

УДК 622.8.7:502

И.А. Толкунов¹, Р.А. Тишин²¹ *Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков*² *Научно-исследовательский институт безопасности работ в горной промышленности, Макеевка*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА И ОБОСНОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА КАПЕЛЬНОЙ ВОДОЙ

В работе изложена сущность процесса охлаждения воздуха капельной водой в специальном устройстве. Разработана физико-математическая модель и обоснованы элементы устройства для гидродинамического охлаждения воздуха капельной водой на основе диффузор-конфузорной трубы как результата эффективного процесса теплообмена между каплями воды и воздухом для реализации требований охраны труда по факторам качества воздуха рабочих зон

Ключевые слова: *процесс охлаждения воздуха, диффузор-конфузорная труба, эжектор, диспергирование воды, капельная вода*

Постановка проблемы

Для обеспечения нормативных условий труда по факторам качества воздуха рабочих зон актуальной проблемой является борьба с высокими температурами (более 30°C) на рабочих местах, например горных выработок глубоких шахт, доменных цехов и т.д. Это связано с угрозой заболеваний рабочих от перегрева органов дыхания и обезвоживанием организма, что негативно влияет на сердечнососудистую систему и др. Как показывает практика, для местного охлаждения воздуха без применения специальных кондиционеров наибольший эффект достигается в процессах гидродинамического орошения теплого воздуха (температурой более 30°C) капельной водой (температурой порядка 20°C) [1, 2]. Например, в комплексах мероприятий, направленных на снижение температуры воздуха рабочих зон в горных выработках, охлаждение воздуха происходит при диспергировании воды (орошении) в забоях. Для повышения эффекта охлаждения рудничного воздуха на основе орошения актуальным является решение проблемы физико-математического моделирования процесса воздействия диспергированной воды (капель) на воздух и происходящего теплообмена между каплями и воздухом.

Формулировка цели статьи

Смоделировать и описать гидродинамический и термодинамический процесс движения и теплообмена между «холодными» каплями воды и «теплым» воздухом с учетом того, что капли

находятся в сложных движениях, создаваемых в рабочем пространстве двухфазного потока при изменениях режимов течения в сечениях потока, разработанных конфигураций.

Статья направлена на теоретическую часть проблемы, для решения которой сформулирована **цель исследования**, которая состоит в разработке модели процесса действия капель воды на воздух для его охлаждения и аналитического определения термодинамических характеристик потока, которые влияют на эффективность теплообмена, а также обосновать средства, необходимые для реализации этого процесса.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализируя теоретические работы по проблемам охлаждения воздуха капельной водой при орошении, в частности [3 – 10], приходим к выводу, что в разработанных моделях воздействие капель на воздух описывается весьма упрощенно, не отражая сущность термодинамического процесса. Поэтому в практических решениях заложены результаты, которые не позволяют аналитически исследовать пути повышения эффективности процесса охлаждения воздуха при его орошении капельной водой в специальных установках.

Изложение основного материала

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 [2, 3, 11].

Исследуем поток, принимая его как модель, состоящую из однородной смеси воздуха и капель воды, при пульсирующем воздействии капель на воздух в заданной области потока. Полагаем, что гидродинамические эффекты и теплообмен будут различны при различных соотношениях между собственной частотой пульсаций потока воздуха и частотой вынуждающих колебаний капель при пульсациях давлений в сечениях потока, задаваемых конфигурацией установки.

Объектом исследования является термодинамическое состояние компонентов потока – капель, действующих на воздух, относительно неинерциальной системы координат, образуемой в исследуемом объеме диффузор-конфузорного пространства потока в установке, в котором происходит теплообмен между «холодными» каплями и «теплым» воздухом.

Прототипом диффузор-конфузорного пространства газожидкостного потока является труба Вентури, исследованная в [12], которая позволяет в процессах 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 потоке диффузор-конфузорной трубы, где возникают пульсации капель в воздухе, повышающие теплообмен между «холодными» каплями воды и «теплым» воздухом [13 – 15].

Проведем аналитическое исследование указанной 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, м/с, кг/м³, Па и °С;

x – координата по оси потока, м;

S – площадь поперечного сечения потока, м²;

V – объем потока, м/с;

R – газовая постоянная.

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

1) в расширяющейся части потока, т.е. в диффузоре происходит торможение 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 скоростей, т.е. давление в диффузоре возрастает, а давление в конфузоре падает, что следует из соотношений:

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

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

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

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

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 теплого 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 и диспергирование воды на капли.

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

Интенсивные вихреобразования у 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 каплями.

