

УДК 622.8.7:502

**В.Б. Гого**, д-р техн. наук, доц.,  
**Ю.Ф. Булгаков**, д-р техн. наук, проф.,  
Донецкий национальный технический университет

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС И УСТРОЙСТВО ИМПУЛЬСНО-ВОЛНОВОГО ОБЕСПЫЛИВАНИЯ ВОЗДУХА

*В работе изложена математическая модель гидродинамического процесса импульсно-волнового воздействия капель на частицы пыли с целью повышения эффективности обеспыливания воздуха.*

**Ключевые слова:** модель, импульсно-волновое гидрообеспыливание, воздух, пыль, капли.

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Для обеспечения безопасных условий труда шахтёров на угольных предприятиях актуальной является борьба с угольной пылью. Это связано, прежде всего, с угрозой заболевания пылевой этиологии, а также формированием взрывоопасной среды. Как показывает практика борьбы с пылью, наибольший эффект достигается при гидроорошении и гидропылеулавливании в комплексе мероприятий, которые включают снижение пылеобразования, борьбу с распространением пыли и очисткой рудничного воздуха. Для разработки эффективных устройств гидрообеспыливания актуальным является решение проблемы физико-математического моделирования процессов улавливания каплями частиц пыли.

*Анализ исследований и публикаций.* Анализируя теоретические работы и исследования по проблемам гидрообеспыливания, в частности [1-3], приходим к выводу, что в разработанных моделях улавливания частиц пыли каплями (например, воды) весьма упрощенно отражено сущность процесса и поэтому в практические решения закладывались результаты экспериментальных исследований, что не позволяло аналитически обосновать направление для повышения эффективности гидропылеулавливания.

Работа над теоретической стороной этого вопроса приводит к необходимости сформулировать *цель исследования*, излагаемого в статье, как моделирование процесса импульсно-волнового воздействия капель на частицы пыли в воздушном (газовом) потоке для нахождения характеристик, которые влияют на повышение эффектив-

ности процесса гидрообеспыливания, а также разработку необходимых устройств.

**Постановка задачи.** Смоделировать и описать гидродинамический процесс движения и взаимодействия капель жидкости и частиц пыли в потоке воздуха (газа) с учетом того, что частицы пыли и капли находятся в поступательно-вращательных и колебательных движениях, создаваемых в рабочем пространстве потока при изменениях режимов течений в определенных сечениях потока.

**Изложение материала и результаты.**

Для решения задачи о движении капель жидкости и частиц пыли в газовом потоке при определенности их физических параметров предположим, что степень их подобия определяется факторами – амплитудой и частотой пульсаций компонентов в потоке заданной конфигурации, например диффузор-конфузорного типа.

Рассмотрим суть математического моделирования процесса импульсно-волнового гидрообеспыливания газового потока, на который воздействует диспергированная жидкость (капли), с учетом динамических эффектов среды при различных соотношениях между собственной частотой пульсаций потока и частотой вынуждающих колебаний капель в результате пульсаций давления в сечениях потока. Как объект исследования рассматриваем динамическое состояние капель, воздействующих на частицы пыли, относительно неинерциальной системы координат, образуемой в объеме диффузор-конфузорного пространства течения потока.

Прототипом диффузор-конфузорной трубы (ДКТ), защищённой авторским свидетельством [4], позволяющей реализовать импульсно-волновые эффекты в процессах улавливания частиц пыли каплями жидкости, является труба Вентури, которая применяется в скрубберах для очистки газов от пыли диспергированной водой. Гидравлическое сопротивление скруббера Вентури растет с увеличением расхода жидкости и зависит от способа подачи жидкости в трубу. Увеличение относительной скорости газа и жидкости до 40 м/с с целью улучшения каплеобразования не обеспечивает достаточного времени контакта между каплями жидкости и частицами пыли. К тому же завышения скорости между компонентами потока способствует «проскальзыванию» частиц пыли мимо жидких капель без эффекта улавливания, т.е. внедрения пыли в каплю или обволакивания каплей частицы пыли. Этот недостаток гидродинамического процесса трубы Вентури устраняет диффузор-конфузорная труба, которая создает гидропульси-

рующее перемещение потока и качественно изменяет взаимодействие – поглощение частицы пыли каплей жидкости.

