

**В.А. БАТЛУК**, д-р. техн. наук, проф., НУ «Львівська політехніка», Львів;  
**Б.М. БЕЛЯВСЬКА**, канд. техн. наук, НУ «Львівська політехніка», Львів;  
**Є.Д. БОЧКАЛО**, студент, НУ «Львівська політехніка», Львів

## **АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ФАКТОРІВ НЕБЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МОБІЛЬНОГО РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ З РОТАЦІЙНОЮ ПИЛОЮ**

Наводиться фізична сутність явищ, які протікають в кожусі мобільної пили типу «болгарка», визначений характер розподілу швидкостей в ньому, проаналізовані сили, які діють на частинки аерозолу, що дозволяє розкрити фізичну суть процесу руху повітряного потоку в проєктованому апараті, визначити вплив, діючих на частинки аерозолу в радіальному напрямі сил на характер їх руху, значно понизити кількість експериментальних досліджень по вивченню впливу параметрів апарату на ефективність його роботи.

Приводиться физическая сущность явлений, которые протекают в кожухе мобильной пилы типа «болгарка», определён характер, распределение скоростей в нём, проанализированы силы, которые действуют на частички аэрозоля, что позволяет раскрыть физическую сущность процесса движения воздушного потока в проектируемом кожухе, определить влияние, действующих на частички аэрозоля в радиальном направлении сил на характер их движения, значительно снизить количество экспериментальных исследований по изучению влияния параметров кожуха на эффективность его работы.

We present the physical nature of phenomena that occur in a housing of mobile saw of type "grinders", defined the character of the velocity distribution in it, analyze the forces acting on aerosol particles, which can reveal the physical nature of the process air flow in the projected housing, to determine the effect of acting on the particles in the aerosol radial forces on the nature of their movement, greatly reduce the number of experimental studies on the influence of parameters of the casing on the effectiveness of its work.

**Вступ.** Поряд з різними природними явищами (виверження вулканів, лісні пожежі, вивітрювання й ерозія ґрунту тощо), які призводять до забруднення атмосфери, все більше значення в цій проблемі займає діяльність людини, яка пов'язана з освоєнням природних багатств, розвитком і вдосконаленням промисловості, сільського господарства, будівництва і транспорту. Ця діяльність у зв'язку з недостатністю наших знань, недосконалістю технології або відсутністю всебічної прогнозувальної обробки супроводжується небажаними процесами – викидами в атмосферу цілого ряду шкідливих побічних продуктів. Забруднюючи атмосферу, вони завдають величезних, часто невинуватих збитків не тільки природному середовищу, але і самій людині, крім того і забираючи її здоров'я або навіть життя.

Проблема попередження нещасних випадків на виробництві сьогодні дуже актуальна і майже не вирішувана. Сукупність факторів виробничого середовища, що впливають на працездатність людини в процесі роботи, складають умови праці. Умови праці – це складне об'єктивне суспільне явище, що

формується в процесі роботи під дією взаємозв'язаних факторів соціально-економічного, техніко-організаційного і природного характеру і впливає на умови існування людини.

Небезпека пилу тим більша, чим менший розмір пилинок, тому що цей пил довше лишається в якості аерозолі в повітрі і глибше проникає в легеневі канали. В організм людини проникають частинки пилу, головним чином, розміром не більші за 2 мкм. Попадаючи на шкіру, пил проникає в сальні і потові залози і порушує терморегуляцію організму.

Здатність високодисперсного пилу довгостроково знаходитися в зваженому стані має істотне значення для вирішення задач по видаленню її з повітря приміщень і будинків.

Якщо виявиться, що вдосконалення технологічних процесів, створення санітарно-захисних зон, збільшення висоти труб і інші заходи, які зменшують вплив викидів шкідливих речовин на робочі місця і в атмосферу, не в змозі знизити вміст забруднень в атмосферному повітрі до граничнодопустимих концентрацій, то викиди приходиться піддавати очищенню до такого ступеня, щоб у кінцевому результаті вони не їх перевищували.

**Аналіз останніх досліджень.** У даний час очищення забрудненого повітря і газів є основним способом охорони повітряного басейну від забруднень, який застосовується у всіх випадках, коли використання активних методів очистки поки що є неможливим або економічно недоцільним. Задача промислового газоочищення – нейтралізація повітряного басейну від організованих газових викидів і стаціонарних джерел.

