

УДК: 622.8.7:502

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА И УСТРОЙСТВО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

доктор технических наук, профессор, Гого В. Б., инженер, Гого Д. В., инженер, Сыроватченко В. А., инженер, Тишин Р. А., кандидат технических наук, доцент, Толкунов И. А.

Донецкий национальный технический университет, Украина, Красноармейск,

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

Обоснована математическая модель процесса гидродинамического охлаждения теплого воздуха (30-40)⁰С до нормальной температуры в процессе диспергирования воды (20⁰С). Модель позволяет определить основные параметры теплообмена между воздухом и каплями воды, а также разработать необходимые для процесса устройства.

Ключевые слова: гидродинамический процесс, модель, охлаждение, воздух, капли.

доктор технічних наук, професор, Гого В. Б., інженер Гого Д. В., інженер Сыроватченко В. А., інженер Тишин Р. А., кандидат технічних наук, доцент, Толкунов І. А. / Донецький національний технічний університет, Україна, Красноармійськ, Національний університет цивільного захисту України, Харків

Обґрунтовано математичну модель процесу гідродинамічного охолодження теплого повітря (30-40)⁰С до нормальної температури в процесі диспергування води (20⁰С). Модель дозволяє визначити основні параметри теплообміну між повітрям і краплями води, а також розробити необхідні для процесу пристрої.

Ключові слова: гідродинамічний процес, модель, охолодження, повітря, краплі.

Doctor of Technical Sciences, Professor V. B. Gogo, engineer Gogo D. V., engineer Syrovatchenko V. A., engineer Tishin R. A. Ph.D of Technical Sciences, docent, Tolkunov I. A. / Donetsk National Technical University, Ukraine, Krasnoarmeisk, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv

Grounded mathematical model of hydrodynamic cooled to a temperature of warm air (30-40)⁰С in the process of dispersing it in water (20⁰С). Model to determine the basic parameters of heat exchange between air and water drops, and develop the necessary process for the device.

Keywords: hydrodynamic process, model, cooling, air, drops.

Введение: общая постановка проблемы и ее связь с научными или практическими задачами. Актуальной проблемой для многих отраслей промышленности в обеспечении нормативных условий труда по факторам качества воздуха является эффективное противодействие

высоким температурам воздуха (более 30°C) на рабочих местах, к примеру, на больших глубинах (более 1000 м) добычи полезных ископаемых в горнорудной отрасли. Высокие температуры воздуха на рабочих местах приводят к перегреву и обезвоживанию организма, что негативно влияет на сердечно-сосудистую систему, органы дыхания и т.д., создавая вредный комплекс профессиональных заболеваний. Как показывает практика охлаждения рудничного воздуха в условиях горных выработок угольных шахт, очень сложно решить эту проблему без применения кондиционеров. Однако, последние исследования показали, что существенный технико-экономический эффект может быть достигнут в комплексных процессах гидродинамического орошения и обеспыливания воздуха капельной водой. Прямой контакт мелкодисперсных капель воды с воздухом вызывает интенсивный массовый и энергетический обмен между компонентами смеси, что ведет к охлаждению и очищению воздуха с минимальными энергетическими и материальными затратами.

Поэтому комплекс мероприятий, направленных на поиск эффективных путей повышения качества воздуха в рабочих пространствах трудовой деятельности человека, является актуальной научно-технической проблемой. Научная сторона этой проблемы состоит в поиске теоретических решений с целью достижения эффективного охлаждения и обеспыливания воздуха (или технологического газов) водой, что приводит к необходимости аналитического описания происходящих явлений. Это требует применения методов физико-математического моделирования комплексного процесса, в частности, для понимания и функционального описания взаимодействия и теплообмена между каплями и воздухом. В техническом плане реализации найденных аналитических решений очень важно инженерными методами обосновать элементы конструкций и параметры исполнительных устройств, что приведено в статье.

Анализ последних исследований и публикаций. Теоретические работы по проблемам охлаждения воздуха капельной водой в различных технологических процессах, в частности [1-3], приводят к выводу, что в предложенных моделях теплообмена между воздухом и каплями недостаточно полно с позиций гидродинамики раскрыт механизм термодинамического воздействия капель на воздух, а полученные зависимости неполно отражают сущность теплообменного процесса. В тоже время, в ряде теоретических и практических решений, например, приведенных в работах [2, 3, 4] по исследованию процессов охлаждения воздуха капельной водой, заложены результаты натурных экспериментов, которые, однако, не позволяют углубить аналитические исследования. Так в работе [2] предложена методика расчета процесса контактного охлаждения воздуха с высокой начальной температурой (более 100°C) путем диспергирования в него воды нормальной температуры. Однако, расчеты касаются только частного случая охлаждения сжатого воздуха при работе турбинных установок. Для охлаждения воздуха при небольших

начальных температурах (до 50°C) эта методика не дает удовлетворительных решений, что требует дополнительных теоретических исследований, особенно в обосновании математической модели процесса.

