

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 628.1+621.359.4

НАПРАВЛЕННЫЕ ИОНИЗИРОВАННЫЕ ПОТОКИ ВОЗДУХА В ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЯХ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

П. Т. Пономарев¹, Н. А. Попов²

¹Сибирский государственный университет путей сообщения,
E-mail: piter-ponomariov@yandex.ru,

ул. Д. Ковальчук, 191, 630049, г. Новосибирск, Россия

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрены вопросы создания и применения направленных ионизированных потоков воздуха для очистки и обогащения его легкими отрицательными ионами в производственных помещениях, что позволяет значительно снизить энергетические затраты на вентиляцию и теплоснабжение в холодные периоды. Приведены результаты использования ионизированных потоков воздуха в энергосберегающих технологиях вентиляции производственных помещений горнорудных и обогащательных предприятий.

Ионизированные потоки воздуха, энергосберегающие технологии, рециркуляционная система вентиляции, отрицательные ионы, фотоионизация, коронирующий электрод, осадительный электрод, частицы аэрозоля, очистка воздуха

При добыче и переработке полезных ископаемых в рабочие пространства выделяется значительное количество пыли, дыма, масляного тумана и других аэрозолей. Выделенные вредности удаляются либо аспирационными системами с помощью местных отсосов от рабочих мест, либо образуют рассредоточенные (неорганизованные) выбросы в атмосферу помещений с последующим удалением общеобменной приточно-вытяжной вентиляцией. Даже при использовании местных отсосов часть выделяемых вредностей распространяется в воздушной среде рабочих пространств, образуя неорганизованные выбросы. Основной способ поддержания нормальных санитарно-гигиенических параметров воздушной среды производственных объектов — приточно-вытяжная вентиляция. Выделяемые в процессе производства вредности разбавляются приточным воздухом до значений предельно допустимых концентраций (ПДК) и удаляются из рабочих пространств, загрязняя окружающую среду.

Одновременно с вредностями из помещений в зимний период удаляется и подогретый системой отопления воздух. По этой причине вентиляция и отопление являются энергоемкими процессами на предприятиях. На цели вентиляции расходуется более 8 % вырабатываемой в стране электроэнергии [1]. Еще более значительный расход энергии приходится на подогрев воздуха, подаваемого на рабочие пространства в зимнее время.

Энергетические затраты на отопление зависят от климатической зоны региона и могут быть определены по выражению

$$W_{от} = C \sum (T_{пр} - T_{ин}) t_{ин} M, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год},$$

где $C = 0.279$ — удельная теплоемкость воздуха, $\text{Вт}\cdot\text{ч}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; $T_{пр}$ — температура приточного (подогретого) воздуха, $^\circ\text{C}$; $T_{ин}$ — температура наружного воздуха в i -й период, $^\circ\text{C}$; $t_{ин}$ — продолжительность i -го периода с температурой наружного воздуха $T_{ин}$, ч; M — масса приточного (подогреваемого) воздуха, кг.

Масса приточного воздуха, подогреваемого в единицу времени, определяется через производительность приточной системы вентиляции Q , $\text{м}^3/\text{ч}$, и плотность воздуха ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$M = Q \cdot \rho, \text{ кг}/\text{ч}.$$

Например, как показали результаты обследования систем вентиляции, для многих промышленных предприятий юга Западной Сибири отопительный сезон начинается при температуре наружного атмосферного воздуха $T_{н} = -6^\circ\text{C}$. Среднегодовое распределение температур наружного атмосферного воздуха за 50-летний период по Новосибирской области приведено ниже:

Температура наружного воздуха $T_{ин}$, $^\circ\text{C}$	-6	-8	-12	-16	-20	-24	-28	-32	-36	-40	-44
Период действия температуры $t_{ин}$, ч	640	580	590	560	460	360	250	150	80	30	10

При минимальной температуре подогретого приточного воздуха $T_{пр} = 12^\circ\text{C}$ энергетические затраты на подогрев воздуха вентиляционной системы производительностью $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ составляют $37\,500 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$. Так, для участка на 10 сварочных постов производительность общеобменной вентиляции по нормам должна быть $50 \text{ тыс. м}^3/\text{ч}$. Для подогрева такого количества воздуха до установленной санитарно-гигиеническими нормами температуры затраты энергии составляют более $1.8 \text{ млн кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$.

