

УДК 622.8.7:502

Р.А. Тишин (асп.),
Макеевский научно-исследовательский институт,
В.А. Сыроватченко (инж.),
В.Б. Гого (д-р техн. наук, проф.),
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИМПУЛЬСНО-ВОЛНОВОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

В работе изложена сущность гидродинамического импульсно-волнового охлаждения рудничного воздуха в процессе диспергирования воды. Разработана физико-математическая модель для определения конечной температуры воздуха как результата теплообмена между каплями диспергированной воды и воздухом.

Ключевые слова: гидродинамический процесс, импульсно-волновое охлаждение, модель, воздух, капли.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Для обеспечения нормативных условий труда шахтеров по факторам качества рудничного воздуха актуальной проблемой является борьба с высокими температурами (более 30⁰С) в рабочих местах горных выработок, особенно глубоких шахт. Это связано с угрозой для шахтеров заболеваний, вызываемых перегревом и обезвоживанием организма, что негативно влияет на сердечно-сосудистую систему, органы дыхания и т.д.. Как показывает практика местного охлаждения воздуха без применения участковых кондиционеров наибольший эффект достигается в процессах гидродинамического орошения [1]. В комплексах мероприятий, направленных на снижение пылеобразования при ведении горных работ, охлаждение воздуха и горных пород происходит при диспергировании воды (орошении) в забоях или зонах активного образования пыли. Для повышения эффекта охлаждения рудничного воздуха на основе орошения актуальным является решение проблемы физико-математического моделирования процесса гидродинамического воздействия диспергированной воды (капель) на воздух и происходящего теплообмена между каплями и воздухом.

Анализ исследований и публикаций. Анализируя теоретические работы по проблемам орошения, в частности [1- 3], приходим к выводу, что в разработанных физико-математических моделях гидроди-

намического воздействия капель на воздух весьма упрощенно отражена сущность термодинамического процесса, который рассматривался как изотермический. Поэтому в практические решения заложены результаты, которые не позволяют аналитически исследовать пути и направления для повышения эффективности процесса гидравлического охлаждения рудничного воздуха при орошении.

Работа над теоретической частью проблемы приводит к необходимости сформулировать **цель исследования**, излагаемого в статье, как разработка модели гидродинамического процесса импульсно-волнового действия капель воды на воздух для его охлаждения и аналитического определения термодинамических характеристик потока, которые влияют на эффективность теплообмена, а также обоснования способов действий необходимых для этого гидродинамических устройств.

Постановка задачи.

Смоделировать и описать гидродинамический процесс движения и теплообмена между «холодными» каплями воды и «теплым» воздухом с учетом того, что капли находятся в импульсных поступательно-вращательных и колебательных движениях, создаваемых в рабочем пространстве двухфазного потока при изменениях режимов течения в сечениях потока.

Изложение материала и результаты.

Для решения задачи о гидродинамическом воздействии капель диспергированной воды на воздух и теплообмене в потоке при известных физических параметрах компонентов – начальной температуре и давлении, принимаем, что степень подобия в сечениях газожидкостного потока определяется факторами – амплитудой и частотой пульсаций давления смеси при известной конфигурации потока диффузор-конфузорного типа [1, 3].

Исследуем поток, состоящий из смеси воздуха и капель, по физико-математической модели процесса при импульсно-волновом воздействии капель на воздух, Полагаем, что гидродинамические эффекты и теплообмен будут разные при различных соотношениях между собственной частотой пульсаций потока и частотой вынуждающих колебаний капель при пульсациях давлений в сечениях потока. Объектом исследования является динамическое состояние компонентов потока – капель, действующих на воздух, относительно неинерциальной системы координат, образуемой в исследуемом объеме

диффузор-конфузорного пространства потока, в котором происходит теплообмен между «холодными» каплями и «теплым» воздухом.

