

УДК 621.928.9

**В. А. Батлук, В. В. Батлук**

*Національний університет «Львівська політехніка»*

**І. М. Козира**

*Державний університет безпеки життєдіяльності*

## **ПИЛОВЛОВЛЮВАННЯ В ПРОЦЕСАХ РОЗМЕЛЮВАННЯ ГУМИ**

*Розвинуто нові напрямки конструювання апаратів пилоочищення, що базуються на дії відцентрово-інерційних сил. Розглядаються питання експериментальних досліджень принципово нових апаратів. Встановлено, що використання запропонованих пиловловлювачів дозволить реалізувати єдиний підхід до їх вибору з урахуванням специфіки кожного конкретного виробництва.*

***Пиловловлювання, високоефективні апарати, очищення повітря, розмелювання гуми***

Щороку в атмосферу Землі надходять десятки мільйонів тон пилу: близько 600 т ртуті, 30 тис. т солей, 20 тис. т вуглеців, 10 тис. т оксиду азоту і т.д. Загальна маса викидів складає 20 млн речовин у рік. З них на Україну припадає 3% (сернистий ангідрид — 30%, оксид вуглецю — 37%, оксиди азоту — 10%, вуглеводні з'єднання — 8%, легкі органічні з'єднання — 4%, інші — 11%). Очищається лише 80% викидів цих шкідливих речовин. Газоподібні ж речовини очищаються лише на 20%.

Темпи підвищення ефективності роботи комплектуючих апаратів схем пилоочищення помітно відстають від вимог до них ще й з точки зору енергоємності та металомісткості. Виникло протиріччя: з одного боку, значно підвищилися потенційні можливості установок для очистки повітря від пилу і вимоги до них, а з другого, — зросли проблеми щодо реалізації цих можливостей через ускладнення схем пилоочищення. Це протиріччя зумовило потребу в забезпеченні підвищених вимог щодо ефективності роботи апаратів пилоочищення, що визначається здатністю установки для очистки повітря від пилу зберігати робоздатність протягом деякого часу в певних умовах експлуатації.

Розв'язання протиріччя, що виникло, шляхом впровадження схем пилоочищення на апаратах, які характеризуються високою ефективністю, малими гідравлічним опором і габаритами, становить сьогодні актуальну проблему — очищення повітря від пилу, а розроблення нових шляхів і методів її розв'язання визначають мету і зміст нашої роботи.

Постановка завдання — розроблення високоефективних апаратів для вловлювання пилу зумовлена:

відсутністю завершеної наукової теорії процесу пилоочищення, яка відповідає б вимогам щодо ступеня очистки повітря від пилу;

підвищенням вартості виготовлення машин, в яких значна роль відводиться пилоочищенню;

відставанням рівня ефективності апаратів пилоочищення від поставлених вимог;

відсутністю банку даних для автоматизованого вибору системи пилоочищення для кожного конкретного виробництва;

складністю схем пиловловлювання мікронних і субмікронних частинок, кількість яких з удосконаленням машин постійно збільшується;

відсутністю єдиного підходу до аналізу конструктивних особливостей пиловловлювачів.

Наявні засоби для вловлювання пилу від технологічного обладнання виробництва будівельних матеріалів і конструкцій недостатньо ефективні й економічні. Для вирішення цієї проблеми необхідні комплексні наукові дослідження щодо визначення фізико-механічних, електричних і хімічних властивостей пилу, його концентрації й розподілу у виробничій техносфері будівельної індустрії з урахуванням метеорологічних умов навколишнього середовища. За результатами цих досліджень потрібно теоретично узагальнити і розробити теорію розділення гетерогенних систем в апаратах для очистки повітря від пилу, на основі якої сконструювати принципово нові високоефективні пиловловлювачі, застосувавши сучасні принципи створення апаратів і агрегатів пилоочищення, що поєднують декілька рівнів очищення, з використанням відцентрових, інерційних і сил тяжіння або зміни фізичних параметрів пилу. Розміщення в корпусі апарата жалюзійного віддільника, як другого ступеня пилоочищення, дозволяє значно підвищити ефективність пиловловлювання, а акустична і магнітна коагуляція аерозолів є одним з найпрогресивніших методів швидкого збільшення субмікронних частинок промислового пилу, подальше вловлювання яких не становить труднощів. Створення принципово нових апаратів сухого очищення повітря від пилу, які забезпечили б високоефективне вловлювання полідисперсного пилу при зменшенні гідравлічного опору і розмірів установок є предметом наших досліджень.

