle, mineral wool, analysis of variance, wet cleaning, overshoot, emission, atmosphere, system, dedusting.

Постановка проблеми. У зв'язку зі зростаючими темпами промислового і цивільного будівництва в нашій країні потрібне створення нових екологічно чистих, досить дешевих і ефективних будівельних матеріалів.

Аналіз досвіду різних країн у вирішенні проблеми енергозбереження показує, що одним із найбільш ефективних шляхів її вирішення є скорочення втрат тепла через огорожувальні конструкції будівель, споруд, промислового обладнання, теплових мереж тощо.

У зв'язку з цим найбільш інтенсивно розвивається виробництво і застосування виробів із мінеральної вати. Обсяг їх випуску перевищив 65% від загального обсягу всіх вироблених теплоізоляційних матеріалів [1; 2].

Виклад основного матеріалу. Виробництво мінеральної вати включає в себе ряд технологічних стадій, зумовлених виділенням пилу, а також газоподібних речовин, теплоти і вологи, що, у свою чергу, негативно позначається на стані навколишнього середовища і здоров'я людини. Сюди варто віднести операції підготовки сировинних матеріалів, складання шихтової суміші, плавлення вихідних компонентів, переробку розплаву у волокно, осадження теплоізоляційного матеріалу та формування його шару, введення сполучного, теплової обробку мінерального килима, отримання готових виробів.

Процес виробництва мінеральної вати починається зі складу сировини. За допомогою козлового крана сировина завантажують у приймальний бункер із живильником, далі сировину рухають по стріч-

кових конвеєрах, і тоді вона потрапляє в елеватори і бункер відсіву з колосниковими ґратами, далі скеровується в бункери з дозаторами, де сировину рівномірно висипають на стрічкові конвеєри, за якими подається в коксо-газову вагранку. У вагранці сировину плавиться за високих температур (до 1500°C), після досягнення необхідної температури розплав по жолобу подається на обертову багатовалкову центрифугу. На поверхню багатовалкової центрифуги подається повітря і завдяки відцентровій силі й потоку повітря з розплаву утворюються волокна мінеральної вати, які покриваються сполучною речовиною, що складається з водного розчину фенолформальдегідних смол; відходи, утворені під час цього процесу, потрапляють у спеціальний бункер. Далі завдяки маятниковому розкладчику килим, що утворюється з вати, укладають на стрічковий конвеєр, по якому килим мінеральної вати скеровується в камеру полімеризації, де розчин зі смоли просочує волокна, під впливом температури твердне, і кінцевий продукт отримує необхідні властивості. З камери полімеризації килим надходить на ділянку різання, на якому він нарізається поздовжньо і поперечно на плити необхідних розмірів [2; 3].

У частині виробництва мінеральної вати можна виділити такі найбільш негативні в екологічному аспекті технологічні процеси, які є джерелами виділення основних забруднюючих речовин:

- вивантаження з вагонів сировини (пилу неорганічний до 70% SiO₂).
- перевантаження і транспортування на конвеєрі (пилу «Королько», базальту, доломіту, коксу, пилу неорганічного до 70% SiO₂);
- коксова вагранка (пилу неорганічного до 70% SiO₂, вуглецю окис CO, азоту двоокис NO₂, сірки окис SO₂);
- відкрите місце розливу (виділення окис вуглецю CO в приміщення);
- камера волокноосадження (фенол, формальдегід, аміак);
- виділення забруднюючих речовин у робоче приміщення за відкритого транспортування матеріалу від камери волокноосадження до входу в камеру полімеризації (фенол, формальдегід, аміак);
- камера полімеризації й термозбіжна камера (фенол, формальдегід, аміак, пил мінеральної вати);
- розпилювання виробів (пил мінеральної вати);
- ємності для приготування і переливу сполучних (фенол, формальдегід);
- вивантаження шлаку з вагранки (пил неорганічний до 70% SiO₂);
- пересипання, завантаження вихідного матеріалу в бункери в шихтовому відділенні з вбудованою теплою стоянкою;
- злив смоли з автоцистерн на майданчику для зливу смоли [4; 5].

Як показує практика проведеного обстеження систем аспірації на підприємствах із виробництва

теплоізоляційних матеріалів, значна залишкова кількість пилових інгредієнтів високого ступеня дисперсності викидається в атмосферу.