Таким образом, **актуальность статьи** состоит в теоретическом обосновании модели и эффективных путей, реализующих гидродинамический процесс охлаждения теплого воздуха водой с нормальной температурой, а также в научно мотивированной разработке специальных средств, исходящих с теоретических исследований, что впервые решает важные теоретико-практические части общей проблемы, обозначенной в статье.

Формулировка цели статьи и заданий. Цель статьи состоит в обосновании математической модели процесса гидродинамического охлаждения теплого воздуха ($30\text{-}40^{\circ}\text{C}$) до нормальной температуры в процессе диспергирования воды (20°C), что позволит аналитически определить основные параметры теплообмена между воздухом и каплями воды, а также разработать необходимые для этого процесса устройства.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие научные задания: а) объяснить механизм гидродинамического процесса смесеобразования воздуха и капель, а также термодинамику массообменного охлаждения теплого воздуха более холодными каплями диспергируемой в него воды; б) обосновать сущность физической модели изотропного смесеобразования воздуха и капель воды; в) аналитически описать теплообмен между компонентами смеси; г) определить термодинамические характеристики компонентов, влияющих на эффективность процесса теплообмена; д) инженерными методами обосновать технические средства и устройства, позволяющие реализовать теоретические выводы о повышении эффективности гидродинамического процесса охлаждения воздуха водой.

Особая научная значимость всего материала статьи, на наш взгляд, состоит в том, что впервые аналитически обоснованы функциональные связи и получены зависимости, позволяющие определить конечные температуры воздуха и воды. Также получило дальнейшее развитие теоретическое и экспериментальное обоснование конфигураций элементов и рабочих пространств специальных устройств, в которых должно происходит взаимодействие компонентов воздушно-капельного потока для повышения эффективности гидродинамического процесса охлаждения воздуха водой, диспергированной на капли.

Изложение основного теоретического и экспериментального материала статьи. Сущность научной идеи охлаждения теплого воздуха, имеющего температуру выше санитарных норм (26°C) водой как хладагентом, с температурой ниже 20°C , состоит в том, что в гидродинамическую установку, содержащую водяной эжектор, поступает воздух при эжекции, т.е. происходит подсасывание воздуха струей воды, истекающей из форсунки эжектора, в рабочее пространство установки.

Воздух и капельная вода в этом процессе являются компонентами процесса теплообмена, имеющими разные температуры. При движении и расширении образовавшейся воздушно - капельной смеси (например, в эжекторе) происходит интенсивное дробление воды на капли, которые отбирают тепло у воздуха, т.е. его охлаждают. При этом на каплях происходит конденсация паров воды, содержащихся в охлаждаемом воздухе, из-за снижения его температуры. Охлаждённый в этом процессе воздух выбрасывается из установки, например, в рудничную атмосферу локальной зоны горной выработки, а вода, которая незначительно нагрелась (на 1-2⁰С) поступает для повторного использования в гидродинамическую установку, или в систему трубопроводов шахтного пожаротушения.

Важно подчеркнуть, что в такой гидродинамической установке происходит комплексный процесс охлаждения и досушивания воздуха каплями воды. Это результат интенсивного снижения температуры воздуха (по экспериментам на (4 - 8)⁰С при начальной температуре воды 20⁰С), что вызывает уменьшение его относительной влажности при конденсации водяных паров. На этот процесс мы впервые обратили внимание, так как при капельном охлаждении воздуха превалирует именно это явление потому, что теплоемкость воздуха почти в 800 раз ниже, чем у воды. Это также позитивно влияет на создание необходимого качества рудничного воздуха по нормам охраны труда, т.к. снижается его относительная влажность до уровня нормы при его охлаждении.