Нині відсутній єдиний підхід до аналізу існуючих апаратів сухого пилоочищення, що не дає змоги з єдиних позицій вивчати різні конструкції і визначати сферу раціонального використання кожного з них. Аналіз відомих методів сухого пилоочищення показує, що, незважаючи на високоефективне вловлювання високодисперсного пилу, вони не можуть забезпечити очищення дрібнодисперсної фракції понад 85%, а ряд конструктивних удосконалень призводить до значного ускладнення схем пилоочищення. Досі не здійснено теоретичного узагальнення і не вирішено проблему створення математичних моделей процесів руйнування гетерогенних систем шляхом дисипації багатомасштабних турбулентних вихорів, що необхідно для конструювання на їх основі принципово нових типів пиловловлювачів з високою ефективністю вловлювання. У зв'язку з тим виникає потреба у використанні нових принципів конструювання апаратів пилоочищення, які поєднують в одному корпусі декілька ступенів очищення, що базується на використанні відцентрових, інерційних і сил тяжін-

ня або зміні фізичних параметрів пилу. Створення принципово нових апаратів сухого очищення повітря від пилу, які забезпечили б високоефективне вловлювання полідисперсного пилу при зменшенні гідравлічного опору і розмірів установок, становить значний теоретичний і практичний інтерес.

В останні роки у зв'язку зі зростанням обсягів виробництва технічної гуми і виробів з неї суттєвий розвиток отримали дослідження щодо створення ефективніших методів її утилізації. Сьогодні основним споживачем гуми є будівельна індустрія, хоч її особливості (поліелементний склад, специфічні хімічні і фізико-механічні властивості) відкривають нові можливості для використання. Відходи гумового виробництва і відпрацьована гума знаходять широке застосування при виготовленні будівельних матеріалів (цементу, цегли, бетонного каменю, аглопориту, керамзиту, зольного гравію, заповнювачів для бетону й асфальтобетону), а після розмелювання повертаються назад у виробництво.

Для повторного використання відпрацьовану гуму і відходи гумового виробництва потрібно розмолоти до певних розмірів. Зробити це відразу в одній дробарці неможливо, тому загалом використовується двоступеневий розмол: у першій дробарці — до 1 см і в другій — до 100–200 мкм.

Завданням проектувальників була сепарація розмеленої гуми з повітряного потоку, збір її в бункері після першої дробарки та вловлювання дрібнодисперсного пилу і розмеленої гуми після другої дробарки. Продукти, що виділяються при подрібненні інгредієнтів гумових сумішей у цеху переробки відпрацьованих гум і відходів, утворених при виробництві гумових виробів, складаються з більш як двадцяти компонентів (крейди, магнезії, альтаксу, контаксу, оксиду цинка, тальку, сірки, каоліну, альдолю, параксизезону, тіураму, літопану) тощо і мають наступні характеристики.

*Морфологія частинок пилу.* Частинки переважно неправильної форми з розвинутою поверхнею. Частинки розміром менше за 100 мкм бувають сферичними й овальними з включенням сфер. У загальній масі — колір сірий.

*Характеристика продуктів тонкого розмелення.* Медіанний діаметр частинок  $d_{50} = 200$  мкм. Питома поверхня (відношення поверхні частинки до її маси) —  $5850 \text{ см}^2/\text{г}$ .

#### Дисперсний склад пилу (ротатійна сепарація в промислових умовах)

d, мкм	25	40	63	100	160	200	250	300	400
g, % (по масі)	91	84	79	66	54	50	38	24	9
d, м/с	0,04	1,0	0,25	0,65	1,67	2,7	4,05	6,8	10,4

#### Механічні якості:

Густина насипна —  $\gamma_n = 1410 \text{ кг/м}^3$ .