Визначення розмірів частинок пилу, функціональної залежності розподілу діаметрів (розмірів) частинок знаходить усе більше застосування в різних теоретичних дослідженнях і практичних розробках високоефективних пиловловлювачів систем знепилювання. Вирішенню цього актуального завдання присвячено значну кількість праць, наприклад [6–9]. Опис методик проведення дисперсійного аналізу пилу також широко представлений у літературі [7; 8; 10].

Наприклад, у роботах [11–15] вказано деякі шляхи та рекомендовано схемотехнічні рішення, що забезпечують зниження викидів пилу в атмосферу під час використання різноманітних пиловловлювачів у системах знепилювання будіндустрії з використанням результатів дисперсійного аналізу пилу (апаратів відцентрово-інерційного типу, наприклад ВЗП і пристроїв мокрого очищення).

В останні роки проводяться дослідження дисперсійного складу частинок пилу, зокрема, з використанням мікроскопічного методу з різними цілями [16–18]. У роботі [16] для оцінки та порівняння якості дисперсії, розподілу навісок-проб наночастинок у різних середовищах використовувалися електронна і світлова мікроскопія.

Під час відбору проб атмосферного повітря було встановлено наявність високих концентрацій SiO₂ до 70% (0,25 мг/м³) і фенолу (0,06 мг/м³) в пробах вуличного пилу в житловій забудові, розташованій поблизу виробництва теплоізоляційних матеріалів.

Треба також особливо виділити нове видання [19], яке присвячене дослідженню та систематизації широкого кола питань фундаментального характеру, пов'язаних із дисперсійним аналізом і дисперсним складом частинок пилу з використанням мікроскопічного методу. У роботі приділяється значне місце властивостям і характеристикам пилу, інтегральному розподілу та їх опису у вигляді ряду функціональних залежностей.

Отож проведений огляд невеликої частини науково-технічної літератури показав, що подальше вдосконалення методик і пристроїв проведення дисперсійного аналізу пилу, отримання нових, ряду інших параметрів (розподілу по масі $D(m_v)$ і гідравлічної крупності $D(d_{p_{90}})$) для нових груп речовин матеріалів, які застосовуються в процесах виробництва теплоізоляційних матеріалів, залишаються актуальними. При цьому однією з необхідних умов під час удосконалення і розроблення нових ефективних конструкцій пиловловлювачів є використання результатів дисперсійного аналізу пилу. Це важливо для отримання необхідних низьких значень проскоку частинок пилу в розроблюваних нових конструкціях під час подальшого практичного впровадження даних пиловловлювачів.

Проведені дослідження ряду джерел викидів в атмосферу на підприємствах із виробництва теплоізоляційних матеріалів показують, що один із найбільш істотних вкладів у забруднення повітряного басейну міських і урбанізованих територій і забудови вносять викиди неорганічного пилу SiO_2 , оксидів азоту і фенолформальдегіду. У виробництві теплоізоляційних матеріалів, як було зазначено вище, виділяється ряд забруднюючих речовин, основна маса яких становить пил мінеральної вати і пил із вмістом SiO_2 від 20 до 70%. Під час обстеження ряду підприємств із виробництва мінеральної вати та вивчення пилової обстановки проведено визначення питомих пилівиділень і концентрацій пилу. Запиленість пилоповітряного потоку, що надходить із технологічних обсягів, які транспортують механізми (конвеєри, місця перевантаження, течки в бункери-силоси) в системи аспірації, може досягати на початкових ділянках до 8–12 г/с [11; 20]. При цьому в деяких ділянках аспіраційних систем максимально-разові значення пилу можуть досягати величини $\text{ММР} = 10,0\text{--}15,0$ г/с.

У рамках проведеного промислового обстеження було проведено відбір проб пилу мінеральної вати, доломіту (пил із вмістом SiO_2 від 20 до 70%), у системах аспірації транспортерів, камер полімеризації, бункерів і коксо-газової вагранки. Виконаний за результатами цього дослідження аналіз показав, наприклад, що дрібнодисперсні фракції з розміром частинок пилу доломіту (пил із вмістом SiO_2 від 20 до 70%), $\delta_4 = 5$ мкм і менше, становлять близько 95% від загальної маси пилу, що викидається в атмосферу. Аналіз показав, що дрібнодисперсні фракції з розміром частинок пилу мінеральної вати (пил із вмістом SiO_2 від 20 до 70%), $\delta_4 = 5$ мкм і менше становлять близько 80% від загальної маси пилу, що викидається в атмосферу. Значення середньомедіанного діаметра частинок пилу мінеральної вати змінюється залежно від місця волок проб і продукції, що випускається від 2 до 10 мкм.