Проведем качественное исследование процесса изменения параметров газожидкостного потока при переходе из диффузорной части канала в конфузорной и наоборот. Будем считать, что поток одномерный, а процесс перехода (течения) потока из одной части трубы в другую адиабатный. Для описания перемещения потока применим уравнения энергии и сплошности потока в следующих соотношениях параметров:

$$\frac{1}{U} \frac{du}{dx} = \alpha \frac{1}{S} \frac{dS}{dx}; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = \beta \frac{1}{S} \frac{dS}{dx}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = \gamma \frac{1}{S} \frac{dS}{dx}; \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  - коэффициенты, зависящие от характера течения;

$U, \rho, p$  - соответственно, скорость, плотность и давление потока в данном сечении;

$x$  - координата по оси потока;

$S$  - площадь поперечного сечения потока.

Анализируя уравнения (1 - 3), приходим к выводу о следующих закономерностях, которые проявляются при течении потока с диффузор-конфузорной конфигурацией канала:

1) в расширяющейся части трубы (канала), т.е. в диффузоре происходит торможение потока, т.к.

$$\frac{dS}{dx} > 0; \quad \frac{dU}{dx} < 0; \quad (4)$$

2) в конфузоре поток ускоряется, что следует из соотношения:

$$\frac{dS}{dx} < 0; \quad \frac{dU}{dx} > 0; \quad (5)$$

3) изменения давления в потоке обратные изменениям скорости, т.е. давление в диффузоре возрастает, а давление в конфузоре убывает, т.к.

$$\frac{dS}{dx} > 0; \quad \frac{dp}{dx} > 0; \quad (6)$$

$$\frac{dS}{dx} < 0; \quad \frac{dp}{dx} < 0. \quad (7)$$

Соотношения (1-7) дают основания сделать вывод, что гидродинамической трубе, состоящей из диффузор-конфузорных участков, при течении потока происходят колебания давления, что порождает продольную импульсную волну.

Компоненты газожидкостного потока - частицы пыли и капли жидкости перемещаются газом при знакопеременном градиенте давления в потоке, что вызывает дополнительные инерционные столкновения капель жидкости и частиц пыли.

Волновой характер движения компонентов создает в диффузоре интенсивные вихри, в зонах которых происходят активные столкновения частиц пыли и капель жидкости, что увеличивает время их взаимодействия и повышает эффективность слияния.

Значительный интерес представляет распределение давления и скорости в потоке для вертикального положения диффузор-конфузорной трубы, когда возвратные течения жидкости (капель) по стенкам конфузора при вертикальном движении потока срываются пульсирующими воздействиями газа, что возвращает капельную жидкость в процесс активного поглощения частиц пыли.

Особенно интенсивно это происходит в сечениях перехода от конфузорной части трубы к диффузорной.

Волновое, пульсирующее перемещение потока снижает эффект «проскальзывания» частиц пыли мимо капель жидкости, что повышает эффективность улавливания пыли.

Анализируя эпюры распределения давления и скорости в трубах разных конфигураций, приходим к выводу, что диффузор-конфузорная труба создает наиболее рациональное соотношение между взаимосвязанными параметрами, при которых скорость потока приближается к постоянной, а не увеличивается, что снижает гидравлические потери на трение при течении потока.

На рис. 1 показана схема разработанной диффузор-конфузорной трубы 1, состоящей из ряда ступеней с увеличивающимся по вертикали средним проходным сечением между ступенями.

Смесительная часть 2 погружена в жидкость и сообщается с трубой 3 для подачи запыленного газа. Каждая ступень трубы выполнена в виде сопряженных конфузора 4 и диффузора 5.