Коефіцієнт абразивності —  $k_a < 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Статичний ( $\beta_{ст} = 63^\circ$ ) і динамічний ( $\beta_d = 40^\circ$ ) кути природного відкосу.

Розривна міцність —  $P = 409 \text{ Па}$ .

**Рівноважна вологість продукту ( $\omega_p$ )  
при різній відносній вологості повітря  $\omega_{пов}$ :**

$\omega_p, \%$	0,2	0,25	0,35	0,6	1,2	2,25
$\omega_{пов}, \%$	10	20	40	60	80	95

*Характеристика газу-носія:*  $t = 80^\circ\text{C}$ , концентрація ( $Z$ ) —  $0,03 \text{ г/м}^3$ ; склад газу —  $100\%$  повітря.

Продукти грубого розмолу мають розмір частинок до  $1 \text{ см}$ , тому дисперсний склад їх не визначали.

Для конструювання системи пиловловлювання для двоступеневого розмолу гумових частинок необхідно визначити швидкості витання й оптимальні швидкості транспортування розмелених продуктів.

Швидкість витання визначаємо за формулою

$$\omega_{вит} = 4,7 \sqrt{d_{50} \cdot \rho} \text{ м/с,}$$

де  $\rho$  — густина матеріалу частинок —  $920 \text{ кг/м}^3$ .

Тоді маємо:

для грубого розмолу —

$$\omega_{вит1} = 4,7 \sqrt{0,001 \cdot 920} = 12,8 \text{ м/с;}$$

для тонкого —

$$\omega_{вит2} = 4,7 \sqrt{0,0002 \cdot 920} = 7,1 \text{ м/с.}$$

Швидкість транспортування частинок знаходимо за формулою

$$\omega_{тр} = 1,5 \omega_{вит}.$$

Тоді:

для грубого розмолу  $\omega_{тр1} = 1,5 * 12,8 = 19,2 \text{ м/с}$ ;

для тонкого —  $\omega_{тр2} = 1,5 * 7,1 = 10,7 \text{ м/с}$ .

Визначимо продуктивність системи пневмотранспорту за формулою

$$L = 3600 \frac{\pi D^2}{4} \omega_{тр},$$

де  $D$  — діаметр трубопроводу для пневмотранспорту пилу,  $\text{м}$  (приймаємо  $100 \text{ мм}$ ).

Тоді маємо:

для грубого розмолу  $L_1 = 3600 \frac{3,14 * 0,1^2}{4} 19,2 = 680 \text{ м}^3 / \text{год}$ ;

для тонкого —  $L_2 = 3600 \frac{3,14 * 0,1^2}{4} 10,7 = 310 \text{ м}^3 / \text{год}$ .

За цими параметрами та сумарним гідравлічним опором системи вибираємо вентилятор:

для грубого розмолу — ВВД №3,14; для тонкого — ВВД №2,5.

За проведеними розрахунками перевіримо визначені швидкості витання частинок пилу.

Визначимо критерій Рейнольдса.

Для грубого розмолу

$$Re_1 = \frac{\omega_{вум1} * \rho_n * d_{50,1}}{M_c} = \frac{12,8 * 1,2 * 0,008}{18,5 * 10^{-6}} = 6642,$$

де  $\rho_n$  — густина повітря — 1,2 кг/м<sup>3</sup>;

$M_c$  — коефіцієнт динамічної в'язкості повітря = 18,5\*10<sup>-6</sup> Па\*с.

Для тонкого розмолу

$$Re_2 = \frac{7,1 * 1,2 * 0,0025}{18,5 * 10^{-6}} = 1151.$$

Знайдемо коефіцієнт сили лобового опору частинки кулеподібної форми за формулою А. Д. Альтшуля:  $C_{Fx} = 0,112(1 + \sqrt{1 + \frac{214}{Re}})^2$ .

