

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ОБЕСПЫЛИВАНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

Р.А. Тишин, Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности, Украина

А.А. Попов, М.А. Никифоров, В.Б. Гого, Государственное ВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Украина

Изложена сущность и обоснована эффективности комплексной технологии гидравлического охлаждения и обеспыливания рудничного воздуха в локальных зонах выработок глубоких шахт.

Актуальность проблемы развития угольной промышленности Украины, как основы для национальной энергетической независимости государства, неотделима от решения жизненно важных задач охраны труда горняков. Тревожной является статистика о профессиональных заболеваниях шахтеров, вызванных высокими температурами в забоях и рудничной пылью, а также последствий от взрывов пылевоздушных смесей. По данным Государственного Макеевского научно-исследовательского института по безопасности работ в горной промышленности страна ежегодно несет человеческие потери и многомиллиардные экономические убытки.

В условиях угольных шахт основными источниками тепла на больших глубинах (более 800м) являются природные эндотермические процессы Земли, вызывающие повышение температуры горных пород с ростом глубины шахт, а так же техногенное тепловыделение мощного горного оборудования. Активными источниками пыли являются технологические процессы очистных и проходческих работ, транспорт горной массы и т.д. Важно подчеркнуть естественную особенность, усугубляющую проблему, что увеличение концентрации пыли в рудничном воздухе увеличивает его теплоемкость, а, следовательно, и теплотенциальность, что усложняет процесс охлаждения воздуха. К тому же все шахтные кондиционеры требуют очистки воздуха от пыли перед его охлаждением в теплообменниках.

Анализ научных исследований и технических решений [1] по указанной проблеме, показал, что основным способом охлаждения воздуха на большинстве действующих шахт является вентиляция, так как применение шахтных кондиционеров еще недоступно для многих шахт из-за их большой стоимости. Борьба с пылью, главным образом, осуществляется форсуночным орошением, т.е. диспергированием воды в зонах образования пыли (гидрообеспыливание).

Наряду с определенными успехами, достигнутыми в реализации этих способов, сохраняется важная научная проблема в раскрытии специфических механизмов теплообмена между воздухом и каплями воды и закономерностей гидрообеспыливания, позволяющих повысить эффективность комплексного процесса, в частности, импульсно-волновым воздействием капель жидкости на высокотемпературный запыленный воздух. При этом не решены важные теоретические задачи о структурности турбулентного дисперсного потока как системы «воздух - капли жидкости». Это сохраняет устаревшие практические подходы к выбору мероприятий по охране труда и препятствует более широкому применению гидравлических систем для создания нормативных условий труда рабочих в глубоких шахтах по факторам температуры воздуха и его запыленности.

Результаты анализа научных работ [1] показывают, что для повышения эффективности гидроохлаждения и обеспыливания рудничного воздуха диспергированной водой следует решать комплексную задачу по теоретическому и экспериментальному исследованию термических и гидродинамических эффектов, возникающих от действия системы капель воды на высокотемпературный запыленный воздух в локальных зонах горных выработок.

Важно отметить, что в комплексном процессе охлаждения и гидрообеспыливания воздуха диспергированная вода создает поток капель, а в воздухе образуется смесь капель и пыли динамической фрактальной пространственной структуры ее компонентов (капель и пылинок, движущихся в воздухе). Временные связи между каплями и пылинками в воздухе проявляются, как столкновения и слияния, которые носят случайный (вероятностный) характер. Поэтому, чтобы увеличить эффективность теплообмена и гидрообеспыливания, т.е. охлаждения воздуха и улавливания частиц пыли, необходимо увеличить число капель (их объемную плотность в воздухе), частоту столкновений капель с пылинками путем создания управляемых гидроаэродинамических структур потока, повышающих динамическую коагуляцию аэрозольных компонентов потока и теплообмен.

В исследованиях Медведева Э.Н., Позднякова Г.А. [1,2] и др. установлено, что эффективность охлаждения рудничного воздуха при орошении и улавливании тонких фракций пыли каплями в основном (до 85%) зависит от степени турбулентности потока воздуха, в котором взаимодействуют частицы пыли и капли жидкости. Весомость составляющей турбулентного фактора до 95% для фракций пыли менее 5 мкм.

Следовательно, гидродинамическое охлаждение рудничного воздуха и подавление пыли диспергированной водой в основном должно происходить за счет турбулентности воздушно-пылевого потока, в котором частицы пыли испытывают воздействия капель при турбулентных пульсациях потока.

