

УДК 622.411.52:532:62-784.4

**В.Б. Малеев**, д-р техн. наук, проф.,  
**В.Б. Гого**, д-р техн. наук,  
**А.А. Кудрявцев**, ассистент, **А.В. Малеев**, инженер  
Донецкий национальный технический университет

## **ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКАМЕРНОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДАВЛЕНИЯ ПЫЛИ ОРОШЕНИЕМ**

*Разработана принципиальная схема и технологический процесс многокамерного гидро-эжектора, с возможным впрыском в камеру смешения сжиженного азота.*

**технологический процесс, подавление пыли, рабочая жидкость, орошение, эжектор**

*Проблема и её связь с научными или практическими задачами.* Возникновение крупных аварий на шахтах Украины, вызванных внезапными взрывами пыле-метановоздушных смесей в горных выработках, требует поиска новых эффективных технических предложений по снижению вероятности взрывов. Наличие пыли в метановоздушной смеси при взрыве способствует значительному увеличению силы взрыва и образованию большого объёма токсичных газов высокой концентрации. Кроме того, пыль агрессивно действует на оборудование поверхностного комплекса, провоцирует опасные заболевания органов дыхания рабочих (вентиляторные установки главного проветривания угольных шахт в течение суток выбрасывают в шахтный поверхностный комплекс более 1,5 тонн аэрозольной пыли каждая, создавая при этом превышение ПДК в 2-3 раза).

*Анализ исследований и публикаций.* Для эффективного осаждения рудничной пыли в угольных шахтах скорость самопроизвольной коагуляции совершенно недостаточна. Наиболее существенно скорость коагуляции может быть повышена под действием внешних сил, способствующих увеличению скоростей частиц относительно друг друга и приводящих к более частому их столкновению. Этого можно достигнуть путём применения электрических и магнитных полей, акустических и ультразвуковых колебаний, искусственного перемешивания аэрозоля, использования эффекта разности скоростей частиц под действием гравитационных или центробежных сил [1-9].

Анализ научно-технической информации о применяемых средствах коллективной защиты рабочих от пыли показал, что в основном

подавление рудничной пыли проводится орошением. Однако известные теоретические работы по вопросам гидравлического пылеподавления и пылеулавливания не в полной мере отражают сложные процессы взаимодействия и захвата частиц пыли каплями жидкости, что не даёт возможности обосновать новые технические решения для повышения эффективности гидродинамического обеспыливания в целях предупреждения внезапных взрывов пылеугольных смесей.

**Постановка задачи.** Разработать принципиальную схему и технологический процесс многокамерного гидро-эжектора с возможным впрыском в камеру смешения сжиженного азота для гидродинамического подавления пыли орошением при механизированном (комбайновом) ведении очистных и проходческих работ.

**Изложение материала и результаты.** Экспериментальные исследования позволили определить, что для разрабатываемого эжектора наиболее эффективной является цилиндрическая форма камеры смешения компонентов рабочей жидкой среды и пассивной среды - запыленного воздуха.

Весьма важно и то, что цилиндрическая камера технологичнее в изготовлении, а это существенно для внедрения многокамерного эжектора в системах подавления и улавливания пыли в условиях угольных шахт.

На рис. 1 показана схема многокамерного эжектора для гидродинамического подавления пыли, разработанного на основе патента [10].

Конструкция многокамерного эжектора расширяет его технологические возможности в процессах перемещения и очистки газов от пыли за счет того, что камера смешения рабочей жидкости и запыленного газа выполнена в виде концентрично расположенных цилиндров, длины и диаметры которых увеличиваются в направлении потока от оси к периферии, создавая на выходе потока ступенчатый диффузор, а на входе - ступенчатый конфузор.