Тоді:

$$\text{для грубого розмолу } C_{Fx1} = 0,112(1 + \sqrt{1 + \frac{214}{6642}})^2 = 0,455;$$

$$\text{для тонкого — } C_{Fx1} = 0,112(1 + \sqrt{1 + \frac{214}{1151}})^2 = 0,489.$$

Таким чином, швидкість витання гумових частинок визначається нас-

гупним чином:  $\omega_{вум} = 3,62 \sqrt{\frac{\rho d_1}{\rho_n C_{Fxx}}}$ , м/с.

Тоді:

$$\text{для грубого розмолу } \omega_{вум1} = 3,62 \sqrt{\frac{920 * 0,008}{1,2 * 0,455}} = 13,3 \approx 12,8 \text{ м/с};$$

$$\text{для тонкого — } \omega_{вум2} = 3,62 \sqrt{\frac{920 * 0,0025}{1,2 * 0,489}} = 7,2 \approx 7,1 \text{ м/с}.$$

Розроблено установку для сепарації гуми після двох дробарок грубого розмолу (рис. 1), яка складається з дробарки грубого розмолу 1, трубопроводів 2 і 3, вентиля-шибера 4, відцентрово-інерційного пиловловлювача 5, бункера 6, вентилятора 7 з двигуном 8. Схема сепарації з другої дробарки аналогічна першій, і пилоповітряна суміш надходить відповідно в лівий відцентрово-інерційний сепаратор, а відсепарована гума скидається в бункер.

Як відцентрово-інерційний сепаратор запропоновано використовувати сконструйований авторами апарат (рис. 2), що складається з циліндрично-конічного корпусу 1 вхідного патрубку 2, вихідного патрубку 3, жалюзійного відокремлювача 4, пиловипускного патрубку 5.