Как видно из приведенного примера, затраты энергии на перемещение больших масс воздуха и особенно на его подогрев в зимнее время значительны. Кроме того, пройдя через устройства приточной вентиляции, воздух теряет природные электрические заряды, т. е. деионизируется и оказывается неспособным поддерживать жизненные процессы.

Чистый атмосферный воздух содержит большое количество отрицательных ионов молекулярного кислорода, которые, проходя по каналам приточной системы вентиляции, почти полностью нейтрализуются. Продолжительное пребывание человека в такой среде приводит к энергетическому “голоданию” организма, вызывающему отрицательные последствия как социального характера — снижение сопротивляемости организма и повышение заболеваемости, так и производственного — снижение внимания и способности восприятия, повышение утомляемости и, как следствие, снижение надежности управления производственным процессом и производительности труда, повышение риска производственного травматизма. Секрет животворных свойств полноценного свежего воздуха — наличие отрицательных ионов: чем выше концентрация отрицательных ионов в воздухе, тем он биологически активнее. Фундаментальными трудами А. Л. Чижевского доказано, что под влиянием отрицательно заряженных ионов значительно повышается активность физиологических функций человека, животных, растений и других биологических объектов, возрастает устойчивость организма к неблагоприятным условиям и работоспособность [2].

Исследования, проведенные в ДонНИИ гигиены труда и профзаболеваний, подтвердили, что у горнорабочих, подвергавшихся аэроионизации, повысилась работоспособность и снизилась заболеваемость ангиной на 60 %, катаром верхних дыхательных путей — на 79.5 %, гнойничковыми заболеваниями — на 26.5 % [3].

Ионизация, помимо повышения биологической активности воздуха, снижает отрицательное воздействие на организм вредных примесей, находящихся во вдыхаемом воздухе. При искусственной аэроионизации в помещениях резко снижается запыленность воздуха наиболее опасными для здоровья частицами микронного диапазона, которые, находясь во взвешенном состоянии, практически не удаляются из атмосферы другими способами. Уменьшение концентрации пыли в воздухе помещений на рабочих местах снижает возможность отравления организма химическими вредными веществами, находящимися в воздухе, так как взвешенные частицы адсорбируют на своей поверхности влагу, растворяющую вредные химические вещества, например сернистый газ, который доставляется частицами в глубь легких, достигает альвеол, где и поглощается легочной тканью, отравляя организм. Ионизированная остающаяся в воздухе заряженная пыль оказывает меньшее отрицательное воздействие на организм человека, так как заряженные частицы, в отличие от нейтральных, не проникают глубоко в легкие, а интенсивно осаждаются на слизистой поверхности верхних дыхательных путей и легко удаляются с мокротами. Гигиенические исследования показали, что искусственная ионизация воздуха значительно уменьшает степень задержки пыли в органах дыхания и глубину ее проникновения [4].

Снижение энергетических затрат и других отрицательных последствий, присущих существующим системам вентиляции, можно обеспечить энергосберегающими технологиями улучшения воздушной среды с использованием направленных ионизированных потоков воздуха.

Особенность технологии заключается в том, что воздух в рабочих пространствах очищается от вредностей (например, от пыли и частиц других аэрозолей) и возвращается в рабочие пространства предварительно обогащенным электрическими зарядами — легкими отрицательными ионами.

Техническая реализация энергосберегающих технологий осуществляется путем создания рециркуляционных локальных замкнутых систем улучшения воздуха непосредственно на рабочих местах на основе использования многофункциональных устройств ионизации, направляющих ионизированные потоки воздуха. Эти устройства решают комплекс задач: очистка воздуха от частиц аэрозолей (пыли, дыма и др.) — функция очистителя; насыщение легкими отрицательными ионами — функция ионизатора; перемещение воздуха — функция вентилятора.

Многофункциональное устройство ионизации воздуха (далее ионизатор-очиститель) содержит в своем составе блок очистки и ионизации воздуха, состоящий из коронирующих электродов с фиксированными точками разряда в виде игл, осадительных пластин и некоронирующего электрода-решетки. На электроды от источника питания подается напряжение различной полярности.