Многокамерный эжектор содержит активное сопло 1 для подачи жидкости (например, воды) в камеру 2, в которую поступает запыленный воздух. Камера 2 переходит в камеру смешивания 3, выполненную в виде концентрично расположенных цилиндров 4 разной длины и диаметров, что создаёт на входе потока ступенчатый конфузор 5, а на выходе - диффузор 6.

Многокамерный эжектор действует следующим образом. Поток рабочей жидкости (воды) поступает под давлением из активного сопла 1 в камеру смешения 3, в которую из камеры 2 захватывается

(всасывается, инжектируется) воздух (газ) с пылью (или другими примесями).

При этом образуется газожидкостная смесь, которая, выходя из первого цилиндра камеры смешивания 3, расширяется, что вызывает повышение давления по движению потока. Это ведёт к тому, что часть газожидкостной смеси поступает во второй и последующие цилиндры 4 в обратном направлении в каналах между цилиндрами, создавая газожидкостную механическую эмульсию, которая перемещается в камеру 2 подачи загрязнённого газа.

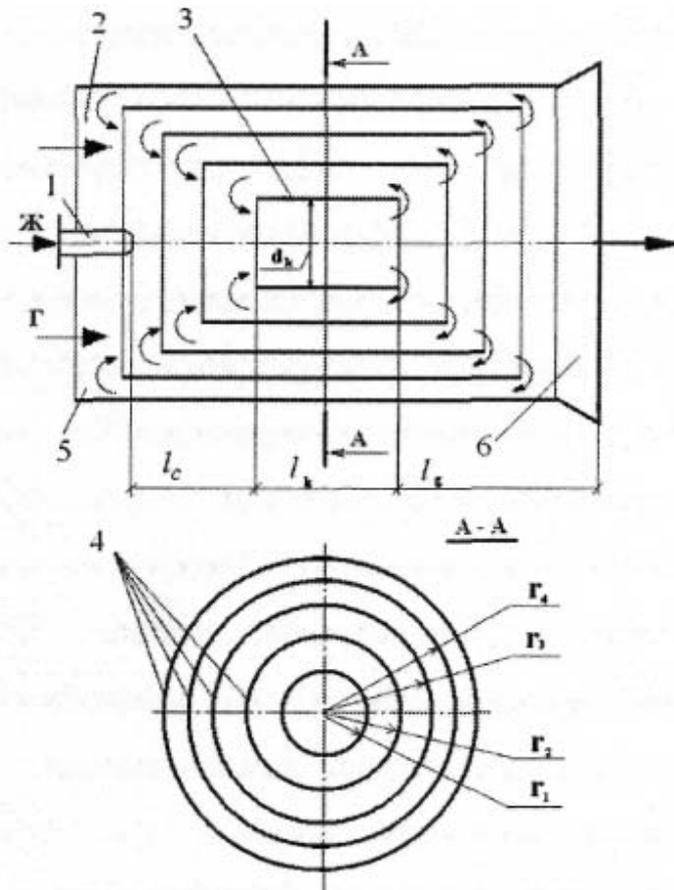


Рисунок 1. - Схема многокамерного эжектора для гидродинамического подавления пыли

давая газожидкостную механическую эмульсию, которая перемещается в камеру 2 подачи загрязнённого газа.

Возникновение механической эмульсии из жидкости и газа с пылевыми частицами обусловлено тем, что при повышении давления в диффузорной части потока жидкость насыщается газом, который при обратном течении в каналах между цилиндрами выделяется, вспенивая жидкость как механическую газожидкостную эмульсию, в результате падения давления в каналах в направлении от диффузора к конфузору. Из камеры 2 эмульсия, истекающая из каналов ступенчатого конфузора 5, захватывается загрязнённым газом и вместе с ним засасывается в камеру смешения 3 активной струей воды.