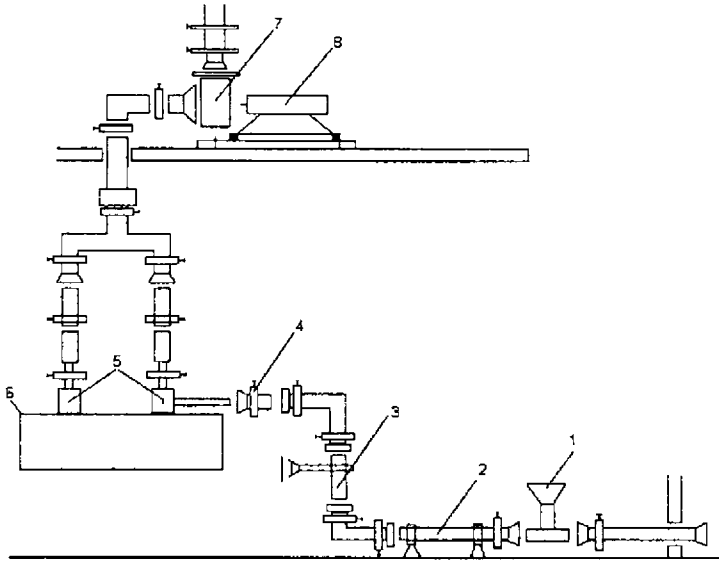


Рис. 1. Схема сепарації гуми після дробарки грубого розмолу

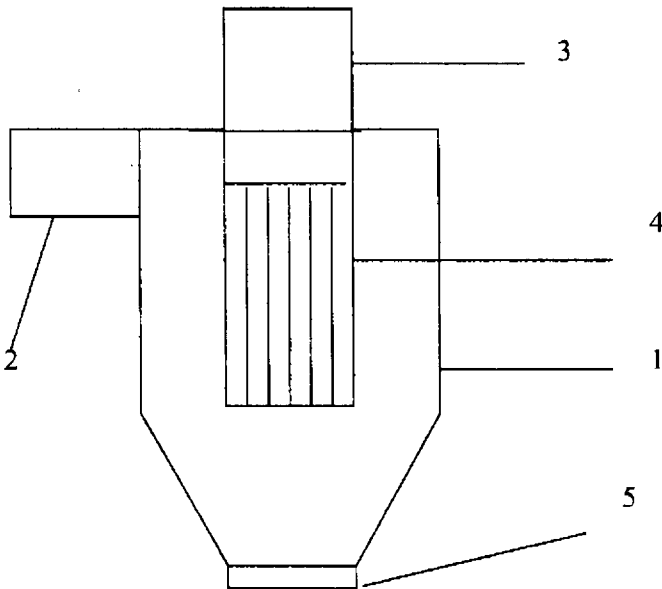


Рис. 2. Схема сепаратора

Пилоповітряна суміш надходить в апарат 1 через патрубок 2 тангенційно, де, обертаючись навколо патрубку виходу чистого повітря 3, очищається від грубодисперсних фракцій пилу під дією відцентрових сил, у результаті чого вони відкидаються до стінки корпусу 1. Вторинна очистка повітря від дрібнодисперсного пилу відбувається під дією сил інерції при проходженні отворами між жалюзі відокремлювача 4, коли частинки пилу, не встигаючи

за повітряним потоком, стикаються з жалюзі, відбиваються від неї (кількість зіткнень залежить від типу та якостей пилу) доти, доки не попадуть у потік грубодисперсного пилу, який рухається вздовж стінки корпусу 1 апарата до пиловипускного патрубку 5. Ефективність роботи запропонованої установки складає 99,6%, тобто більше порівняно з циклоном ЦН-11 на 12–15%, при цьому знижується гідравлічний опір апарата в 1,5 раза.

Для тонкого розмолу запропонована установка (рис. 3), де вентилятор 1 працює в режимі нагнітання і трубопроводом 2 транспортує пил, який виділяє дробарка тонкого розмолу 3, у відцентрово-інерційний пиловловлювач 4, в якому відбувається відокремлення дрібнодисперсної гуми і пилу з пилогазового потоку. Очищене повітря викидається назовні через трубопровід 5, а очищений пил збирається в бункері.

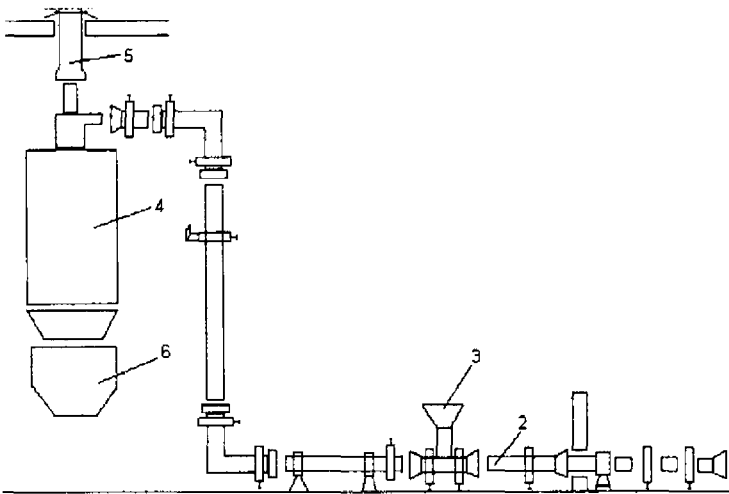


Рис. 3. Схема установки пилоочиснення і сепарації після дробарки дрібного розмолу

Пиловловлювачем слугує запропонований принципово новий апарат, розроблений авторами, котрий складається з чотирьох секцій, діаметр яких збільшується зверху вниз для збереження постійною швидкості руху повітря в корпусі, що є обов'язковою умовою для підвищення ефективності його роботи. Залежно від ступеня помолу, заданого нами, автоматично змінюється кут повороту жалюзей відокремлювача — відповідно до четвертого, п'ятого, шостого, сьомого ступенів.