Структура процессов в локальной рециркуляционной системе с применением направленных ионизированных потоков воздуха приведена на рис. 1.

При работе устройства между коронирующими иглами и некоронирующей решеткой возникает коронный разряд и образуется “электрический ветер”. Коронный разряд возникает в системе электродов с резко неоднородным электрическим полем, с целью создания которого коронирующий электрод выполняется с малым радиусом кривизны (например, в виде иглы). При подаче между электродами, расположенными друг от друга на расстоянии h , напряжения U ,

значение которого выше начального напряжения коронного разряда, у коронирующего электрода (с отрицательным потенциалом) образуется зона интенсивной ионизации воздуха. Поток отрицательных ионов под действием электрического поля перемещается к противоположному (положительному) электроду, сообщая ускорение нейтральным молекулам воздуха — создается поток электрического ветра. Под действием электрического ветра через блок очистки проходит поток I загрязненного вредными примесями воздуха (функция a). В межэлектродном пространстве частицы аэрозоля (пыли, дыма и пр.) заряжаются и в результате действия сил электрического поля перемещаются и осаждаются на осадительных электродах (функция b).

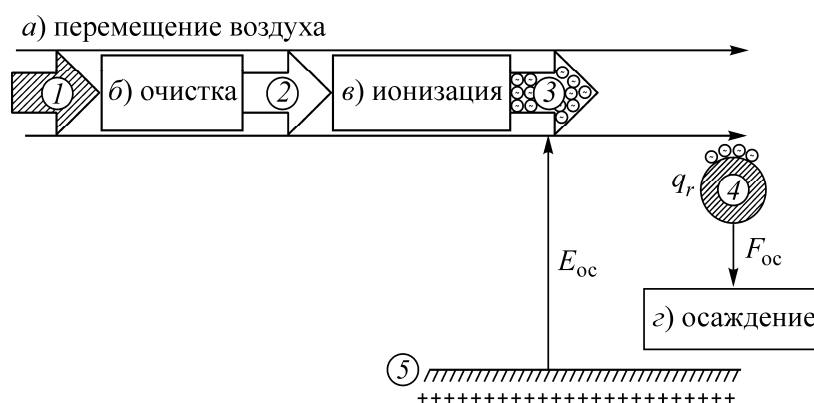


Рис. 1. Структура процессов в рециркуляционной системе вентиляции

Очищенный от частиц аэрозоля и некоторых химических загрязнителей воздух (поток 2) насыщается легкими отрицательными ионами (функция b). Очищенный ионизированный воздух (поток 3) возвращается в рабочее пространство, насыщая воздушную среду рабочего пространства отрицательными ионами кислорода и способствуя подавлению оставшихся в воздухе взвешенных мелкодисперсных частиц аэрозоля.

Между облаком отрицательно ионизированного воздуха 3 и положительно заряженной (относительно ионизированного облака) поверхностью 5 возникает электрическое поле напряженностью E_{oc} . Взвешенные в воздухе частицы 4 мелкодисперсной пыли или дыма захватывают отрицательные ионы и приобретают отрицательный заряд q_r . На заряженные частицы аэрозоля действует возникшее электрическое поле с силой $F_{oc} = E_{oc} q_r$, под действием которой частицы интенсивно осаждаются (функция g).

Рассмотрим подробнее физические процессы в приведенной рециркуляционной системе вентиляции. Поскольку функции перемещения воздуха (a), очистки воздуха от частиц аэрозоля (b) в блоке очистки и ионизации воздуха ($в$) в блоке ионизации осуществляются при посредстве коронного разряда, оценим процессы при коронном разряде в газах.

В межэлектродном пространстве в поле коронного разряда фиксируются три механизма образования ионов, зависящие от напряженности созданного электрического поля.

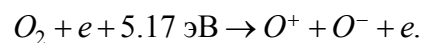
Вблизи коронирующего электрода с малым радиусом кривизны в области высоконапряженного поля основным механизмом образования ионов является ударная ионизация. Свободные электроны в электрическом поле с напряженностью $E > 19 \cdot 10^5$ В/м приобретают энергию, достаточную для отрыва электрона с внешней орбиты молекулы газа при их столкновении. При этом образуется положительный ион и второй свободный электрон с высокой энергией. Например, для ударной ионизации молекулы кислорода необходима энергия $W_i(O_2) = 12.5$ эВ:



Происходит лавинообразный процесс образования свободных электронов и положительных ионов. При отрицательном коронном разряде положительные ионы нейтрализуются на вблизи расположенном отрицательном коронирующем электроде, а лавина свободных электронов перемещается во внешнюю область коронного разряда с меньшей напряженностью, создавая на своем пути облако ионов.