Для вловлювання частинок дрібних фракцій пилу, які «просакували» через апарати інерційного типу в системах очищення викидів, треба особливо враховувати функціональні залежності за інтегральними функціями розподілу, наприклад за еквівалентними розмірами частинок пилу $D(d_{pe})$, величину середньомедіанного діаметра частинок δ_{50} та ряд інших параметрів [14].

Відомим підходом до визначення ефективних діаметрів, або еквівалентних розмірів частинок пилу d_{pe} , є експериментальне вивчення



Рис. 1. Графік інтегрального розподілу часток пилу D за діаметрами d_{pe} на ділянці перевантаження доломіту

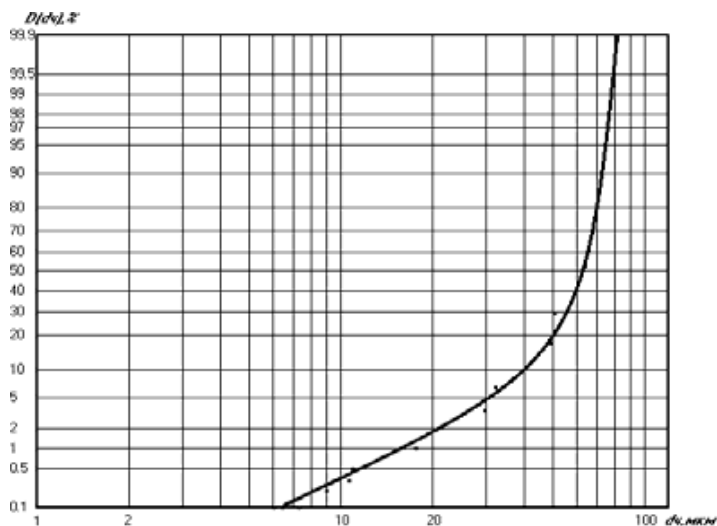


Рис. 2. Графік інтегрального розподілу D за розмірами d_{pe} для частинок пилу доломіту на початковій ділянці в системі аспірації обладнання (бункер, транспортер)

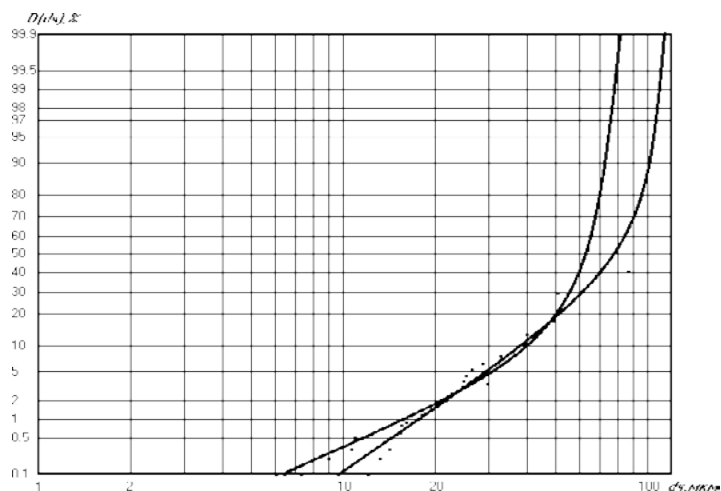


Рис. 3. Графік інтегрального розподілу D за розмірами d_{pe} для частинок пилу мінеральної вати із вмістом SiO_2 від 20 до 70%, доломіту (перед системами знепилювання системи аспірації)

дисперсного складу пилу теплоізоляційних матеріалів із використанням нової модифікації лабораторної установки [21], розробленої у Волгоградському державному архітектурно-будівельному університеті. Нова модифікація пристрою була досліджена і використана для проведення комплексного дисперсійного аналізу пилу. У проведеному нами дослідженні використовувалася також методика, докладно викладена в роботі [10], із застосуванням комп'ютера.

Отримувані під час експериментального дослідження результати ефективних діаметрів d_p , або еквівалентних діаметрів частинки пилу d_{pe} на установці [21], повною мірою не виключають впливу

таких явищ, як ковзання і випадкове зачеплення, тимчасове відкладення частинок пилу на поверхні стінок седиметричної трубки установки [21]. У модифікації пристрою [21] була проведена заміна седиметричної трубки на дифузор. Сукупність ряду елементів модифікації пристрою [21], описаних у заявці на патент, дає змогу істотно знизити тимчасове відкладення і налипання на поверхні стінок дифузора частинок пилу, що певною мірою підвищує достовірність результатів дисперсійного аналізу пилу. Це пояснюється розподілом на досліджуваній поверхні залежно від швидкості осадження u_s в газі або швидкості витання u_p . На швидкість осадження u_s частинки пилу (відрізняється несуттєво від швидкості витання u_p), вимірювані на модифікації пристрою [21], меншою мірою впливали стінки седиметричного елемента – дифузора.