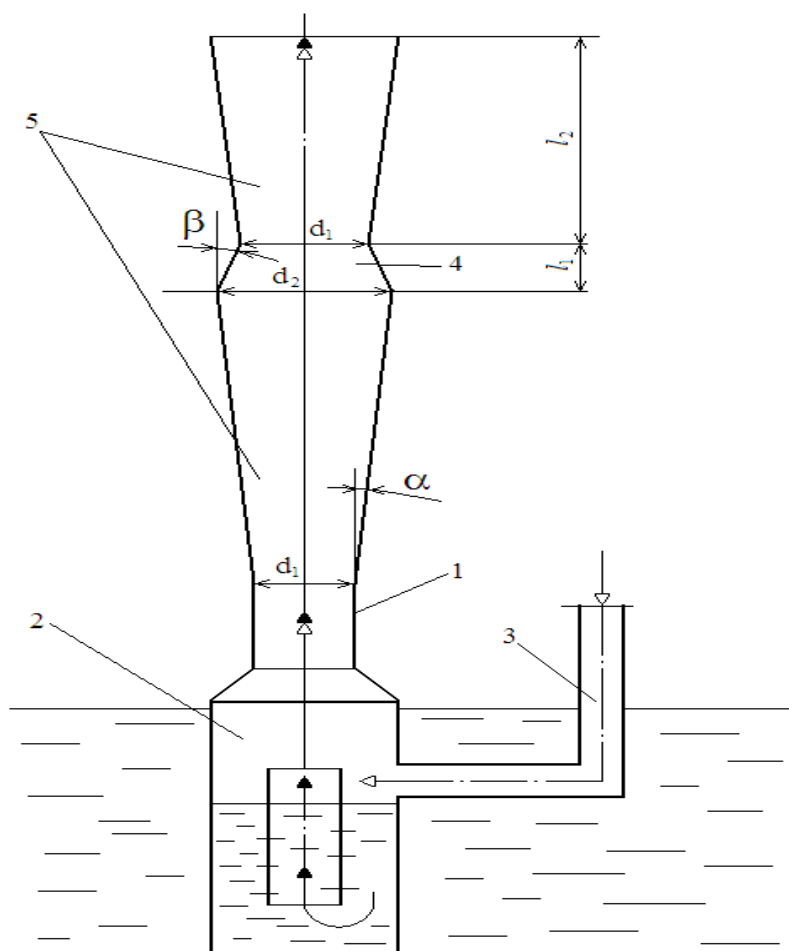


Рис. 1. Схема диффузор-конфузорной трубы

Действие трубы в процессе очистки газа от пыли жидкостью происходит следующим образом.

При подаче газа по трубе 3 (по вакуумной или напорной схемам действия гидродинамической установки по очистке газа) в смесительной части 2 образуется смесь газа и жидкости (или воды и поверхностно активного вещества), которая за счет энергии газа и потенциальной энергии жидкости перемещается в трубу 1 и далее в диффузор-конфузорные части 5 и 4. Возрастающая скорость потока в конфузоре 4 снижается в диффузоре 5, что соответствует преобразованию кинетической энергии газа в потенциальную.

Перемещение потока из диффузора в конфузор следующей ступени повторяет процесс трансформации энергии. Это вызывает про-

дольную пульсацию потока при переходе из одной части трубы в другую, что создает продольный волновой процесс, активизирующий турбулентность и вынужденные столкновения частиц пыли с каплями жидкости. Интенсивные вихреобразования пристеночных областей диффузора, расширяющиеся по оси потока и в поперечном направлении, сменяются обратными процессами сжатия вихревых зон в конфузорной части трубы, что увеличивает частоту столкновений капель жидкости и частиц пыли, а, следовательно, увеличивает вероятность захвата частицы пыли каплей жидкости.

В конфузорной части происходит уплотнение потока и образование пристеночных вихрей, которые сжимаются по течению потока. Сжатие конфузорных вихрей вызывает (в соответствии с законом сохранения момента количества движения) увеличение угловой скорости масс частиц пыли и капель жидкости, что увеличивает кинетическую энергию вращения компонентов потока в вихре и условия их столкновения во время импульсов сжатия. Это повышает общую эффективность процесса очистки газов от пыли в диффузор-конфузорной трубе гидродинамической установки.

Учитывая низконапорный режим течения потока, рациональными с позиций практики являются конфигурации трубы со следующими геометрическими параметрами: для диффузора – диаметр входного сечения  $d_1$ , а угол раскрытия  $\alpha$  равный  $(5...7)^\circ$  при длине  $l_2$  равной

$$l_2 = 0.5(d_2 - d_1)(\operatorname{tg}\alpha)^{-1}; \quad (8)$$

для конфузора - диаметр входного сечения  $d_2$ , а угол сужения  $\beta$  равной  $(12...15)$  при длине  $l_1$ :

$$l_1 = 0.5(d_2 - d_1)(\operatorname{tg}\beta)^{-1}. \quad (9)$$

Принимая, что скорость газа, поступающего на очистку от пыли в гидродинамическую установку, не превышает 20 м/с, принимаем, что диаметр входного сечения диффузора

$$d_1 = \sqrt{0.7Q}, \quad (10)$$

где  $Q$  - объемный расход газа, м<sup>3</sup>/с.