Помимо непосредственной ударной ионизации, в области сильного электрического поля электрон на своем пути производит большое количество возбужденных молекул. Переход возбужденных молекул в нормальное состояние сопровождается излучением энергии W' . Энергия излучения молекул некоторых газов воздуха (например, у азота энергия возбуждения $W' = 13.0$ и 14.8 эВ) превосходит энергию ионизации молекул других газов (энергия ионизации молекул кислорода $W_i = 12.5$ эВ). В этом случае отмечается ионизация воздуха собственным излучением — фотоионизация. Однако часть молекул имеет энергию возбуждения меньшую, чем энергия ионизации молекул других газов воздуха, и при переходе их в нормальное состояние фотоионизации не происходит, т. е. эта часть энергии теряется для процесса создания электрического ветра.

В области коронного разряда с напряженностью электрического поля $15 \cdot 10^5 < E < 19 \cdot 10^5$ В/м электрон обладает энергией, недостаточной для ударной ионизации, но большей, чем энергия диссоциации молекул газа. В этой области имеет место эффективный механизм ионизации путем распада молекул на атомы:



Данный механизм является более эффективным, так как энергия связи атомов в молекуле (энергия диссоциации) меньше, чем энергия связи электрона с молекулой (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Значения энергии связи атомов в молекуле и электрона с молекулой, эВ

Молекула газа	Энергия диссоциации	Энергия ионизации
O ₂	5.17	125
N ₂	9.77	15.8

В результате распада молекулы кислорода на атомы получается атомарный кислород — неустойчивое образование, период существования которого составляет несколько миллисекунд. За этот период атомарный кислород объединяется с возбужденными молекулами кислорода, что приводит к образованию озона:



Озон является сильным антисептиком и в малых концентрациях оказывает благотворное влияние на организм человека, дезинфицируя окружающую среду и придавая воздуху свежесть и легкость.

В области электрического поля с напряженностью $0 < E < 12 \cdot 10^5$ В/м имеет место малоэффективный механизм неупругих столкновений электронов, обладающих малой энергией, с молекулой газа, в результате чего многоатомная молекула захватывает электрон без излучения. При этом энергия электрона ($\approx 0.2 - 2.0$ эВ), освобождающаяся при образовании иона, поглощается колебательной системой молекулы.

В разрядном промежутке создается неоднородное электрическое поле со средней напряженностью

$$E_{\text{cp}} = \frac{U}{h}.$$

Это поле действует на ион с силой

$$F_i = E \cdot e,$$

где $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл — значение заряда однозарядного иона.

Действующая на ион сила F_i вынуждает его перемещаться к электроду с противоположным знаком потенциала со скоростью

$$V_{\text{и}} = k \cdot E,$$

где k — подвижность ионов в воздухе, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Подвижность ионов в электрическом поле — одна из важнейших физических величин, от которой зависят характеристики коронного разряда и процессы при возникновении электрического ветра. Она численно характеризует среднюю скорость движения ионов $V_{\text{и}}$, м/с, при напряженности электрического поля $E = 1$ В/м и прямо пропорциональна заряду электрона $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл, длине свободного пробега иона λ и обратно пропорциональна его массе $m_{\text{и}}$ и тепловой среднеквадратичной скорости $V_{\text{кв}}$.

При расчетах подвижность отрицательных ионов в сухом воздухе может быть принята $k^- \approx 2.2 \cdot 10^{-4}$ $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а положительных $k^+ \approx 1.6 \cdot 10^{-4}$ $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Во влажном воздухе подвижность положительных и отрицательных ионов принимается равной [5]

$$k^- = k^+ \approx 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}.$$

Перемещаясь в электрическом поле, ион сталкивается с нейтральными молекулами воздуха и при соударениях передает им значительную часть энергии, приобретенной им на длине свободного пробега. За время прохождения межэлектродного расстояния h ион совершает работу, равную энергии взаимодействия заряда иона e с электрическим полем напряженностью E :

$$W_{\text{и}} = \int_0^h E \cdot e dl,$$

где l — расстояние, пройденное ионом от места образования до некоронирующего электрода.