Очищення викидів значно спрощується, якщо гази, що відходять (напр. димові), рухаються по газоходах. Однак у багатьох випадках, напр., при роботі дробарок, травильних установок, гальванічних ванн, при обрубці і зачищенні виливків, при обробці пластмас, текстоліту, склопластиків, при роботі з ріжучим інструментом тощо необхідно вживати спеціальні заходи для уникнення виділення цих речовин безпосередньо в атмосферу. В інших випадках домішки не тільки створюють небезпеку для працюючих і впливають на якість продукції, але стають важко вловимими.

Тому вловлення шкідливих речовин безпосередньо з джерела виділення є запорукою не тільки поліпшення гігієнічних умов праці на робочих місцях, але і високої ефективності пиловловлюючих установок, які складаються в основному, з наступних елементів:

- приймального пристрою, що може включати один чи групу приймачів;
- мережі трубопроводів;
- вентилятора, що відсмоктує запилене або загазоване повітря по трубопроводах до пилоочисної установки.

**Постановка завдання.** Найбільші досягнення у відцентровому вловленні твердих частинок з газового потоку відмічені в частині апаратурного

оформлення (конструювання), а не наукових розробок, що пояснюється, з одного боку, накопиченням багаторічного досвіду експлуатації промислових апаратів, а з іншого – надзвичайною складністю опису окремих явищ і характеристик гетерогенних систем тверде тіло – газ у відцентровому полі. Тому теорія роботи циклонів ще недосконала і не дає можливості розрахувати різні конструкції. Наприклад, питання про найвигіднішу форму циклонів вирішується до даного часу тільки емпіричним і дослідним шляхом.

Залежно від фізико-хімічних властивостей пилу та технологічних параметрів пилогазових потоків пропонуються різні вимоги до остаточного вмісту пилу в газових потоках, особливо до токсичних, дрібнодисперсних пилів. Тому можлива поліваріантність рішень при розробці відцентрових апаратів для виділення твердих частинок з газових потоків. Проведений нами аналіз виявив велику кількість конструкцій відцентрових апаратів, частіше не підкріплених теоретичними і експериментальними дослідженнями структури утворених потоків і процесу виділення частинок в них.

Велика кількість різних конструкцій пиловловлювачів одного і того ж призначення, які не мають чітких технічних характеристик, гальмує вибір правильних схем очистки при проектуванні пилоочисних пристроїв, а відсутність уніфікованого пилоочисного обладнання служить перешкодою при вирішенні питання про організацію його промислового виробництва.

**Метою роботи** є створення конструкції апарата, здатного вирішити питання запобігання утворення пилу при роботі з інструментом типу «болгарка».

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Проведений аналіз нещасних випадків при роботі з болгаркою за 2005–2011 роки довів, що із загальної кількості 55 випадків відбулося пошкодження: китиці – 1, колінного суглоба – 5, стегна – 22, гомілки – 8, грудної клітки – 1, стопи – 3, передпліччя – 14, шиї – 1. Як видно із наведених даних найбільша кількість нещасних випадків сталося з ураження стегна, плеча та передпліччя, гомілки і колінного суглоба, тобто вид ураження визначається положення робочого в момент проведення робіт.

Проаналізуємо ці моменти.

На рис. 1 наведений загальний вигляд інструмента. Для запобігання нещасних випадків необхідно проаналізувати дію сил, які існують у наведеному інструменті. Для запобігання вибивання пилу з укриттів у них необхідно підтримувати розрідження. Максимальні швидкості руху повітря в місцях приєднання аспіраційних лійок до укриттів приймаються в залежності від типу матеріалів: для кускових – 2 м/с, зернистих – 1 м/с, порошкоподібних – 0,7 м/с. Ці значення прийняті з умов мінімального віднесення дрібних фракцій матеріалу, що транспортується, у пиловловлюючі апарати аспіраційних систем.

Місця розташування пристрою укріплень ріжучого устаткування визначають виходячи з особливостей його роботи і виникаючих при цьому потоків запиленого повітря.