Прототипом диффузор-конфузорного пространства газожидкостного потока, исследованного в [4], является труба Вентури, которая позволяет в процессах скоростного воздействия капель на воздух интенсифицировать теплообмен между компонентами потока. Однако, увеличение относительной скорости капель более 20 м/с снижает эффективность теплообмена с воздухом, т.к. не обеспечивается достаточное время контакта между каплями и воздухом. Повышение относительной скорости между компонентами потока вызывает «проскальзывание» капель через воздух, без теплообмена, т.е. не происходит образования вокруг капель слоя «обволакивания» воздухом, через который на молекулярном уровне осуществляется теплообмен, ведущий к охлаждению воздуха. Этот недостаток «устраняется» в пульсирующем потоке диффузор-конфузорной трубы, где возникают пульсации компонентов, повышающие теплообмен между холодными каплями и теплым воздухом.

Проведем аналитическое исследование модели процесса изменения параметров потока – температуры и давления двухфазной гидродинамической смеси при переходах из диффузора в конфузор и наоборот. Принимаем, что поток капель в воздухе является одномерным (по потоку), а течение является адиабатным по отношению к окружающей среде. Применим для сечений уравнения энергий и однородности потока в следующих соотношениях параметров:

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

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

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

$$pV = RT, \quad (4)$$

где α, β, γ – коэффициенты, зависящие от характера течения;

U, ρ, p, T – соответственно, скорость, плотность, давление и температура потока в данном сечении;

x – координата по оси потока;

S – площадь поперечного сечения потока.

Анализируя уравнения (1) – (4), приходим к выводу о следующих закономерностях в потоке диффузор-конфузорной формы:

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

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

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

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

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

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

$$\frac{dS}{dx} < 0; \quad \frac{dp}{dx} < 0. \quad (8)$$

Соотношения (1-8) дают основания сделать вывод, что в гидродинамическом потоке воздуха и капель в диффузор-конфузорных участках, происходят колебания давления воздуха, что порождает продольную импульсную волну. Учитывая (4), понимаем, что эти колебания обязательно вызывают колебания температуры потока, что активизирует теплообмен между теплым воздухом и холодными каплями. К тому же компоненты газожидкостного потока перемещаются при знакопеременном градиенте давления, что вызывает дополнительные инерционные колебательные движения капель, увеличивающее время контакта с воздухом.

Волновой характер движения компонентов потока создает в диффузоре интенсивные вихри, которые активизируют теплообменные действия между воздухом и каплями во вращении, что увеличивает время их взаимодействия и повышает эффективность передачи теплоты.

Значительный интерес представляет теплообмен в потоке при вертикальном расположении диффузор-конфузорной трубы, когда возвратные движения капель под действием силы тяжести срываются пульсирующими действиями, что возвращают капли в поток, в процесс активного контакта с воздухом для его охлаждения. Особенно интенсивно это происходит в сечениях перехода от конфузорной час-

ти трубы к диффузорной. Пульсирующее перемещение потока снижает эффект «проскальзывания» капель охлаждающей воды через воздух, что повышает эффективность теплообмена.

На рис. 1 показана схема разработанного элемента установки для гидродинамического охлаждения рудничного воздуха, на основе диффузор-конфузорной трубы 1, состоящей из ряда ступеней с увеличивающимся по вертикали средним проходным сечением между ступенями. Смесительная часть 2 погружена в холодную воду и сообщается с трубой 3 для подачи теплого рудничного воздуха. Каждая ступень трубы выполнена в виде сопряженных элементов конфузора 4 и диффузора 5.