Кожна жалюзь віддільника, що обертається навколо вертикальної сторони, закріплена між верхньою і нижньою нерухомими основами, повертається на кут від  $0^\circ$  до  $60^\circ$  за допомогою регульовального кільця з приєднаним до нього штоком, який дає можливість регулювати кут атаки, знаходячи його оптимальне значення залежно від типу, розміру, якостей пилу і режимів роботи установки. Чим більший кут атаки, тим гостріший кут попадання пилоповітря-

ної суміші всередину віддільника і тим більша ймовірність відбиття частинок пилу до стінки корпусу апарата. Крім того, це дає можливість автоматично (за допомогою ЕОМ) встановлювати оптимальний кут атаки для конкретного виду пилу і певної продуктивності установки стосовно кожної з чотирьох секцій віддільника, регулюючи таким чином процес пилоочистки. Знаючи наперед тип пилу і технологічні режими роботи установки, за допомогою ЕОМ автоматично встановлюємо положення кожного штока (для кожної з чотирьох секцій), який визначає положення регулювального кільця і жалюзі всієї секції, сполучених з ним, на рівні оптимального значення кута атаки, тобто кута повороту жалюзі. А це, в свою чергу, приводить до підвищення ефективності пиловловлювання і зменшення гідравлічного опору апарата.

Визначивши оптимальні кути атаки для певного виду пилу та його медіанного розміру і внісши ці дані в базу даних ЕОМ, зможемо в подальшому автоматично або вручну запропонованим вище способом встановлювати оптимальний кут повороту жалюзей для кожного окремого виробництва.

За необхідності вловлювання грубодисперсного пилу при великих затратах повітря жалюзі секції повертають таким чином, щоб забезпечити мінімальний кут атаки, при якому аерозолі будуть стикатися з жалюзі ближче до її зовнішньої частини (в напрямку корпусу апарата), тобто збільшити ймовірність і силу їх відбиття від жалюзі. Зі зміною дисперсного складу (медіанного розміру) частинок і зменшенням затрат повітря при підході до кожної наступної секції віддільника необхідно збільшити кут атаки (кут повороту жалюзі до траєкторії руху потоку), щоб досягнути підвищення ефекту відбиття аерозолів у корпус апарата. Проведено експериментальні дослідження з визначення оптимальних кутів атаки для стандартного експериментального пилу (кварцового піску) з медіанним діаметром 50 мкм на стенді НУ «Львівська політехніка» при витраті повітря 3000 м<sup>3</sup>/год. Результати випробувань наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Медіанний діаметр аерозолу, мкм	Номер секції віддільника	Ефективність пиловловлювання, %; кут повороту жалюзі, град.										
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
50	5	91,3	93,8	96,5	96,8	97,4	97,0	97,6	95,9	91,1	85,2	76,1
32	6	90,0	92,1	95,8	96,5	96,0	95,9	95,3	93,8	86,1	85,3	75,2
16	7	89,1	92,1	95,0	94,9	93,8	93,2	92,8	92,5	84,0	83,2	74,1
8	8	87,5	87,2	86,9	86,2	80,1	75,5	71,2	67,5	61,2	60,1	58,1



Як бачимо, з введенням в апарат пилу з медіанним розміром 50 мкм при підході до другої (зверху вниз) секції віддільника діаметр пилу зменшується до 32 мкм, до третьої — до 16, до четвертої — до 8 мкм. Це явище пояснюється, по-перше, виділенням грубодисперсного пилу при первинній очистці повітря (газу), а по-друге, розмелюванням аерозолей при їх зіткненні з жалюзі і корпусом апарата та при стиканні одного з одним.

Кожний розмір пилу потребує певного кута атаки, тобто кута повороту жалюзі:  $\delta_{50} = 8$  мкм — 0 град., тобто траєкторія руху потоку збігається з положенням площі жалюзі;  $\delta_{50} = 16$  мкм — 10 град.;  $\delta_{50} = 32$  мкм — 15 град.;  $\delta_{50} = 50$  мкм — 30 град.

Отже, при збільшенні медіанного розміру пилу зростає кут повороту жалюзі, що також підтверджено математичною моделлю процесу пиловловлювання в запропонованому пиловловлювачі.

На цьому ж стенді проведено порівняльні дослідження рекомендованого пиловловлювача і ЦН-11 з використанням стандартного пилу (кварцового піску). Отримані дані зафіксовано в табл. 2.