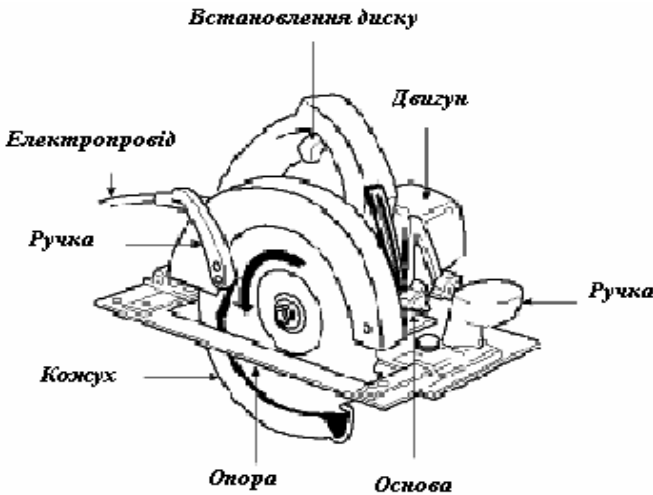


Рисунок 1 – Загальний вигляд «болгарки».

Постановка задачі про рух повітряного потоку в кожусі інструменту включає наступні основні кроки: опис загальних допущень, крайових та початкових умов; математичну модель руху повітряних потоків в апараті з урахуванням моделі турбуленції; математичну модель руху твердої фази (частинки пилу) в апараті. Для коректного опису процесу сепарації частинок пилу у пиловловлювачі принципово нового типу були прийняті певні допущення, які, з одного боку наближають математичну модель до конкретних умов функціонування інструменту, а з іншого – запобігають надмірному ускладненню моделі:

- частинки пилу є твердими і не взаємодіють між собою;
- частинка, що торкнулася стінки корпусу вважається вловленою;
- на вході в апарат потік має рівномірне поле швидкостей;
- розподіл пилу по перерізу вхідного патрубку кожуха є рівномірним;
- опір руху частинок у газовому середовищі описується законом Стокса;
- тангенційна і осьова складові швидкості частинки співпадають з тангенційною і осьовою складовими швидкості обертання газового потоку, відповідно;
- радіальні швидкості внаслідок дії сил інерції є різними.

Для того, щоб розв’язок задачі про рух повітряних потоків був єдиним, задаємо початкові і крайові умови, які, в свою чергу, визначаються формою і конструктивними особливостями апарата та умовами його роботи, тобто для

кожного типу пиловловлювача існує свій набір початкових і крайових умов.

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

- атмосферний тиск за нормальних умов  $P_0 = 101325$  Па;
- температура повітря за нормальних умов  $T_0 = 293$  К;
- середній (медіанний) діаметр частинок пилу  $d_{50} = (8 - 50) \cdot 10^{-6}$  м;
- максимальний діаметр частинок пилу  $d_{\max} = 50 \cdot 10^{-6}$  м;
- мінімальний діаметр частинок пилу  $d_{\min} = 8 \cdot 10^{-6}$  м;
- густина частинок пилу  $\rho_q = 2000 - 4000$  кг/м<sup>3</sup>;
- густина повітря  $\rho = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>.

Розрахунки диференціальних рівнянь руху матеріальної точки при початкових умовах було проведено з використанням математичного пакету.

Крайові умови накладаються на розв'язок задачі про рух потоку і повинні виконуватися в кожний момент часу цього руху та визначаються характером руху повітря по площині. Вони залежать також і від густини газу: наприклад газ великої густини «прилипає» до стінок апарата в той час, як розріджений газ ковзає по межових поверхнях. Проте незважаючи на особливості є певні закономірності при заданні крайових умов при русі запиленого повітря в пилоочишувачі, які ми і задаємо, а саме:

- рівність нулю швидкості на нерухомій твердій границі;
- швидкість пилоповітряного потоку на вході в кожух стабільна і дорівнює 18 м/с.

Розглянемо модель впливу інерційних сил і сил опору на рух частинок пилу у кожусі «болгарки».