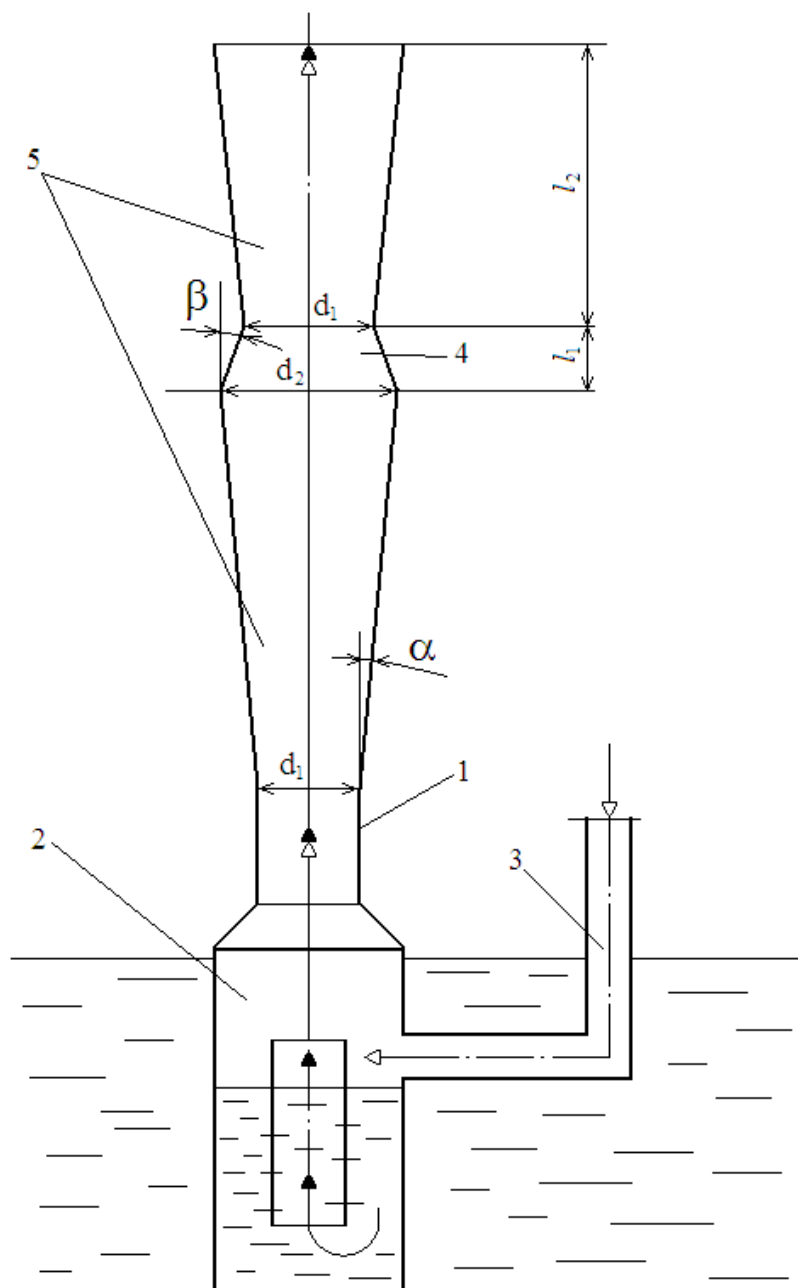


Рис. 1 - Схема элемента гидродинамического охлаждения воздуха на основе диффузор-конфузорной трубы

Действие диффузор-конфузорной трубы в процессе охлаждения воздуха капельной водой происходит следующим образом.

При подаче теплого воздуха по трубе 3 (по вакуумной или напорной схемам действия гидродинамической установки) в смесительной части 2 образуется смесь воздуха и холодной воды. Смесь за счет энергии воздуха и потенциальной энергии воды 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 в потенциальную.

Перемещение гидродинамической смеси воздуха и капель из диффузора в конфузор вызывает пульсацию потока при переходе из одной части в другую, что создает волновой процесс, активизирующий вихреобразование и действие капель на воздух.

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 пульсирующих действий капель воды на воздух, а, следовательно, увеличивает интенсивность теплообмена при охлаждении воздуха.

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 капель, что увеличивает их кинетическую энергию вращения в вихре и время импульсов действия на воздух. Это повышает общую эффективность процесса теплообмена при вихревом потоке в диффузор-конфузорной трубе гидродинамической установки охлаждения воздуха.