При средней напряженности электрического поля $E_{\text{cp}} = U/h$ и значении объемного заряда $q = n \cdot e$, где n — количество ионов в межэлектродном промежутке, энергия потока ионов определится так:

$$W_{\text{и}} = E_{\text{cp}} q h = U I t. \quad (1)$$

Энергия $W_{\text{и}}$, приобретенная ионами в электрическом поле, передается при их перемещении нейтральным молекулам воздуха (с некоторым коэффициентом полезного действия η) в виде кинетической энергии и энергии на преодоление сопротивления перемещению воздуха, т. е. в виде механической энергии потока воздуха (электрического ветра).

Механическая энергия воздушного потока характеризуется давлением (напором) потока воздуха H и расходом $Q = V_{\text{в}} \cdot S$ и может быть выражена

$$W_{\text{в}} = H \cdot V_{\text{в}} \cdot S \cdot t. \quad (2)$$

Полный напор H представляет собой энергию потока, отнесенную к 1 м^3 перемещаемого объема воздуха. Следовательно, энергия воздушного потока может быть выражена через напор H и объем воздуха $Q = V_{\text{в}} \cdot S$, перемещаемого ионным потоком за время t .

Параметры электрического ветра (воздушного потока), образовавшегося при коронном разряде, можно определить при совместном решении уравнений (1) и (2). Энергия ионного потока $W_{\text{и}}$ передается нейтральным молекулам воздуха с некоторым коэффициентом полезного действия η , учитывающим затраты энергии на возбуждение молекул воздуха с последующей фотоионизацией. Тогда предельное значение скорости электрического ветра $V_{\text{впр}}$ (при условии, что статическое сопротивление перемещению воздуха отсутствует, т. е. $\alpha = 0$) можно определить из условия преобразования энергии ионного потока $W_{\text{и}}$ в кинетическую энергию движения воздуха $\rho_{\text{в}} V_{\text{в}}^3 \cdot S/2 = UI\mu$ [6]:

$$V_{\text{впр}} = \sqrt[3]{\frac{2UI\eta}{\rho_{\text{в}}S}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг/м^3 ; S — площадь поперечного сечения воздуховода, м^2 .

Следует отметить, что выражение (3) получено для частного случая отсутствия аэродинамического сопротивления в воздушной сети, когда $H_{\text{ст}} = 0$, что справедливо для условий работы устройств направленных ионизированных потоков воздуха, создающих свободную струю.

Зависимости параметров электрического ветра от характеристики коронного разряда позволяют определить структуру и параметры коронно-разрядного узла устройства ионизации, обеспечивающие необходимые аэродинамические свойства устройств.

В блоке очистки воздуха (функция б) происходят следующие физические процессы (рис. 2). Вблизи поверхности коронирующего электрода 1 с малым радиусом кривизны при подаче от источника питания отрицательного потенциала возникает электрическое поле высокой напряженности с зоной ударной ионизации. Свободные электроны 2, находящиеся в этой области, приобретают кинетическую энергию, превышающую энергию ионизации молекул газов воздуха. Образуется лавина электронов и положительных ионов. Положительные ионы нейтрализуются на поверхности коронирующего электрода с отрицательным потенциалом, а лавина электронов под действием сил электрического поля перемещается в направлении осадительного электрода 5 с положительным потенциалом. Во внешней зоне коронного разряда при снижении напряженности электрического поля энергия электронов недостаточна для совершения актов ударной ионизации и в результате неупругих столкновений с нейтральными молекулами воздуха б образуются отрицательные ионы 3. При перемещении в электрическом поле в направлении осадительного электрода 5 отрицательные ионы 3 встречаются с частицами аэрозоля 4, которые приобретают отрицательный заряд и под действием сил электрического поля перемещаются к осадительному электроду.