Движение эмульсии по каналам между цилиндрами в направлении, обратном движению струи активной жидкости, загрязнённого газа и образовавшейся газожидкостной смеси, т.е. от диффузора к конфузору обусловлено повышенным давлением среды в диффузоре 6 и сниженным давлением в конфузоре 5. Поступление эмульсии в камеру смешения активизирует адгезионные свойства жидкой среды по улавливанию частиц пыли из газа, т.к. истечение эмульсии из кольцеобразных выходных сечений конфузора способствует увеличению площади контакта жидкой среды и запылённого газа. К тому

же, пузырьки механической газожидкостной эмульсии под действием твёрдых частиц пыли разрушаются (схлопываются), образуя мельчайшие капли, которые повышают концентрацию жидких капель в камере смешения 3; следовательно, вероятность их столкновения и связывания с частицами пыли, особенно фракций  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  м.

Такая конструкция многокамерного эжектора позволяет перемещать и очищать запыленный воздух (газ) путём трансформации кинетической энергии жидкости в энергию смешения газа, пыли и жидкости в обратных течениях газожидкостной механической эмульсии в пространствах (зазорах) между цилиндрами камер смешения, повышающих эффективность улавливания пыли эмульсионной средой.

Газожидкостная эмульсионно-механическая смесь из диффузора эжектора направляется на источник пыли, обеспечивая его орошение и активизируя пылеподавление. Исследуем гидродинамический процесс многокамерного эжектора. Рабочая жидкость, выходящая из сопла, инжектирует запылённый газ, создавая через камеру смешения массовый расход газожидкостного запыленного потока:

$$G = G_P + G_H, \quad (1)$$

где  $G$  - массовый расход смеси, кг/с;

$G_P$  - массовый расход рабочей жидкости, кг/с;

$G_H$  - массовый расход пассивной среды - газа, кг/с.

В цилиндрической камере смешения происходит ускорение газожидкостного потока и активное дробление жидкости на капли, которые сталкиваются с частицами пыли. Из камеры смешения поток поступает в диффузорную часть эжектора. На основе закона сохранения составим уравнение импульсов для цилиндрического участка камеры смешения в виде [11]:

$$\varphi_2 (G_P w_{P_2} + G_H w_{H_2}) - G w_3 = (P_3 - P_{P_2}) f_{P_2} + (P_3 - P_{H_2}) f_{H_2}, \quad (2)$$

где  $\varphi_2$  - коэффициент скорости;

$w_{P_2}$  - скорость жидкости на входе в камеру смешения, м/с;

$w_{H_2}$  - скорость инжектируемого запылённого газа на входе в камеру смешения, м/с;

$w_3$  - скорость смеси на выходе из камеры смешения, м/с;

$P_{P_2}$ ,  $P_{H_2}$ ,  $P_3$  - соответственно, статические давления компонентов в сечениях входа и выхода, Па;

$f_{P_2}$ ,  $f_{H_2}$  - соответственно, площади, которые приходятся на рабочие части потока.

В цилиндрической камере смешения имеем:

$$f_3 = f_{P_2} + f_{H_2},$$

где  $f_3$  - площадь сечения камеры смешения.

На основе закона сохранения массы запишем массовый расход газожидкостной смеси через камеру смешения:

$$G_C = G_P + G_H = G_P(1 + u), \quad (3)$$

где  $u$  - коэффициент инжекции.

Для обеспечения необходимой инжекции запылённого газа струя рабочей жидкости должна иметь свободную длину  $l_C$  и диаметр на входе в камеру смешения равный диаметру камеры, т.е.  $d_c = d_K$  (см. рис. 1). Струя жидкости, вытекающая из сопла, подвержена ряду возмущений, обусловленных турбулентностью, вязкостью и т.д. Внутренние силы и силы поверхностного натяжения жидкости стремятся обеспечить равновесную форму струи, близкую к конусу, вершина которого располагается в выходном сечении сопла, а основание - во входном сечении камеры смешения. Неустойчивое состояние действующих сил ведёт к возникновению пульсаций струи. Пульсирующие возмущения вызывают распад струи жидкости, т.е. дробление ее на капли. Пульсации струи жидкости генерируют пульсации в газовой среде, которые ускоряют процесс распада струи жидкости и активизируют столкновения капель жидкости с твердыми частицами пыли.