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях позволили определить, что рациональными с позиций практики являются такие геометрические соотношения параметров элемента для гидродинамической установки охлаждения рудничного воздуха, которые позволяют снизить его температуру с 35°C до 26°C при температуре воды 20°C . Для диффузора получено соотношение диаметра входного сечения d_1 , угла раскрытия α ($5\dots7$) $^{\circ}$ и длины l_2 :

$$l_2 = 0,5(d_2 - d_1)(\text{tg}\alpha)^{-1}; \quad (9)$$

для конфузора – диаметр входного сечения d_2 , а угол сужения β равный ($12\dots15$) при длине l_1 :

$$l_1 = 0,5(d_2 - d_1)(\operatorname{tg}\beta)^{-1}. \quad (10)$$

Принимая, что скорость воздуха, поступающего на охлаждение в гидродинамическую установку, не превышает 20 м/с, получаем, что диаметр входного сечения диффузора:

$$d_1 = \sqrt{0,7Q}, \quad (11)$$

где Q – объемный расход охлаждаемого воздуха, м³/с.

Компоновочную структуру диффузор-конфузорного элемента для гидродинамического охлаждения рудничного воздуха можно составить в следующей последовательности по направлению потока. При вертикальном течении: смесительная часть, конфузор, цилиндрический участок для выравнивания поля скоростей компонентов потока, диффузор первой ступени, переходящий в конфузор, и т.д. до уловителя капель (на рис. 1 не показан), из которого охлажденный воздух поступает в рудничную атмосферу.

Определенный интерес в данном исследовании диффузор-конфузорной трубы имеет оценка величины ее гидравлического сопротивления, т.е.

$$\Delta p = 0.5\langle V \rangle^2 \langle \rho \rangle (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3), \quad (12)$$

где $\langle V \rangle$ – средняя скорость потока; $\langle \rho \rangle$ – средняя плотность потока; ξ_1, ξ_2, ξ_3 – соответственно, коэффициенты гидравлического сопротивления цилиндрических, конфузорных и диффузорных участков.

Для ориентировочного расчета гидравлического сопротивления диффузор-конфузорной трубы по (12) 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, создаваемого вентиляторами местного проветривания.

Таким образом, указанные параметры диффузор-конфузорной трубы гидродинамического охлаждения рудничного воздуха, являются основой разработки гидродинамической установки для конкретных условий угольной шахты.

Выводы и направления дальнейших исследований.

С целью уточнения полученной физико-математической модели и выбранных параметров, планируется исследовать теплообмен и свойства газожидкостного потока, создаваемого на основе водяного эжектора, диспергирующего холодную воду в поток теплого воздуха

с последующим расположением диффузорной и конфузорной частей. Для гидродинамической установки это позволит обеспечить увеличение амплитуд пульсаций, а, соответственно, и качество диспергирования воды на капли, для более низкого охлаждения воздуха.

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: спец. 05.15.11; 05.26.01 / Ищук Игорь Григорьевич. – М., 1989. – 421 с.
2. Журавлев В.П. Методы борьбы с угольной пылью / В.П. Журавлев, Е.Ф. Демичева, Л.А. Спирин. - 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 // Гірнича електромеханіка та автоматика. – 1999. – №2(61). – С.177-180.

Стаття надійшла до редакції 16.04.2013

Р.А. Тишин, Державний Макіївський науково-дослідний інститут по безпеці робіт в гірничій промисловості, В.А. Сироватченко, В.Б. Гого, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Гідродинамічний процес імпульсно-хвильового охолодження повітря

У роботі викладена сутність гідродинамічного імпульсно-хвильового охолодження рудничного повітря в процесі диспергування води. Розроблена фізико-математична модель для визначення кінцевої температури повітря як результату теплообміну між краплями, води, що диспергує, й повітрям.

Ключові слова: гідродинамічний процес, імпульсно-хвильове охолодження, модель, повітря, краплі.

R.A. Tishin, The State Makeyevka Research Institute, V.A. Sirovatchenko, V.B. Gogo, Donetsk National Technical University

Hydrodynamic Process of the Impulsive-Wave Air Cooling

The essence of the hydrodynamic impulsive-wave cooling of mine air in the process of water dispersing is considered. A physical and mathematical model is developed for defining final temperature of air as a result of heat exchange between drops of dispersed water and air.

Keywords: hydrodynamic process, impulsive-wave cooling, model, air, drops.