По этому, проанализируем уравнение для определения составляющей турбулентного фактора, который влияет на теплообмен и гидравлическое пылеулавливание в потоке:

$$K'_T = 4\pi r_i \left(\frac{\lambda}{l} \right)^4 \frac{D^3}{\nu_b^2},$$

где r_i - размер частицы пыли, м;

λ - расстояние между двумя частицами пыли, м;

l - линейный масштаб турбулентности, м;

D - коэффициент турбулентной диффузии, м²/с;

ν_b - кинематическая вязкость воздуха, в котором перемещаются частицы пыли и капли жидкости, м²/с.

Приведенное уравнение позволяет утверждать, что рост коэффициента турбулентной диффузии ведет к увеличению турбулентного фактора в процессе повышения эффективности коагуляции частиц пыли каплями жидкости, что возможно путем формирования специальной турбулентности потока «газ - частицы пыли - капли жидкости» конфигурацией каналов течения или конструкций оросителей (устройств подачи и диспергирования жидкости) с пульсирующим (турбулизирующим) воздействием на пылегазовый поток.

С увеличением турбулентности в потоке возрастает теплообмен и «захват» частиц пыли каплями жидкости, о чем свидетельствуют данные экспериментальных исследований. Важно также то, что турбулизация активизируется электризацией капель жидкости и частиц пыли, что значительно повышает обменные процессы и захват пылинок каплями потока. Этот естественный процесс происходит в результате того, что отрицательные и положительные заряды (ионы) являются составляющими диспергированной водовоздушной среды. Отрицательные ионы создают отрицательный заряд капель, что повышает эффективность пылеулавливания, т.к. угольная пыль при разрушении и электризации в воздухе приобретает положительный заряд. Этот процесс снижает температуру воздуха, т.к. уменьшается его тепловая емкость.

Для расширения технологии гидравлического охлаждения воздуха значительный интерес представляет применение пены для целей гидрообеспыливания, т.е. уменьшения его тепловой ёмкости. Пена как структурированная дисперсная система имеет значительно больший активный объем пылепоглощения, чем диспергированная вода в таком же количестве. Это

позволяет увеличить поверхность для контактов воздуха и частиц пыли с пеной при значительно меньшем количестве жидкости, что важно для того, чтобы не увеличить влажность угля или горной массы при работе комбайна, ленточного конвейера и т.д.. Кроме того, такой комбинированный способ гидравлического охлаждения и обеспыливания воздуха позволяет изолировать определенные объёмы пространства источника пыли, препятствуя поступлению ее в атмосферу горной выработки. Частицы пыли, соприкасаясь с пеной, теряют возможность взвешенного перемещения в воздухе, что снижает его теплоёмкость.

Теплопоглощение и гидрообеспыливание пеной происходит путем адгезионного захвата частиц пыли поверхностью пены. В зависимости от свойств частиц пыли и жидкости пленки пузырьков пены происходит или внедрение частицы пыли в пленку с полной заменой границы раздела «частица пыли - воздух» на среду «частица пыли - пена», или адгезионное соединение их с частичной заменой границы раздела фаз. Процесс зависит от соотношения энергий частицы пыли и потенциальной энергии пузырька пены, которая зависит от поверхностного натяжения жидкости, краевого угла смачивания, температуры и др. и может привести к разрушению пенного пузырька. Интенсивность разрушения пузырьков пены увеличивается с уменьшением размеров частиц пыли при возрастании их кинетической энергии.

Наиболее существенным для теплообмена и гидрообеспыливания пеной является структурность пенной среды, т.е. её кратность. Системная связь между пузырьками пены создается жидкостью и поверхностно-активным веществом. Устойчивость пены (газовых пузырьков, стенками которых являются жидкость и поверхностно-активное вещество) зависит от адсорбционных свойств пленки (границы раздела фаз) и физико-химических свойств пенообразователя. Для эффективного гидрообеспыливания пеной она должна быть: высокодисперсной (диаметр пузырьков порядка $5 \cdot 10^{-3}$ м), достаточно устойчивой во времени (не менее 60 с), т.е. высокой кратности.