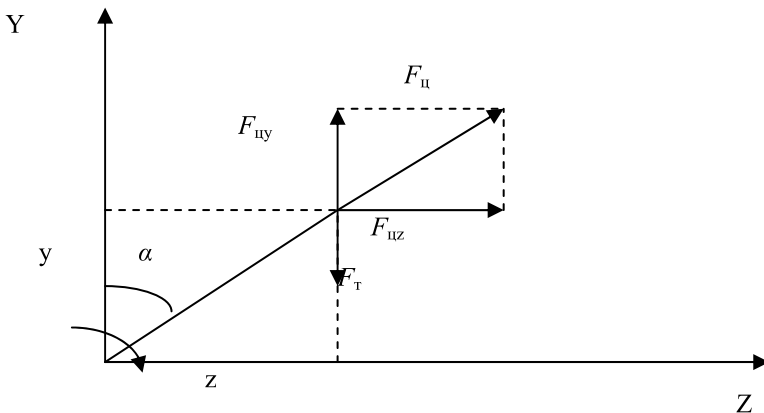


Рисунок 2 – Схема сил, що впливають на частинку.

На частинки пилу при русі їх в закрученому потоці, з урахуванням раніше зроблених допущень, впливають наступні сили.

Сила тяжіння:

$$\bar{F}_T = m_q \cdot \bar{g} = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot (\rho_q - \rho_n) \cdot \bar{g}, \quad (1)$$

де  $m_q$  – маса частинки, кг;  $\bar{g}$  – прискорення сили тяжіння м/с<sup>2</sup>;  $d_q$  – діаметр частинки, м;  $\rho_q$  – густина частинок пилу кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>.

Відцентрова сила:

$$\bar{F}_ц = m_q \cdot \frac{\bar{V}_\tau^2}{R} = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot (\rho_q - \rho_n) \cdot \frac{\bar{V}_\tau^2}{R}, \text{ Н}, \quad (2)$$

де  $V_\tau$  – тангенціальна складова швидкості обертання потоку повітря, м/с;  $R$  – радіус обертання потоку, м.

Як видно з наведених рівнянь (1) і (2), різницею густини ( $\rho_q - \rho_n$ ) враховується і сила витіснення середовища (*сила Архімеда*).

У рухомому потоці газу на частинку діє сила опору середовища (*сила Стокса*):

$$\bar{F}_c = 3\pi\mu_z d_q \bar{V}_q \chi, \quad (3)$$

де  $\mu_z$  – динамічна в'язкість, Пас;  $V_q$  – швидкість осадження частинки щодо газового середовища, м/с;  $\chi = 2,9$  – динамічний коефіцієнт форми частинок пилу для змішаних тіл.

Якщо врахувати, що для зваженої частинки, яка рухається в потоці газу, сила Стокса дорівнює сумі зовнішніх сил і направлена у зворотньому напрямку, то:

$$\bar{F}_c = \bar{F}_T + \bar{F}_ц. \quad (4)$$

Розкладемо сили (3.15) по осях  $y$  і  $z$ :

$$F_{cy} = F_{cy} - F_T; F_{cz} = F_{cz}. \quad (5)$$

Використовуючи рівняння (2) – (5), виразимо  $V_{cy}$  і  $V_{cz}$  – проекції швидкості осадження частинки відносно газового середовища на осі координат у і z:

$$V_{cy} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_n) \cdot \left( \frac{V_\tau^2}{R} \cdot \cos(\alpha) - g \right)}{18\mu_z \chi}, \quad (6)$$

$$V_{cz} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_n) \cdot \frac{V_\tau^2}{R} \cdot \sin(\alpha)}{18\mu_z \chi}, \quad (7)$$

де

$$\sin(\alpha) = z/\sqrt{y^2 + z^2}; \quad \cos(\alpha) = y/\sqrt{y^2 + z^2}; \quad R = \sqrt{y^2 + z^2}, \quad (8)$$

$\alpha$  – кут між віссю  $y$  і радіусом вектором точки, в якій знаходиться частинка;  $y, z$  – координати точки, в якій знаходиться частинка.

З моделі *турбулентного масопереносу* одержуємо компоненти миттєвої швидкості потоку по осях координат  $V_x, V_y$  і  $V_z$ , які визначають осьову, тангенційну і радіальну складові швидкості для закрученого потоку повітря.