Для теоретического подтверждения этой научной идеи проведём обоснование модели процесса теплообмена между компонентами (воздухом и каплями воды) смеси, принимая за базовую опору физико-математическую модель в виде изотропного (равномерного) распределения капель в объеме (потоке) воздуха. Укажем на следующие принятые допущения: 1) поток воздушно-капельной смеси однородный и движется со скоростью, что обеспечивает постоянный расход смеси; 2) смесь является псевдо газообразной («похожей» по свойствам на газ); 3) состояние термодинамического взаимодействия компонентов – двух фаз потока смеси (газовой и жидкостной) описывается как для однородной газовой среды системой уравнений состояния в формах первого закона термодинамики и Менделеева–Клапейрона, в которых значение газовой постоянной принимается приведенной для смеси как бы подобной газу.

Указанные в модели допущения правомерны, так как массовая концентрации жидкости (капель воды) в воздухе (газе) весьма незначительны. Считаем также, что процесс адиабатический, так как он совершается быстро (время пребывания потока в установке не превышает 0,1 с). Это позволяет не принимать во внимание внешний теплообмен между потоком и стенками установки (проточными частями ее конструкции).

Кроме этого, принимаем, что степень подобия газожидкостного потока в сечениях определяется фактором давления в смеси при известной конфигурации потока в форме диффузор-конфузорной трубы [4].

Исследуем поток, при импульсном воздействии водных капель на воздух, что создается эжектором. Полагаем, что гидродинамические эффекты диспергирования (дробления воды на капли) и теплообмен капель с воздухом 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, например, диффузор-конфузорного пространства потока, в котором происходит теплообмен между «холодными» каплями и «теплым» воздухом.

Идея применить диффузор-конфузорное пространство для охлаждения потока воздуха капельной водой обоснована в исследовании [4], которое позволяет в процессах скоростного воздействия капель на воздух интенсифицировать теплообмен между компонентами потока за счет «профилизации» течения смеси. Однако, увеличение скорости потока более 20 м/с снижает эффективность теплообмена между каплями и воздухом, т.к. не обеспечивается достаточное время контакта между компонентами. 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 по оси потоке диффузор-конфузорной трубы, где возникают пульсации давления в потоке, повышающие теплообмен. Проведем аналитическое исследование модели потока в процессе изменения параметров – температуры и давления как двухфазной гидродинамической смеси при переходах из диффузора в конфузор и наоборот в потоке специальной конфигурации. Принимаем, что поток смеси капель и воздуха является одномерным (по оси потока), а течение является адиабатным по отношению к окружающей среде. Применим уравнения энергий и однородности в сечениях потока в следующих с параметрах:

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

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

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

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

где α, β, γ - коэффициенты, зависящие от характера течения потока;

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 гидродинамических и термодинамических закономерностях в потоке смеси:

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

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

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

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

2) 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 потоке смеси 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, т.к. активизируется теплообмен между воздухом и каплями из-за колебаний давления. Пульсирующий режим давления в потоке смеси создает в диффузоре интенсивные вихри смеси воздуха и капель, которые активизируют теплообменные действия между воздухом и каплями во вращении, что значительно увеличивает время их взаимодействия и повышает интенсивность теплообмена.

Важно отметить, что теплообмен в таком потоке при вертикальном расположении диффузор-конфузорной трубы, ведет к тому, что капли под действием силы тяжести срываются со стенок трубы и возвращаются в поток. Особенно интенсивно это происходит в сечениях переходов с конфузорной части трубы в диффузорную, что особо повышает теплообмен.

Важно отметить, что смесь за счет расширения в диффузоре снижает свою скорость, а при перемещении в конфузорную часть труб скорость потока возрастает, что соответствует преобразованию потенциальной энергии потока в кинетическую, ведущему к снижению температуры потока. Перемещение смеси из диффузора в конфузор создает пульсацию давления в потоке, что образует волновой процесс, дополнительно активизирующий массообменное взаимодействие капель и воздуха. Интенсивные вихреобразования в потоке пристеночных областей диффузора, расширяющиеся в поперечных сечениях и по оси потока, сменяются обратными процессами сжатия вихревых зон в конфузорной

части трубы, что увеличивает число пульсирующих действий капель на воздух, а, следовательно, увеличивает интенсивность охлаждения 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 потока и время импульсов воздействий на массу 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 ($5\dots 7$) $^{\circ}$ 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 ($12\dots 15$) при длине l_1 :

$$l_1 = 0.5(d_2 - d_1)(\text{tg } \beta)^{-1}. \quad (10)$$

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.

Для процесса в диффузор-конфузорной трубе оценить величину гидравлического сопротивления, что можно сделать соотношением:

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

где $\langle V \rangle$ – средняя скорость потока, а $\langle \rho \rangle$ – средняя плотность потока;

ξ_1, ξ_2, ξ_3 – соответственно, коэффициенты гидравлического сопротивления цилиндрических, конфузорных и диффузорных участков.