Уравнение движения частицы к осадительному электроду можно записать в виде

$$F - F_{\text{с}} = \frac{mdv_r}{dt}, \quad (4)$$

где F — силы, действующие на частицу (силы электрического поля и электрического ветра), Н; $F_{\text{с}}$ — силы сопротивления среды движению частицы, Н; m — масса частицы, кг; v_r — скорость движения частицы, м/с.

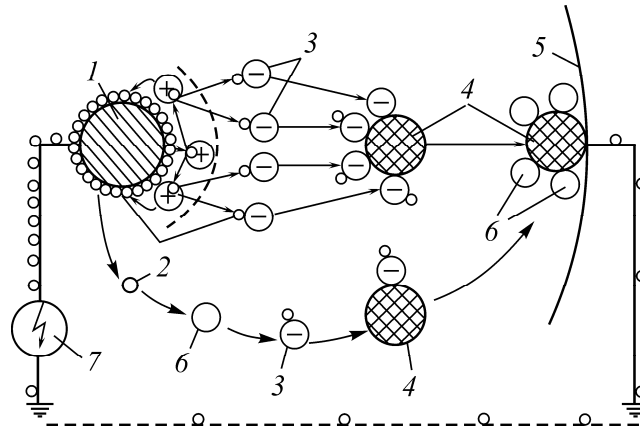


Рис. 2. Схема ионизации и зарядки частиц аэрозоля в поле коронного разряда: 1 — коронирующий электрод; 2 — свободный электрон; 3 — отрицательный ион; 4 — частицы аэрозоля; 5 — осадительный электрод; 6 — нейтральные молекулы газов воздуха; 7 — источник питания коронно-разрядного узла

В блоке очистки при воздухонепроницаемых осадительных электродах электрический ветер имеет циркулирующий характер и на перенос частиц не оказывает положительного влияния [7]. В этом случае будем учитывать только силы электрического поля, действующие на заряженную частицу:

$$F_s = E \cdot q,$$

где E — напряженность электрического поля, В/м; q — заряд, приобретенный частицей, Кл.

Значение заряда, приобретенного частицей, зависит от материала, формы и размера частицы, напряженности электрического поля, концентрации и подвижности ионов в зоне зарядки.

Для частиц размером $r > 1 \cdot 10^{-6}$ м при напряженности электрического поля $E \geq 3 \cdot 10^5$ В/м преобладающим является механизм ударной зарядки частиц, при котором заряд, приобретенный частицей, можно определить по формуле Потенье [8]:

$$q = \frac{4\pi\epsilon_0 \left(1 + 2 \left(\frac{\epsilon - 1}{\epsilon - 2} \right) \right) r^2 E k e n_0 t}{k e n_0 t + 4\epsilon_0}, \tag{5}$$

где $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ — диэлектрическая постоянная, Ф/м; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость материала частицы; r — радиус частицы, м; k — коэффициент подвижности ионов, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ — значение единичного заряда иона, Кл; n_0 — концентрация ионов в зоне зарядки частиц, $1/\text{м}^3$; t — время нахождения частицы в зоне зарядки, с.

Для частиц размером $r < 0.1 \cdot 10^{-6}$ м преобладает механизм диффузионной зарядки, при котором заряд частицы определяется [8] по формуле

$$q = 4\pi\epsilon_0 k_B T \cdot A r / e, \tag{6}$$

где $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ — постоянная Больцмана, Дж/град; T — абсолютная температура, К; A — параметр воздействия ионов на частицу (при $n_0 t = 5 \cdot 10^{13}$ $\text{с}/\text{м}^3$, $A = 8$).

Для частиц промежуточных размеров $1 \cdot 10^{-6} > r > 0.1 \cdot 10^{-6}$ м необходимо учитывать оба механизма зарядки.

Предельное число зарядов $n = q/e$, которое приобретает частица в электрическом поле за время t при различных механизмах зарядки, приведено в табл. 2 (при $T = 300$ К; $n_0 = 5 \cdot 10^{13}$ 1/м³; $E = 2 \cdot 10^5$ В/м; $\varepsilon = 3$) [8].