Осьова швидкість потоку в нашому випадку має напрямок осі  $x$ :

$$V_{oc} = V_x. \quad (9)$$

Тангенційна і радіальна швидкості потоку визначатимуться таким чином:

$$V_T = V_{zy} \cdot \cos(\alpha + \beta) = V_{zy} \cdot [\cos(\alpha)\cos(\beta) - \sin(\alpha)\sin(\beta)], \quad (10)$$

$$V_p = V_{zy} \cdot \sin(\alpha + \beta) = V_{zy} \cdot [\sin(\alpha)\cos(\beta) - \cos(\alpha)\sin(\beta)], \quad (11)$$

де

$$V_{zy} = \sqrt{V_y^2 + V_z^2}; \quad \sin(\beta) = V_y/\sqrt{V_y^2 + V_z^2}; \quad \cos(\beta) = V_z/\sqrt{V_y^2 + V_z^2}, \quad (12)$$

$\beta$  – кут між віссю  $z$  і вектором швидкості частинки в даній точці.

Звідси одержуємо остаточні залежності:

$$V_T = (y \cdot V_z - z \cdot V_y) / \sqrt{y^2 + z^2}, \quad (13)$$

$$V_p = (z \cdot V_z + y \cdot V_y) / \sqrt{y^2 + z^2}. \quad (14)$$

Підставивши (13) в (6) і (7), одержуємо залежність для визначення швидкості в кожній точці потоку:

$$V_{cy} = \frac{d_c^2 \cdot (\rho_c - \rho_n) \cdot \left( y(y \cdot V_z - z \cdot V_y) \right)^2 / \left( (y^2 + z^2)^2 - \bar{g} \right)}{18\mu_c \chi}, \quad (15)$$

$$V_{cz} = \frac{d_c^2 \cdot (\rho_c - \rho_n) \cdot z(y \cdot V_z - z \cdot V_y)^2}{18\mu_c \chi (y^2 + z^2)^2}. \quad (16)$$

Відповідно до прийнятих допущень з врахуванням рівняння (13):

$$V_{cx} = V_{oc} = V_x. \quad (17)$$

Одержавши компоненти  $V_{cx}, V_{cy}$  і  $V_{cz}$ , ми визначаємо в кожній точці потоку миттєву швидкість частинки щодо потоку:

$$\bar{V}_c = V_{cx} \bar{i} + V_{cy} \bar{j} + V_{cz} \bar{k}, \quad (18)$$

де  $\bar{i}, \bar{j}$  і  $\bar{k}$  – одиничні вектори позитивних напрямів осей.

Для модуля вектора швидкості  $\bar{V}_c$  маємо:

$$V = \sqrt{V_{cx}^2 + V_{cy}^2 + V_{cz}^2}. \quad (19)$$

Одержимо швидкості частинки щодо прийнятої декартової системи координат:

$$\vec{V}_{cx0} = \vec{V}_x; \vec{V}_{cy0} = \vec{V}_{cy} + \vec{V}_y; \vec{V}_{cz0} = \vec{V}_{cz} + \vec{V}_z. \quad (20)$$

Якщо розглядати швидкості в циліндричній системі координат, то:

$$\vec{V}_{чос} = \vec{V}_x; \vec{V}_{чт0} = \vec{V}_r; \vec{V}_{чр0} = \vec{V}_{чр} + \vec{V}_p, \quad (21)$$

де  $V_{чр}$  одержуємо аналогічно перетворенням:

$$V_{чр} = \left( z \cdot V_{cz} + y \cdot V_{cy} \right) / \sqrt{y^2 + z^2}. \quad (22)$$

Одержана в рівнянні (22) швидкість – це параметр, який характеризуватиме значення швидкості і напрямком руху частинки пилу, яка поміщена в ту або іншу точку простору кожуха «болгарки». Дані значення дозволять нам оцінити ефективність роботи кожуха за різних крайових умов, при різній геометрії апарату і при різних розмірах і масі частинок пилу.

Резюмуючи вищенаведене можна стверджувати, що ефективність кожуха інструмента буде тим більшою, чим:

- менша швидкість руху частинки до входу в кожух;
- менша швидкість руху очищеного повітряного потоку до щілин кожуха;
- більша площа живого перерізу кожуха;
- більше проходження повітря через нього;
- більша маса частинки;
- більша густина частинки;
- менший кут між напрямком руху потоку і площиною кожуха;
- більш постійною є швидкість руху пилоповітряної суміші вздовж кожуха;
- більша гнучкість частинки.