Как показали эксперименты, истечение струи жидкости при низких скоростях (до 10 м/с) вызывает распад струи с симметричными по отношению к оси колебаниями. Последующее увеличение скорости истечения жидкости ведет к волнообразным колебаниям струи, обусловленным вязкостью жидкости и окружающего запылённого газа. Процесс наложения волнообразных колебаний струи жидкости на её осевые колебания активизирует дробление жидкости на мелкие капли, диспергируя её инерционными силами в запыленной газовой среде, что повышает эффективность столкновений капель жидкости и частиц пыли.

Для определения скоростей истечения жидкости, при которых начинается резкое снижение устойчивости струи при наложении осесимметричных и волнообразных колебаний, составим следующие определяющие критерии:

$$\alpha = \frac{\rho_{ж} \sigma_{ж} l_C}{\mu_{Г}^2}; \quad \beta = \frac{\mu_{ж}}{\mu_{Г}}; \quad \gamma = \frac{\rho_{Г}}{\rho_{ж}}; \quad c = \frac{\mu_{ж} W}{\sigma_{ж}},$$

где  $\alpha$  - критерий соотношения сил поверхностного натяжения жидкости и вязкости;

$\beta$  - критерий соотношения сил вязкости жидкости и газа;

$\gamma$  - критерий соотношения плотностей газа и жидкости;

$c$  - критерий, характеризующий соотношение инерционных и вязкостных сил и сил поверхностного натяжения жидкости.

На основании экспериментальных данных определена функциональная связь между критериями и параметрами в следующем виде:

$$c\sqrt{\gamma} = f\left[\alpha\beta^{0.5}\right]^n, \quad (4)$$

где  $n$  – показатель, при котором начинается распад (диспергирование) струи воды ( $n = 0,5$ ).

Соотношение (4) охватывает значения численных критериев:

$$\alpha = 0,01\dots 10^5; \quad \beta = (0,3\dots 5)10^4; \quad \gamma = 1\dots 10^3.$$

Длина сплошной части струи воды до её распада на капли при входе в первую камеру смешения определяется по формуле:

$$l_C = \langle w \rangle t_0, \quad (5)$$

где  $\langle w \rangle$  - средняя скорость жидкости на участке между сечением сопла и сечением входа в камеру смешения, м/с;

$t_0$  - время перемещения струи между сечениями.

Используя известную формулу К.Вебера [12], будем иметь:

$$t_0 = \frac{54\mu^3\alpha}{\rho\sigma^2}. \quad (6)$$

Следовательно, длина  $l_C$  будет равна:

$$l_C = \frac{54\langle w \rangle\mu^3\alpha}{\rho\sigma^2}. \quad (7)$$

Длина сплошной части струи жидкости позволяет расположить сопло на необходимом расстоянии от входного сечения камеры смешения. Диаметр струи на входе в камеру смешения принимаем равным:

при  $u \leq 0.5$  -

$$d_k = 3.14d_1(0.083 + 0.76u)^{0.5},$$

при  $u > 0.5$  -

$$d_k = 1.55d_1(1 + u),$$

где  $d_1$  - диаметр выходного сечения сопла жидкости.

На основании опытных данных можно принять длину камеры смешения:

$$l_k = (6...10)d_k.$$

Длина ступенчатой диффузорной части при угле раскрытия порядка  $20^\circ$ , составит:

$$l_g = (8...10)(d_c - d_k).$$

Площадь выходного сечения ступенчатого диффузора равна площади входного сечения ступенчатого конфузора:

$$f_c = \frac{G_P(1+u)}{\rho_c w_c};$$

$$f_c = \pi \left\{ \sum_2^N [r_1 + (n-1)a]^2 - \sum_2^N [(r_1 + \delta) + (n+2)(a + \delta)]^2 \right\},$$

где  $\delta$  – толщина стенки цилиндра;

$a$  – расстояние между соседними одноимёнными поверхностями цилиндров;

$N$  – число цилиндрических камер;

$n=2...N$  – номер цилиндрической камеры.