Наиболее эффективно применение гидравлического охлаждения воздуха и гидрообеспыливания в горных выработках, в местах расположения стационарных источников пыли (перегрузки с конвейера на конвейер, бункеры, дробилки, грохота, и др.) при ограниченном по каким-либо причинам расходе воды на орошение при заданных показателях норм охраны труда по температурному и пылевому факторам.

Нами установлено, что целесообразность выбора комплексной технологии гидравлического охлаждения и обеспыливания рудничного воздуха определяется по минимальному значению коэффициента технологичности системы - K_c :

$$K_c = \frac{(C_{ост} - C_{ПДК}) A_n (T + T_b) \rho_n q_n}{C_{нач} A_B T P_B q_B},$$

где $C_{ост}$ - остаточная запыленность воздуха, $м^2/м^3$;

$C_{ПДК}$ - запыленность по ПДК, $м^2/м^3$;

$C_{нач}$ - начальная запыленность воздуха, $м^2/м^3$;

A_n, A_B - затраты, соответственно, на предлагаемую и базовую системы пылеподавления, грн/т;

T - время наработки на отказ системы, ч;

$T_{bн}$ - время восстановления системы, ч;

P_n, P_B - давления воды на оросителях системы, МПа;

q_n, q_B - удельный расход воды предлагаемой и базовой систем пылеподавления, л/т;

ρ_n - средняя плотность смеси.

Комплексная система гидравлического охлаждения и обеспыливания рудничного воздуха с наименьшим значением K_c способна обеспечить выполнение современных требований по охране труда, связанных с температурным и пылевым факторами.

Для повышения эффективности всего комплексного процесса необходимо обеспечить монодисперсную смесь мелких капель воды, диспергированных в рудничном воздухе.

По нашим экспериментальным данным с увеличением размера капли эффективность ее

как охладителя воздуха и уловителя частиц пыли снижается. Существуют рациональные размеры капель и частиц пыли, которые наиболее эффективны для комплексного процесса охлаждения воздуха и улавливания пыли. По нашим исследованиям, например, капли размером 150 мкм при скоростях движения (5 - 20) м/с менее эффективны, чем капли 50 мкм, как для охлаждения воздуха, так и для улавливания пыли. Вместе с тем, уменьшение капель не всегда эффективно, т.к. такие капли «испаряются» без ожидаемых эффектов. Кроме того, очень мелкие капли уносятся воздушным потоком из локальной зоны без термодинамического местного эффекта, испаряясь, увеличивают влажность воздуха.

Нами экспериментально выявлено, что рациональными параметрами капель для комплексного процесса гидравлического охлаждения и обеспыливания воздуха являются капли с диаметрами 50 мкм.

Важной характеристикой комплексного процесса гидравлического охлаждения и обеспыливания воздуха выступает линейная скорость капель, от которой зависит время действия. Время охлаждения воздуха и улавливания пыли каплями зависит от скорости капель. С ее возрастанием уменьшается время, за которое происходит воздействие капель на воздух и витающие пылинки. Для «улавливания» пыли скорость диспергированных капель должна быть не менее 20 м/с. При более низких скоростях снижается эффект охлаждения воздуха с относительно низкой эффективностью улавливания пыли, что обусловлено малой частотой воздействий капель на пылинки. При этом возникает эффект «обтекания», когда у капель недостаточно кинетической энергии для массообмена с пылинками в воздухе, которые «покрыты» оболочкой адсорбированных газов. Поэтому для эффективного охлаждения воздуха и улавливания каплями взвешенной пыли необходимы специальные форсунки, которые бы обеспечивали получение не только высокой плотности диспергирования жидкости, но и необходимой скорости движения капель. Учитывая, что для применяемых на шахтах форсунок в орошении расход воды составляет (3-10) л/мин, а угол раскрытия от 60° до 180° при формах факелов - зонтичной или плоской, можно сделать вывод, что в шахтах еще нет «универсальной форсунки», пригодной для применения в комплексном процессе охлаждения воздуха и пылеподавления.

Эффективным гидродинамическим средством охлаждения рудничного воздуха и борьбы с пылью в угольных шахтах показали себя гидравлические эжекторы, которые позволяют увеличить скорость капель жидкости и плотность факела орошения при необходимом давлении воды. Для повышения теплообмена и коагуляции частиц в процессе орошения можно применять гидроакустический способ воздействия на аэрозоль. Акустические колебания создает струя жидкости до ее распада (диспергирования) на капли. Акустическая мощность воздействия на воздух составляет примерно 25 Вт/м² при частоте (3 - 4) кГц [3].