Виходячи з наведених міркувань, нами запропоновано декілька конструкцій кожухів до різних типів «болгарок», ефективність виведення пилу з яких буде максимальною.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Порівняльні дослідження довели, що ефективність роботи запропонованих кожухів обладнання перевищує ефективність роботи існуючих кожухів на 15–17%, гідравлічний опір зменшений на 150–250 Па, а габаритні розміри в 1,5 рази, що дозволяє говорити про значне зменшення енерго- і металоємності.

Подальші дослідження в цьому напрямку необхідно вести по шляху вдосконалення конструкції кожухів інструменту в плані оптимізації габаритних розмірів і вдосконалення процесів розділення з метою підвищення ефективності роботи, запобігання нещасним випадкам і створення нових енергозберігаючих технологій, а також охорони праці та навколишнього середовища.



**Список літератури 1.** *Батлук В.А., Азарський К.І.* Математичне забезпечення вибору оптимального обладнання для очистки повітря від пилу за допомогою комп'ютерної техніки // Український журнал медичної техніки і технології. – Київ. – 2000. – №2. – С. 92 – 94. **2.** *Батлук В.А.* Математические модели процессов разделения гетерогенных систем при пылеочистке // Міжнарод. наук. практ. конф. «Нові машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій, сучасні будівельні технології». – Полтава. – 2000. – С. 87 – 91. **3.** *Харлоу Ф.Х.* Чисельний метод частинок в комірках для задач гідродинаміки. Обчислювальні методи в гідродинаміці. – М.: Мир, 1967. **4.** *Батлук В.А., Мельников О.В.* Один из путей решения проблем устранения промышленной опасности, создаваемой мелкодисперсной пылью / Юбилейные научные чтения «Белые ночи – 2008» / Материалы Международных научных чтений Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Часть 2. – Изд-во МАНЭБ, СПб. – 2008 – С. 327 – 332. **5.** *Батлук В.А., Василюк Р.М., Сукач Р.Ю.* Математичне моделювання процесу очищення повітря від пилу у відцентрово-інерційних пиловловлювачах // Науковий журнал «Екологічна безпека» Випуск 2 – 4, 2008. – С. 17 – 20.

*Надійшла до редколегії 08.04.2012*

УДК 621.928.9

**В.А БАТЛУК**, д-р техн. наук., проф., НУ «Львівська політехніка», Львів;  
**Н.М. ПАРАНЯК**, аспірант, НУ «Львівська політехніка», Львів;  
**Н.П. ОЛЕКСИВ**, студент НУ «Львівська політехніка», Львів

## **ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ**

Розроблена модель ієрархії факторів еколого-економічної доцільності впровадження пиловловлювача нової конструкції. Крім упорядкування факторів за важливістю їх впливу дана модель робить можливим подальший поділ на залежні (внутрішні) компоненти для виявлення ступеня послаблення чи посилення дії викликаючого фактора. Пріоритетність дії фактора на ефективність роботи пиловловлювача нової конструкції є величиною відносною і може бути змінена залежно від експертної оцінки міри впливу фактора на досліджуваний процес

Разработана модель иерархии факторов эколого-экономической целесообразности внедрения пылеуловителя новой конструкции. Кроме сопоставления факторов по важности их влияния данная модель делает возможным дальнейшее деление на зависимые (внутренние) компоненты для выявления степени ослабления или усиления действия вызывающего фактора. Приоритетность действия фактора на эффективность работы пылеуловителя новой конструкции является величиной относительной и может быть изменена в зависимости от экспертной оценки степени влияния фактора на исследуемый процесс.

The model of hierarchy of factors of efficiency of work of dust collection of new construction is developed. Except for arrangement of factors after importance of their influence this model does possible the subsequent dividing by dependent (internal) components for the exposure of degree of weakening or strengthening of the caller factor. Priority of action of factor on efficiency of work of dust collection of new construction is a size relative and can be changed depending on the expert estimation of measure of influence of factor on the probed process.