Компоновочную структуру диффузор-конфузорной трубы можно составить в следующей последовательности по направлению потока при вертикальном течении: смесительная часть - конфузор 2, цилиндрический участок 1 выравнивания поля скоростей компонентов

потока, диффузор первой ступени, переходящим в диффузор и участок перехода в каплеотделитель (на рис. 1 не показан).

Определенный интерес для разработки диффузор-конфузорной трубы имеет оценка величины гидравлического сопротивления как падения давления потока «газ - капли жидкости - частицы пыли» по всем ступеням, т.е.

$$\Delta\rho = 0.5\langle V \rangle^2 \langle \rho \rangle (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3), \quad (11)$$

где  $\langle V \rangle$  - средняя скорость потока;  $\langle \rho \rangle$  - средняя плотность потока;

$\xi_1, \xi_2, \xi_3$  - соответственно, коэффициенты гидравлического сопротивления цилиндрических, конфузорных и диффузорных участков.

Для ориентировочного расчета гидравлического сопротивления диффузор-конфузорной трубы по (11) воспользуемся параметрами в средних величинах:  $\xi_1 = 0.18, \xi_2 = 0.34, \xi_3 = 0.11$ . Применяя величину средней скорости потока 20 м/с, получаем ожидаемое гидравлическое сопротивление 165 Па, что составляют не более 10% от давления низконапорных нагнетательных средств в газоотводящих системах.

Таким образом, указанные параметры диффузор-конфузорной трубы гидродинамического устройства очистки воздуха от пыли, являются базой для проработки всей гидродинамической системы защиты от пыли в конкретных условиях действия источника пыли в условиях угольной шахты.

***В дальнейшем, с целью уточнения полученной математической модели и выбранных параметров, планируется учесть упругие резонансные свойства всего газожидкостного потока по диффузорной и конфузорной частям, что для гидродинамической установки позволит обеспечить увеличение амплитуды пульсаций, а, соответственно, и качество диспергирования жидкости, а также частоту воздействий капель на частицы пыли в областях переходов.***

#### Список литературы

1. Ищук И.Г. Прогнозирование запыленности рудничной атмосферы и обоснование комплекса эффективных способов и средств обеспыливания очистных забоев угольных шахт: дис. докт. техн. наук: 05.15.11 и 05.26.01 / И.Г. Ищук. – М., 1989. – 421 с.
2. Журавлев В.П. Методы борьбы с угольной пылью / В.П. Журавлев, Е.Ф. Демичева, Л.А. Спириин. – Ростов: Изд. Ростовского университета, 1988. – 144 с.
3. Поздняков Г.А. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях / Г.А. Поздняков, Г.К. Мартынюк. – М.: Наука, 1983. – 126 с.

4. Гого В.Б. Выбор параметров диффузор-конфузорной подъемной трубы газлифта / В.Б. Гого // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 1999. – №2(61). – С. 177-180.

*Стаття надійшла до редколегії 23.09.2011.*

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Семенченко А.К.*

**В.Б. Гого, Ю.Ф.Булгаков.** Гідродинамічний процес та пристрій імпульсно-хвильового знепилення повітря. В роботі викладено сутність побудови і аналізу математичної моделі процесу імпульсно-хвильової дії крапель на частинки пилу з метою підвищення ефективності знепилювання повітря.

**Ключові слова:** математична модель, імпульсно-хвильове гідрознепилювання, повітря, пил, краплі.

**V. Gogo. U. Bulgacov.** The Hydrodynamic Process and Device of Pulsating-Wave Cleaning of Air. The results of research of the resonance mode of pulsating motion of drops of liquid and particles of dust in the hydrodynamic setting on cleaning of gases with the purpose of rise of efficiency of process of catching of dust are expounded.

**Keywords:** mathematical model, pulsating-wave hydrodynamic cleaning of air, particles of dust, drops of liquid.

© Гого В.Б., Булгаков Ю.Ф., 2012