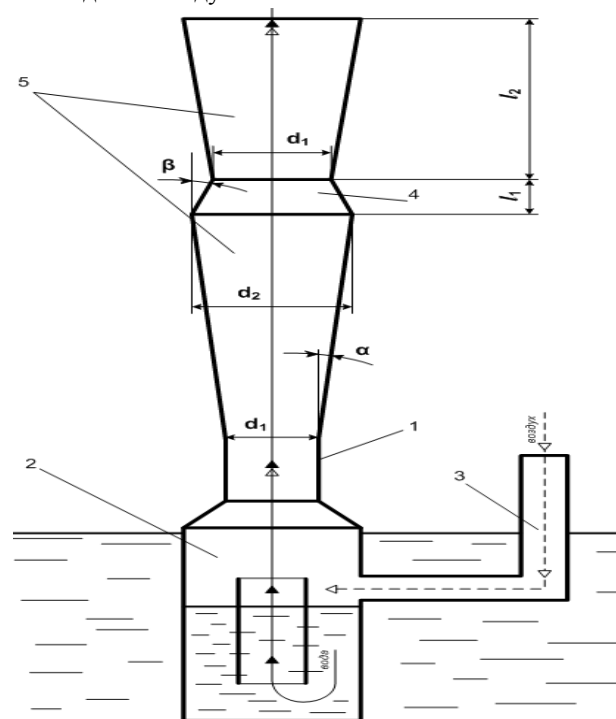


Рис. 1. Схема гидродинамического устройства охлаждения воздуха на основе диффузор-конфузорной трубы: 1 – диффузор-конфузорная труба; 2 – смесительная часть трубы; 3 – труба для подачи «теплого» воздуха; 4 – конфузор; 5 – диффузор

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 являются такие геометрические соотношения параметров элементов для гидродинамической установки охлаждения воздуха, которые позволяют, например, снизить его температуру с 35°C до санитарных норм 26°C при начальной температуре воды 20°C. При этом геометрические параметры устройства имели такие показатели:

- у диффузора соотношение диаметра входного сечения d_1 , угла раскрытия α (5...7)° и длины l_2 имеют такую связь:

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

- для конфузора – диаметр входного сечения d_2 , а угол сужения β равный $(12\dots 15)^\circ$ 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:

$$d_1 = \sqrt{0,7V_{\text{возд}}}, \quad (11)$$

где $V_{\text{возд}}$ – 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 исследовании диффузор-конфузорной трубы представляет оценка величины её гидравлического сопротивления, которая определяется из соотношения:

$$\Delta\rho = 0,5\langle V \rangle^2 \langle \rho \rangle (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3), \quad (12)$$

где $\langle V \rangle$ – средняя скорость потока, м/с;

$\langle \rho \rangle$ – средняя плотность потока, кг/м³;

ξ_1 , ξ_2 и 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: $\xi_1 = 0,18$, $\xi_2 = 0,34$, $\xi_3 = 0,1$. 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 воздуха, являются основой разработки гидродинамической установки для конкретных условий рабочих зон.

Выводы

Как показали исследования, наиболее рациональным вариантом понижения температуры воздуха на рабочих местах в глубоких шахтах или на металлургических предприятиях с целью устранения ее негативных влияний, является процесс гидродинамического охлаждения воздуха капельной водой.

Разработано и экспериментально исследовано устройство для гидродинамического охлаждения воздуха капельной водой на основе диффузор-конфузорной трубы, использование которого на производствах с высокими температурами на рабочих местах обеспечит реализацию требований охраны труда по факторам качества воздуха рабочих зон, а также высокую эффективность мероприятий по охлаждению воздуха, что обусловлено возможностью применения полученных соотношений на этапе разработки и внедрения предложенных устройств для аналитического определения термодинамических характеристик потока, которые влияют на эффективность теплообмена, а также обосновать средства, необходимые для реализации этого процесса.

С целью уточнения полученной 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, т.е. повышения термического коэффициента полезного действия предложенной установки для гидродинамического охлаждения воздуха в глубоких шахтах или на металлургических предприятиях капельной водой.