На малюнках 1–5 наведено графіки інтегрального розподілу часток пилу мінеральної вати до і після системи знепилювання систем аспірацій виробництва теплоізоляційних матеріалів сухим способом, на яких проводились експериментальні дослідження.

Рекомендації літератури [6; 14] дали можливість застосувати такі види залежностей для визначення $D(d_{pe})$, як функції їх еквівалентних розмірів d_{pe} у вигляді:

$$D(d_{pe}) = Ad_{pe} + B, \quad (1)$$

де, наприклад, $A = tg(\alpha)$.

Величини A і B були визначені під час статистичної обробки результатів експериментальних даних дисперсійного аналізу пилу і графіків інтегрального розподілу $D(d_{pe})$ за розмірами частинки пилу d_{pe} , наведених на рисунках 1–5.

У фізичному сенсі кут α є показником або ступенем дисперсності пилу Δ_d . Аналітично отримуване чисельне значення величини $tg(\alpha)$ характеризує ступінь дрібнодисперсного пилу Δ_d . Чим більше $tg(\alpha)$ (кут α), тим пил має склад вищого рівня дрібнодисперсних Δ_d .

Крім того, варто зазначити, що з досліджених зразків видів пилу пил мінеральної вати більш дрібнодисперсний (Δ_d1) та має більш високу ймовірність ступеня «проскоку» в системах знепилювання, ніж пил доломіту із вмістом SiO_2 від 20 до 70% (Δ_d2), $\Delta_d1 > \Delta_d2$.

Можлива також більш точна апроксимація результатів експериментальних даних дисперсійного аналізу пилу під час статистичної обробки поліномом, наприклад, другого порядку:

$$D(d_{pe}) = Cd_{pe}^2 + Ed_{pe} + F, \quad (2)$$

де C , E і F – постійні величини для досліджуваного зразка.

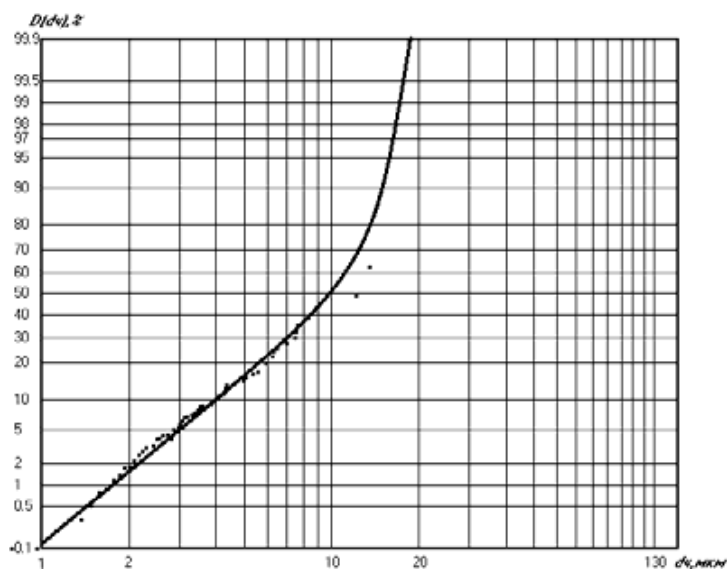


Рис. 4. Графік інтегрального розподілу D за розмірами d_{pe} для частинок пилу мінеральної вати і доломіту (після системи знепилювання з використанням ВЗП)