ТАБЛИЦА 2. Предельное число зарядов $n = q/e$

$r, 10^{-6}$ м	Время воздействия t, c							
	0.01	0.1	1.0	10.0	0.01	0.1	1.0	10.0
0.1	0.7	2	2.4	2.5	3	7	11	15
1.0	72	200	244	250	70	110	150	190
10.0	7200	20000	24000	25000	1100	1500	1900	2300
Механизм зарядки	Ударный				Диффузионный			

Сила сопротивления среды движению частицы

$$F_c = \frac{C_x v_r^2 \rho_c S_r}{2},$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления частицы; v_r — скорость движения частицы, м/с; ρ_c — плотность газовой среды, кг/м³; S_r — площадь миделевого сечения частицы, м².

Коэффициент лобового сопротивления частицы C_x зависит от режима обтекания, характеризующегося критерием Рейнольдса

$$Re = \frac{2r \rho_c v_r}{\mu},$$

где μ — динамическая вязкость среды, Па·с (для воздуха при нормальных условиях $\mu_B = 18 \cdot 10^{-6}$ Па·с).

При ламинарном обтекании частицы ($Re < 1.0$) с достаточной точностью можно считать $C_x = 24/Re$ и силу сопротивления среды определять по закону Стокса [8]:

$$F_c = 6\pi\mu r v_r.$$

Закон Стокса применим при размерах частиц $2r > 1 \cdot 10^{-6}$ м. При обтекании частиц с размерами $1 \cdot 10^{-6} > r > 0.1 \cdot 10^{-6}$ м в формулу Стокса вводится поправка Каннингема $c_k = 1 + 5 \cdot 10^{-8} / r$ [8]:

$$F_c = \frac{6\pi\mu r v_r}{c_k}.$$

Для частиц несферической формы при определении силы сопротивления среды учитывается динамический коэффициент формы $\chi = r_3^2 / r^2$, где r_3 — эквивалентный радиус частицы (определяется из условия равенства объемов эквивалентной сферы и реальной частицы).

С достаточной для инженерных расчетов точностью можно считать обтекание частиц размером до $r_3 = 1 \cdot 10^{-4}$ м ламинарным и силу сопротивления среды движению частиц определять по уточненному поправкой Каннингема закону Стокса:

$$F_c = \frac{6\pi\mu r^2 v_r \chi^{3/2}}{r + 5 \cdot 10^{-8}}.$$

Тогда уравнение движения частицы (4) можно записать как

$$F_3 = \frac{6\pi\mu r^2 v_r \chi^{3/2}}{r + 5 \cdot 10^{-8}} = \frac{m dv_r}{dt}$$

или при массе частицы $m = 4\pi r^3 \gamma_r / 3$ и $F_3 = Eq = Uq / h$ как

$$\frac{2\gamma_r r(r + 5 \cdot 10^{-8})}{9\mu\chi^{3/2}} \cdot \frac{dv_r}{dt} + v_r = \frac{Uq(r + 5 \cdot 10^{-8})}{6\pi\mu\chi^{3/2}r^2h},$$

где h — расстояние между коронирующим и осадительным электродами, м.

Обозначив $2\gamma_r r(r + 5 \cdot 10^{-8}) / (9\mu\chi^{3/2}) = \tau$ и $(r + 5 \cdot 10^{-8}) / (6\pi\mu\chi^{3/2}r^2) = K$, получим

$$\frac{\tau dv_r}{dt} + v_r = \frac{KUq}{h}, \tag{7}$$

где τ — постоянная времени процесса установления постоянной скорости движения частицы (характеризует скорость установившегося движения); K — коэффициент передачи процесса, характеризует зависимость $v_r(E_3)$ в режиме установившегося движения частицы.

Решение уравнения движения частицы (7) имеет вид

$$v_r = \frac{KUq(1 - e^{-t/\tau})}{h}. \tag{8}$$

Установившаяся скорость движения частицы к осадительному электроду составит

$$v_{\text{уст}} = \frac{Uq}{h} \cdot \frac{r + 5 \cdot 10^{-8}}{6\pi\mu\chi^{3.2}r^2}.$$

С осадительного электрода частицы удаляются в бункер.