Основным функциональным элементом комплексной технологии, от которой зависит эффективность охлаждения рудничного воздуха и пылеподавление, является форсунка оросителя или гидродинамическое устройство. Наибольшее применение на шахтах получили унифицированные оросители: зонтичные, конусные, плоскоструйные, тангенциальные, а также системы пневмоорошения, которые, однако, не позволяют реализовать комплексную технологию гидравлического охлаждения и пылеулавливания. Для этой технологии разработана специальная форсунка в виде многокамерного водоежектора по патентам [4,5], испытанная в условиях шахты им. А.Г. Стаханова ГП «Красноармейскуголь».

На рис. 1 показана схема многокамерного эжектора для импульсно-волнового гидравлического охлаждения рудничного воздуха и обеспыливания. Многокамерный эжектор содержит активное сопло 1 для подачи воды в камеру 2, куда поступает высокотемпературный запыленный воздух, и которая соединена с камерой смешивания 3, выполненную в виде концентрично расположенных цилиндров 4 разной длины и диаметров, что создаёт на выходе ступенчатый диффузор 5, а на входе - ступенчатый конфузор 6. Такая конструкция многокамерного эжектора позволяет перемещать водовоздушную смесь путём трансформации кинетической энергии воды в энергию смешивания и образования обратных течений механиче-

ской эмульсии в пространствах (зазорах) между цилиндрами камер смешения, что повышает эффективность теплообмена для охлаждения воздуха и улавливания пыли образованной эмульсионной средой.