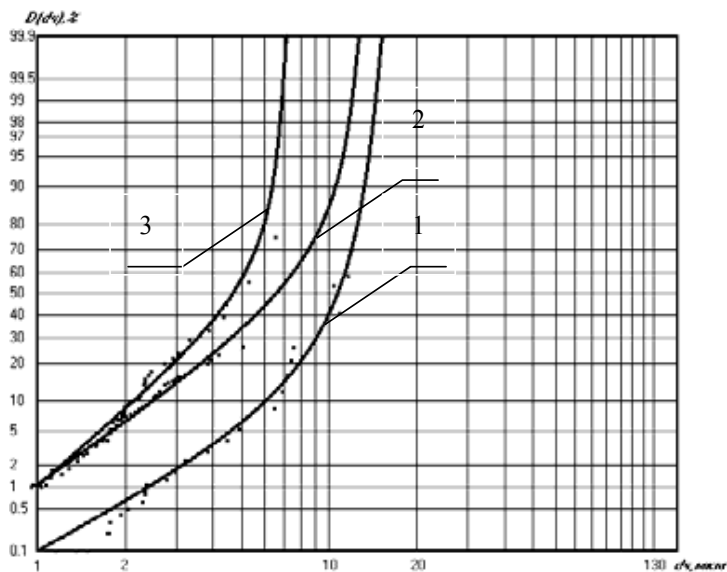


Рис. 5. Графік інтегрального розподілу D за розмірами d_{pe} для частинок пилу мінеральної вати із вмістом SiO_2 від 20 до 70% і доломіту (після систем знепилювання з використанням ВЗП – 1 і пилловловлювача мокрого очищення – 2, 3)

Головні висновки. Удосконалення систем очищення викидів промисловості та будіндустрії може бути реалізовано на основі застосування запропонованої модифікації лабораторної установки проведення комплексного дисперсійного аналізу пилу. Нова модифікація пристрою значною мірою підвищує достовірність результатів дисперсійного аналізу пилу.

На основі літературних і експериментальних даних результатів дисперсійного аналізу пилу

мінеральної вати і доломіту запропоновано деякі види визначення функціональної залежності інтегрального розподілу залежно від еквівалентного розміру часток пилу в аналітичному вигляді. У роботі наведено функціональні залежності інтегрального розподілу по еквівалентному розміру часток пилу за результатами статистичної обробки дисперсійного аналізу у вигляді регресій і проведено їх аналіз.

Література

1. Балтернас П.Б. Обезпилювання повітря на підприємствах будматеріалів. М.: «Будвидат», 1991.
2. Комар А.Г. Будівельні матеріали і виробы. М.: «Вища школа», 1988, 522 с.
3. Горчаков Г.И., Баженов Ю.М. Строительные материалы. М.: «Стройиздат», 1986. 688 с.
4. Технология производства цемента. URL: <https://base.safework.ru>.
5. Новый справочник химика технолога. Технология производства цемента. URL: chemanalytica.com/book/novyy_spravochnik_khimika_i_tekhnologa/10_protsesty_i_apparaty_khimicheskikh_tekhnologiy_chast_II/7192.
6. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
7. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л.: «Химия», 1987. 264 с.
8. Коузов П.А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. Л.: «Химия», 1983. 138 с.
9. Азаров В.Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 05.26.01. Ростов-на-Дону, 2004, 48 с.
10. Азаров В.Н., Сергина Н.М. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК). Волгогр. гос. арх.-строит. акад., Волгоград, 2002. Деп. в ВИНТИ 15.07.2002 № 1332-80002. 7 с.
11. Азаров В.Н. О фракционном составе пыли в рабочей зоне и инженерно-экологических системах. *Международ. науч.-техн. конф. «Технология, строительство и эксплуатация инженерных систем»*. СПб, 2002. С. 10–13.
12. Сергина Н.М. Пути снижения пыли извести в атмосферу при производстве строительных материалов. *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 11. С. 53–55.
13. Жуликов В.В., Железнов В.А. Очистка дымовых ваграночных газов. *Сборник научных трудов «Технологические процессы и оборудование в минераловатном производстве»*. Теплопроект, Москва, 1989. С. 44–50.
14. Азаров В.Н., Кошкарев С.А., Николенко М. А. Снижение выбросов систем обеспыливания с использованием дисперсионного анализа пыли в стройиндустрии. *Инженерный вестник Дона*. 2014. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2838.
15. Маринин Н.А. Исследование дисперсного состава пыли в инженерно-экологических системах и выбросах в атмосферу предприятий стройиндустрии: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.19. Волгоград, 2014. 20 с.
16. Sager T.M. et al. Improved method to disperse nanoparticles for in vitro and in vivo investigation of toxicity. *Nanotoxicology*. 2007. V. 1. №. 2. P. 118–129.
17. Ordonez A. et al. Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in Northern Spain. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2003. V. 44. №. 2. P. 0160–0170.
18. Kalejaiye O. et al. Effectiveness of dust dispersion in the 20-L Siwek chamber. *Journal of loss prevention in the process industries*. 2010. V. 23. №. 1. P. 46–59.