Рассмотрим показатели эффективности применения многокамерного мультисканального эжектора в системе гидрозащиты от взрывов угольной пыли в условиях шахты. В результате экспериментальной проверки эффективности применения мультисканального эжектора в системе непрерывной туманообразующей завесы установлено, что эффективность связывания угольной пыли зависит от времени непрерывной работы туманообразующей завесы.

В условиях шахты А.Г. Стаханова ГП «Красноармейскуголь» проведен эксперимент с мультисканальными эжекторными туманообразующими завесами.

В таблице 1 приведены гидродинамические параметры мультисканального эжекторного туманообразователя.

Таблица 1. Параметры компонентов эжекторного туманообразователя

| № п/п | Параметр                                   | Значение          |
|-------|--|-------------------|
| 1     | Давление рабочего воздуха, Па              | $3 \cdot 10^5$    |
| 2     | Расход рабочего воздуха, м <sup>3</sup> /с | $3 \cdot 10^{-2}$ |
| 3     | Давление воды, Па                          | $2 \cdot 10^5$    |
| 4     | Расход воды, м <sup>3</sup> /с             | $1 \cdot 10^{-5}$ |

На участке вентиляционного штрека длиной 154 м, примыкающем к лаве, были рассредоточены 6 эжекторных завес. Число мультиканальных эжекторных туманообразователей в завесе определялась из расчёта один эжектор на  $500 \text{ м}^3/\text{мин}$  проходящего по выработке воздуха. В завесе было установлено 3 эжекторных туманообразователя. Учитывая, что скорость воздуха в выработке составляла примерно 2 м/с, факел эжектора располагался по движению вентиляционной струи. Эжекторная завеса действовала в течении всего времени работы комбайна в лаве. Первая эжекторная завеса располагалась на расстоянии 10 м от лавы, а вторая - 40 м. Расстояния между последующими завесами составляло 25 м.

При испытании первой завесы (после 15 мин её действия) подавление пыли происходило на расстоянии 30-35 м. Через 30 мин длина этого участка увеличилась: по почве до 75 м, а по стенкам и кровле выработки до 65 м. Эти показатели в 1,5 раза выше, чем у туманообразователей ТЗ-1 (АСШУ-М), ФТ, ОП-1 [13].

Снижение запылённости воздуха более чем на 97 % в результате длительного действия мультиканальных водоэжекторных завес повышает взрывобезопасность при ведении взрывных работ. Уменьшение загрязнённости рудничной атмосферы пылью и продуктами взрыва в результате действия мультиканальной эжекторной завесы сокращает время проветривания забоя, улучшает санитарно-гигиенические условия труда шахтёров.

Повысить эффективность улавливания пыли многокамерными эжекторами в очистных и проходческих забоях, а также снизить вероятность внезапных взрывов пыли и метана возможно в результате применения в эжекторах сжиженного азота [14].

**Выводы.** Многокамерный эжектор будет эффективен для пылеподавления в системах орошения при перемещениях секций механизированных крепей. Орошение многокамерным эжектором можно применять на вентиляционных штреках, примыкающих к лавам; откаточных выработках, пунктах погрузки горной массы в районах опрокидывателей и сопряжений с уклонами и бремсбергами, призабойных участках подготовительных выработок, конвейерных выработок и др., с целью уменьшения увлажнения горной массы и оборудования, а также повышения эффективности пылеподавления.