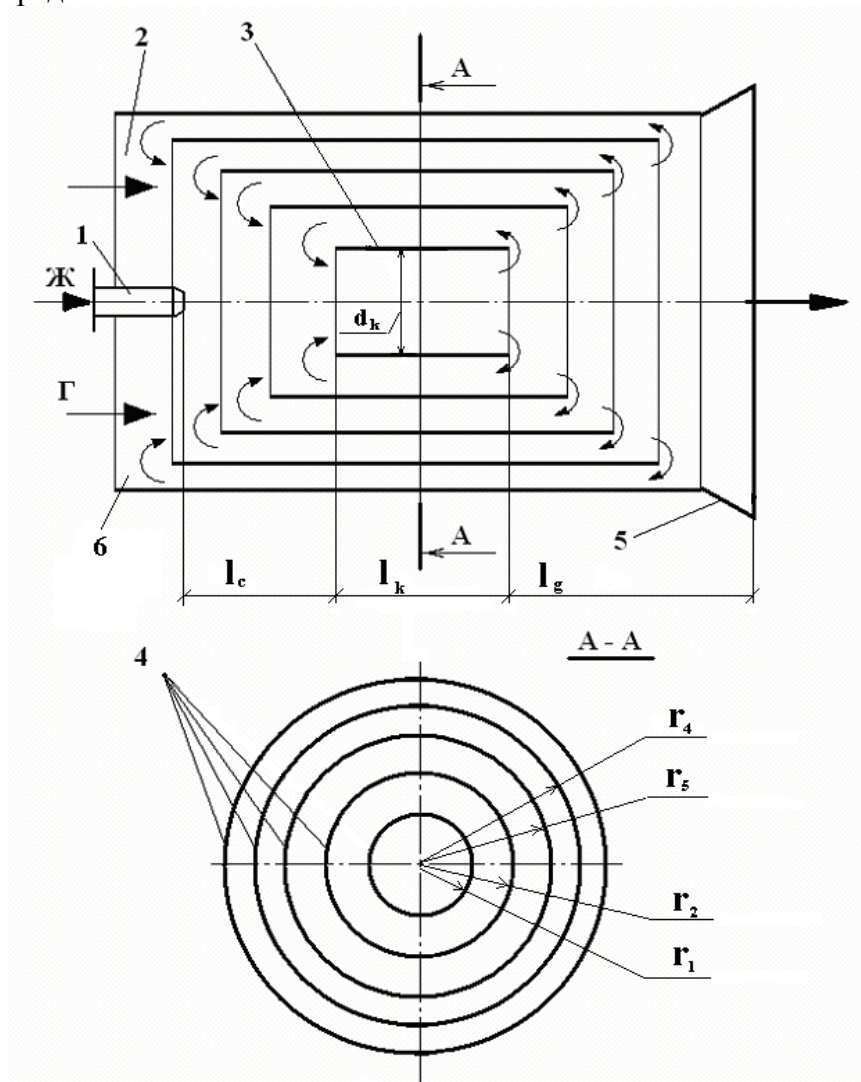


Рис.1. Многокамерный водоэжектор для охлаждения и обеспыливания воздуха

Многокамерный эжектор действует следующим образом. Поток рабочей воды поступает под давлением 6 атм из активного сопла 1 в камеру смешения 3, в которую из камеры 2 захватывается (всасывается, инжектируется) воздух с пылью. При этом образуется 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 запылённого 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 6, захватывается запылённым газом и вместе с ним засасывается в камеру смешения 3 активной струей воды.

Обратное движение эмульсии по каналам между цилиндрами в направлении обратном от движения струи активной жидкости, загрязнённого газа и образовавшейся газожидкостной смеси, т.е. от диффузора к конфузору обусловлено повышенным давлением среды в диффузоре 5 и сниженным давлением в конфузоре 6 и по форме является волновым. Импульсное поступление эмульсии в камеру смешения активизирует теплообмен и адгезионные свойства жидкой среды по охлаждению и улавливаю частиц пыли из воздуха, т.к. истечение эмульсии из кольцеобразных выходных сечений конфузора способствует увеличению площади контакта жидкой среды и воздуха. К тому же, пузырьки механической газожидкостной эмульсии разрушаются (схлопываются), образуя мельчайшие капли, которые повышают концентрацию капель, а, следовательно, усиливают теплообмен и вероятность столкновения с частицами пыли аэрозольных фракций (10^{-4} - 10^{-5}) м.

Шахтные испытания многокамерного водоэжектора для охлаждения и обеспыливания рудничного воздуха в зоне конвейерного пересыпа горной массы позволили установить, что температура воздуха снижается на (5-8) град.С, а эффективность улавливания пыли 98%. Разработка может найти применение в очистных и проходческих забоях при комбайновом разрушении горных пород, на участках вентиляционных штреков, примыкающих к лавам; откаточных выработках и пунктах погрузки горной массы, в зонах действия опрокидывателей и сопряжений с уклонами и бремсбергами; призабойных участках подготовительных выработок, конвейерных выработках, а также в процессах передвижки секций механизированного крепления.

Выводы. Существующие теоретические и практические разработки по гидравлическому охлаждению и обеспыливаю рудничного воздуха с переходом на глубокие горизонты требуют дополнительного решения теоретических и практических задач по совершенствованию гидродинамического охлаждения и пылеподавления в связи с повышением температуры горного массива и возрастающей запыленностью горных выработок. Для этого необходимо решить задачи по математическому моделированию комплексного гидравлического процесса борьбы с теплотой и пылью, и определению характеристик этих процессов, повышающих эффективность теплообменного взаимодействия капель жидкости и частиц пыли; обосновать параметры и конструктивные особенности технических средств охлаждения воздуха и пылеподавления с учетом нормативных требований охраны труда; выполнить синтез элементов и обобщение экспериментально-аналитических зависимостей для расчета гидродинамических средств охлаждения воздуха и защиты от пыли в различных условиях технологических процессов угольной шахты.

Список литературы

1. Теория и практика охраны труда на угольных шахтах / [Медведев Э. Н., Мартовицкий В.Д. и др.]. – Макеевка, МакНИИ : ООО «Промдрук», 2006. – 600 с.
2. Поздняков Г. А. Эффективность очистки рудничного воздуха от витающей пыли диспергированной водой / Г. А. Поздняков // ИГД им. А.А. Скочинского. Науч. сообщ. Вып. 159. – Эффективные способы и средства борьбы с пылью в угольных шахтах. – М. : 1977. – С. 11-17.
3. Ищук И. Г. Прогнозирование запыленности рудничной атмосферы и обоснование комплекса эффективных способов и средств обеспыливания очистных забоев угольных шахт: дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. / И.Г. Ищук. – М., 1989. – 421 с.
4. Патент 16953 Украина, МПК F04F 5/16, Ежектор., ./ Гого В.Б., Малеев В.Б., опубли. Бюл.№ 8. 15.09.06.
5. Патент на винахід № 91913, МПК, E21F5/04(2006.01), 10.09.2010. Ежекторний зрошувач. / Гого В.Б., Булгаков Ю.Ф., Семенченко А.К. . Бюл. № 17, 2010.