Таблиця 2

Затрати повітря, м <sup>3</sup> /год	Ефективність пиловловлювання, %							
	запропонованого апарата				ЦН-11			
	8	16	32	50	8	16	32	50
1000	82,7	93,2	94,4	95,1	71,0	92,1	93,1	94,3
2000	84,6	94,7	95,6	96,8	75,4	93,5	94,2	95,8
3000	87,5	95,0	96,5	97,6	81,2	94,2	95,1	96,5

Таким чином, стає очевидним, що виготовленням жалюзі кожної секції пиловловлювача з можливістю поворота на точно визначений для даного типу пилу кут досягаємо встановлення оптимального кута атаки для пилегазового потоку на всьому його шляху всередині апарата, чим досягається значне підвищення ефективності пиловловлювання і зменшення гідравлічного опору.

Попередньо на експериментальному стенді НУ «Львівська політехніка» було відпрацьовано питання підбору кута повороту жалюзей віддільника залежно від необхідного ступеня розмелювання. Кут нахилу жалюзей змінювався для четвертого, п'ятого, шостого і сьомого ступенів у межах від 10 до 40 град., а відстань між дисками дробарки від 100 до 400 мкм. Таким чином, було знайдено оптимальні співвідношення цих параметрів (див. табл. 1), що дозволяють отримати максимальну ефективність вловлювання продуктів розмелювання (у даному випадку гуми).

Отож, залежно від необхідних параметрів роботи дробарки і заданих розмірів продуктів розмелювання, які визначаються величинами між дисками дробарки, можна автоматично (з блока управління, виведеного на щиток) змінювати кут повороту жалюзей усіх чотирьох секцій жалюзійного віддільника.

Таблиця 3

Відстань між дисками дробарки, мкм	Оптимальний кут повороту лез, град.				Ефективність вловлювання пилю, %
	4 ступінь	5 ступінь	6 ступінь	7 ступінь	
100	0	10	15	30	98,8
200	5	15	20	30	98,9
300	10	20	25	30	99,0
400	15	25	30	35	99,2

Промислові випробування рекомендованих установок довели, що ефективність вловлювання продуктів розмелювання після дробарки грубого розмолу складає 99,6%, а тонкого — 98,7–99,2% (залежно від його дисперсності). Порівняльні дослідження з аналогічними виробництвами, де пилоочищувачем слугував циклон ЦН-11, встановили, що запропоновані схеми сепарації та вловлювання дозволили підвищити ефективність процесу на 1,5–2,2%, зменшивши при цьому гідравлічний опір у півтора раза.

1. Батлук В. А. Высокоэффективное улавливание полидисперсной пыли, образующейся при механической обработке сыпучих материалов и сред // Обработка дисперсных материалов і середовищ, теорія дослідження технології обладнання: зб. наук. пр. / В. А. Батлук, Ю. Є. Шелюх, А. В. Мельников, Р. А. Яцюк. — Одеса: НВО «Вотум», 2002. — Вип. 12. — С. 101–104.
2. Батлук В. А. Охрана праці у будівельній галузі: навч. посіб. / В. А. Батлук, Г. Г. Гогіташвілі. — К.: Знання, 2006. — 550 с.

## ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЕ В ПРОЦЕССАХ РАЗМОЛА РЕЗИНЫ

*Развиты новые направления конструирования аппаратов пылеочистки, базирующихся на действии центробежно-инерционных сил. Рассмотрены вопросы экспериментальных исследований принципиально новых аппаратов. Установлено, что применение предложенных пылеулавливателей позволяет реализовать единый подход к их подбору с учётом специфики каждого конкретного производства.*

## DUST SUCTION IN THE PROCESS OF GRINDING RUBBER

*New directions of creation of vehicles of nuloочистки are in-process developed, that are based on the use of action of centrifugal-inertia forces. The questions of experimental researches on principle of new vehicles are considered. It is set that application of offered dust collecktion, allows to realize the unique fitting for nidbopy them taking into account the specific of every concrete production, to define the area of the rational use each as vehicles. Basic job performances found practical application at development of high-efficiency charts of cleaning of air from a dust at the processes of separashion rubber.*

Стаття надійшла 19.11.09