Список источников:

1. Медведев Э.Н., Мартовицкий В.Д., Кашуба О.И., Крутенко С.А., Топчий СЕ. Теория и практика охраны труда на угольных шахтах. - Макеевка, МакНИИ: ООО «Промдрук», 2006. - 600 с.
2. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / П.М. Петрухин, Г.С. Гродель, Н.И. Жилиев и др. - М.: Недра, 1981. - 271с.

3. Ищук И.Г. Прогнозирование запыленности рудничной атмосферы и обоснование комплекса эффективных способов и средств обеспыливания очистных забоев угольных шахт: Диссертация на соискание степени докт. техн. наук. / ИГД им. А.А. Скочинского. - М., 1989.- 421 с.
4. Бурчаков А.С. Научные основы обеспыливания атмосферы в очистных и подготовительных забоях угольных шахт: Дис. на соиск.учен.степ. докт.техн.наук / МГИ. - М., 1963. - 389 с.
5. Болдин В.Н. Проектирование мероприятий по борьбе с пылью в очистных забоях. - Киев: Наукова думка, 1978. - 118 с.
6. Новые способы борьбы с пылью в угольных шахтах / Ф.М.Гельфанд, В.П. Журавлев, А.П. Поелуев, Л.И. Рыжих. - М.: Недра, 1975. - 288 с.
7. Поздняков Г.А. Эффективность очистки рудничного воздуха от витающей пыли диспергированной водой. - В кн.: ИГД им. А.А. Скочинского. Науч. сообщ. Вып. 159. - Эффективные способы и средства борьбы с пылью в угольных шахтах. - М.: 1977. - с. 11-17.
8. Справочник по борьбе с пылью в горнодобывающей промышленности. / Под ред. А.С. Кузьмича. - М.: Недра, 1982. - 240 с.
9. Поздняков Г.А., Мартынюк Г.К. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях. - М.: Наука, 1983. - 126 с.
10. Декларацийний патент № 16953 Україна, МПК F04 F5/16. Ежектор / В.Б. Гого, В.Б. Малеев; Заявл. 10.11.05; Опубл. 15.09.06, Бюл. № 9.
11. Соколов ЕЛ., Зингер Н.М. Струйные аппараты. - М.: Энергия, 1970.-288 с.
12. Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии / Р.Ф. Ганиев, Н.И. Кобаско, В.Д. Лакиза и др. - Киев: Техника, 1980.-142 с.
13. Поздняков Г.А. Эффективность очистки рудничного воздуха от витающей пыли диспергированной водой. - В кн.: ИГД им. А.А. Скочинского. Науч. сообщ. Вып. 159. - Эффективные способы и средства борьбы с пылью в угольных шахтах. - М.: 1977. - с. 11-17.
14. Декларацийний патент №27195 (UA) МПК (2006), E21F 5/100. Спосіб попередження вибуху газопилоповітряної суміші в гірничих виробках / Малеев В.Б., Семенченко А.К., Булич О.С, Москаленко СВ. опубл. 25.10.2007, Бюл. №17.-4 с.

**В.Б.Малеев, В.Б.Гого, О.О.Кудрявцев, А.В.Малеев.** Застосування багатокамерного ежектора для гідродинамічного придушення пилу зрошенням. Розроблено принципову схему й технологічний процес багатокамерного гідро-ежектора, з можливим упорскуванням у камеру змішання зрідженого азоту. технологічний процес, придушення пилу, робоча рідина, зрошення, ежектор

**V.B.Maleev, V.B.Gogo, A.A.Kudrjavzev, A.V.Maleev.** Application of the multichamber egector for hydrodynamical suppression of a dust by an irrigation. The basic circuit and technological process multichamber hydras - эжектора, with possible injection in the chamber of mixture of the liquefied nitrogen is developed. technological process, suppression of a dust, working liquid, irrigation, egector

Стаття надійшла до редколегії 10.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.М.Улитин

© В.Б.Малеев, В.Б.Гого, А.А.Кудрявцев, А.В.Малеев, 2010