Литература

1. Лапшин, О.Є. Поліпшення умов праці в глибоких залізорудних шахтах [текст] / О.Є. Лапшин, І.Б. Ошмянський, О.О. Лапшин // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2008. – Вип.17. – С. 144–150.
2. Пивняк, Г.Г. Пути решения проблемы нормализации тепловых условий в горных выработках глубоких шахт Донбасса [текст] / Г.Г. Пивняк, В.А. Бойко // Горный журнал. – 2012. – № 8. – С. 15–18.
3. Лапшин, А.А. Использование шахтных вод для форсуночного охлаждения рудничного воздуха [текст] / А.А. Лапшин. – Кривой Рог: ГВУЗ

- «Криворожский национальный университет», 2013. – С. 32–36.
4. Verma, Y. Control of mine climat [текст] / Y. Verma // Mining Eng. – 1984. – 186 с.
5. Studensky, R. Temperatura powietrza a wypadkowosc [текст] / R. Studensky // Przeglad gornicay. – 1980. – Vol. 12. – P. 606–610.
6. Vocs, J. Neue Forschungsergebnisse aur dem Gebiet «Grabenklima» [текст] / J. Vocs // Glückauf-Forschungshefte. – 1981. – Vol. 6. – P. 241–249.
7. Yshida, M. Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Enoironmental Aspects of Energy System [текст] / M. Yshida // Proc. of Cont. Ekos'99. – Tokyo: Japan, 1999. – P. 145–146.
8. Le Goff, P. Optimizations exergetique, economique on ecologique des thermofrigopompes [текст] / P. Le Goff // Proc. of Seminare «EUROTHERM». – Nancy: France, 1998. – P. 3–10.
9. Shapiro, V.E. Systems near a critical point under multiplicative noise and the concept of effective potential [текст] / V.E. Shapiro // Physical Review E. – 1993. – Vol. 48, Issue 1. – P. 109–120. doi: 10.1103/physreve.48.109.
10. Altena, H. Kritische Fragen der Strebklimatisierung / H. Altena // Glückauf. – 1984. – Vol. 12. – P. 760–763.
11. Когут, В.Е. Проектирование термоконденсатора эжектора [текст] / В.Е. Когут, Е.Д. Бутовский, Н.Г. Носенко. – Одесса: Национальная академия пищевых технологий, 2013. – С. 45–48.
12. Гого, В.Б. Выбор параметров диффузор-конфузорной подъемной трубы газлифта [текст] / В.Б. Гого // Гірничя електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ: 1999. – № 2(61). – С. 177–180.
13. Поздняков, Г.А. Теория и практика борьбы с пылью в механизированных подготовительных забоях [текст] / Г.А. Поздняков, Г.К. Мартынюк. – М.: Наука, 1983. – 126 с.
14. 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 [текст] / И.Г. Ищук. – М.: 1989. – 421 с.
15. Тишин, Р.А. Обоснование параметров гидродинамического охлаждения рудничного воздуха при его орошении / Р.А. Тишин, И.А. Толкунов, В.А. Сыроватченко, В.Б. Гого // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: гірничо-електромеханічна (ISSN 2073-7920). – Донецьк: 2013. – Вип. 2(26). – С.258-265.

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. А.Н. Соболев, Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков.

Автор: ТОЛКУНОВ Игорь Александрович
Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков, кандидат технических наук.
E-mail – tolkunov_ia@mail.ru

Автор: ТИШИН Роман Александрович
Макеевский НИИ безопасности работ в горной промышленности, г. Макеевка Донецкой обл.
E-mail – tishin311210@bigmir.net

SIMULATION OF THE PROCESS AND RATIONALE AIR COOLING DEVICE DRIP WATER

I.A. Tolkunov, R.A. Tishin

The paper deals with solving actual scientific and technical task to ensure safe working conditions for personnel in workplaces of industries with high temperatures (over 30°C), such as deep mine workings, etc., which lies in a local air cooling without using special conditioners, where the greatest effect is achieved in the processes of hydrodynamic irrigation of warm air by dropping water.

It is shown that the measures, aimed at reducing the air temperature of working areas in mine workings involve air cooling by forced ventilation and air conditioning systems, which do not fully meet the required quality parameters. Solving the problem of physico-mathematical modeling of the dispersed water impact on the air and heat exchange occurring between droplets and air is urgent for improving the irrigation-based mine air cooling effect.

The design of the device for the hydrodynamic air cooling by dropping water based on diffuser-confuser pipe was developed, and relations that allow to determine the structural and operational parameters were defined. The analytical relations, the appropriateness of which was experimentally confirmed reveal the mechanism of cooling action of water droplets on the air, enable the analytical determination of the thermodynamic characteristics of the flow, which affect the heat, transfer efficiency, and justification of means, required for this process.

Using the developed device in workplaces of industries with high temperatures will ensure the implementation of labor protection requirements on air quality in working areas, which is caused by the possibility of engineering calculations when designing the proposed devices.

Keywords: process cooling, difuzor-konfuzorna tube, ejector, dispersing water, drip water