Для 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.

Выводы и перспективы дальнейших исследований по исследуемой проблеме. Обоснованная математическая модель процесса гидродинамического охлаждения теплого воздуха и параметры устройства для реализации предложенного процесса в виде диффузор-конфузорной трубы, позволяют разработать комплексную систему охлаждения воздуха в рабочих зонах многих производств, например, рудничного воздуха для

локальных зон горных выработок угольных шахт, металлургических и прокатных цехов и т.д..

В перспективе исследований для конкретных условий необходимо уточнить физико-математическую модель в допущениях и соответствующих аналитических зависимостях, а также основные параметры предлагаемых функциональных устройств. В дальнейшем планируется исследовать модель процесса охлаждения воздуха капельной водой в новом гидродинамическом устройстве – ротационном эжекторе, создающем циклонный поток, и вихреобразно диспергирующем воду в поток воздуха. При такой конструкции гидродинамической установки охлаждения воздуха предполагается достигнуть более низких температур охлаждения воздуха за счет интенсификации теплообмена с водой.

Литература:

1. Замыцкий О. В. Контактное охлаждение сжатого воздуха в турбокомпрессорах, 2005. - 4с. – Электронный ресурс. – Адрес доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/kontaktное-ohlazhdenie-szhatogo-vozduha-v-turbokompressorah>.
2. Агюл Х., Н. Шахин – Friterm A. S. Системы охлаждения воздуха на входе в газотурбинные установки. - 2011. – Электронный ресурс. – Адрес доступа: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/1570>.
3. Yshida M. Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Enoironmental Aspects of Energy System/ M. Yshida // Proc. of Cont. Ekos'99, Tokyo, Japan, 1999. – P.145-146.
4. Гого В. Б. Выбор параметров диффузор-конфузорной подъемной трубы газлифта / В. Б. Гого // Гірничя електромеханіка та автоматика. – №2(61). – Дніпропетровськ, 1999. – С.177-180.
5. Ван Кампен Н. Г. Стохастические процессы в физике и химии / Ван Кампен Н. Г. // М.: ВШ, 1990. – 231 с.
6. Волькенштейн М. В. Энтропия и информация / Волькенштейн М. В. - М.: Наука, 1986. – 192 с.
7. Altena H. Kritische Fragen der Strebklimatisierung. // Glückauf. – 1984. - №12. – s. 760-763.
8. Verma Y. Control of mine climat. / Y. Verma // Mining Eng. – 1984.
9. Studensky R. Temperatura powietrsa a wypadkowosc / R.Studensky /Prseglad gornicay. – 1980. - №12. – s. 606-610.

References:

1. Zamitskiy O. V. Kontaktное okhlazhdenye szhatoho vozdukha v turbokompressorakh, 2005. - 4s. – Elektronniy resurs. – Adres dostupa: <http://cyberleninka.ru/article/n/kontaktное-ohlazhdenie-szhatogo-vozduha-v-turbokompressorah>.

2. Ahyul Kh., N. Shakhyn – Friterm A. S. *Systemy okhlazhdenyya vozdukha na vkhode v hazoturbynnye ustanovky.* - 2011. – *Elektronniy resurs.* – Adres dostupa: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/1570>
3. Yshida M. *Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Enoironmental Aspects of Energy System/ M. Yshida // Proc. of Cont. Ekos"99, Tokyo, Japan, 1999.* – P.145-146.
4. Gogo V. B. *Vibor parametrov dyffuzor-konfuzornoj podiemnoy trubi hazlyfta / V. B. Gogo // Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka.* – № 2(61). – Dnipropetrovs'k, 1999. – S.177-180.
5. Van Kampen N. H. *Stokhasticheskye protsessy v fyzyke y khymyy / Van Kampen N. H. // M: VSh, 1990.* – 231 s.
6. Vol'kenshteyn M. V. *Entropiya v informatsiya / Vol'kenshteyn M. V. M.: Nauka, 1986.* – 192 s.
7. Altena H. *Kritische Fragen der Strebklimatisierung. // Glückauf.* – 1984. - № 12. – s. 760-763.
8. Verma Y. *Control of mine climat. / Y. Verma // Mining Eng.* – 1984.
- Studensky R. *Temperatura powietrsa a wypadkowosc / R. Studensky /Prseglad gornicay.* – 1980. - № 12. – s. 606-610.