Таким образом, воздушный поток, проходя через блок очистки (см. рис. 1), очищается от частиц аэрозоля. Очищенный от частиц аэрозоля и некоторых химических загрязнителей воздух (поток 2) насыщается легкими отрицательными ионами (функция ϵ), и чистый ионизированный воздух (поток 3) возвращается в рабочее пространство. Между облаком отрицательно ионизированного воздуха 3 и положительно заряженной (относительно потенциала облака ионов) поверхностью 5 возникает электрическое поле напряженностью $E_{\text{ос}}$. Взвешенные в воздухе частицы 4 мелкодисперсной пыли или дыма захватывают отрицательные ионы и приобретают отрицательный заряд q_r . На заряженные частицы аэрозоля действует возникшее электрическое поле с силой $F_{\text{ос}} = E_{\text{ос}} q_r$, под действием которой частицы интенсивно осаждаются (функция ζ).

Одновременно на взвешенные в воздухе частицы действует сила тяжести $F_{\text{гр}} = mg$. При массе частицы $m = 4\pi r^3 \gamma_r / 3$ скорость осаждения частицы под действием сил гравитации можно определить из уравнения (8), заменив силу действия электрического поля $F_3 = Eq = Uq / h$ на силу гравитации $F_{\text{гр}} = mg$:

$$v_{\text{гр}} = K \cdot mg(1 - e^{-t/\tau}) = \frac{2\gamma_r r(r + 5 \cdot 10^{-8})g}{9\mu\chi^{3/2}}(1 - e^{-t/\tau}).$$

Установившаяся скорость осаждения частиц под действием сил гравитации

$$v_{\text{груст}} = \frac{2\gamma_r r(r + 5 \cdot 10^{-8})g}{9\mu\chi^{3/2}}.$$

С учетом кинетики ударной (5) и диффузионной (6) зарядки частиц установившееся значение скорости перемещения частиц разного размера и материала в электрическом поле можно найти по выражениям, приведенным в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Уравнения установившейся скорости $v_{эуст}$

Материал частицы	Размер частицы r , 10^{-6} м	Установившаяся скорость $v_{эуст}$
Диэлектрик	$r < 1.0$	$v_{эуст} = \frac{2\varepsilon_0(r + 5 \cdot 10^{-8})}{3\mu\chi^{3/2}r} E \left(\frac{rE \cdot ken_0t}{ken_0t + 4\varepsilon_0} + \frac{k_bTA}{e} \right)$
	$r > 1.0$	$v_{эуст} = \frac{2\varepsilon_0}{3\mu\chi^{3/2}} E^2 r \frac{ken_0t}{ken_0t + 4\varepsilon_0}$
Проводник	$r < 1.0$	$v_{эуст} = \frac{2\varepsilon_0(r + 5 \cdot 10^{-8})}{3\mu\chi^{3/2}r} E \left(3rE \frac{ken_0t}{ken_0t + 4\varepsilon_0} + \frac{k_bTA}{e} \right)$
	$r > 1.0$	$v_{эуст} = \frac{2\varepsilon_0}{\mu\chi^{3/2}} E^2 r \frac{ken_0t}{ken_0t + 4\varepsilon_0}$

Рассчитанные для частиц различного размера из диэлектрического материала с плотностью $\gamma_r = 10^3$ кг/м³ и динамическим коэффициентом формы $\gamma = 3$ (смешанные тела) значения установившейся скорости осаждения частиц под действием сил тяжести $v_{груст}$ и сил электрического поля $v_{эуст}$ приведены в табл. 4. Расчеты выполнены при условии: концентрация ионов в зоне зарядки $n_0 = 10^{14}$ 1/м³, коэффициент подвижности ионов $k = 1.5 \cdot 10^{-4}$ м³/В·с.

Из приведенных в табл. 4 результатов расчета видно, что скорость осаждения частиц аэрозоля микронного диапазона (радиусом до 10 мкм) под действием сил электрического поля $v_{э1}$ при условии осаждения $E = 3 \cdot 10^5$ В/м, $t = 0.4$ с и $v_{э2}$ — $E = 5 \cdot 10^5$ В/м, $t = 0.1$ с на несколько порядков выше скорости осаждения частиц под действием гравитационных сил $v_{гр}$.

ТАБЛИЦА 4. Значения установившейся скорости осаждения частиц $v_{уст}$

$r, 10^{-6}$ м	0.1	0.5	1.0	5.0	10	20	50	100
$\tau, с$	$3.6 \cdot 10^{-8}$	$6.6 \cdot 10^{-7}$	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$9.6 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$
$v_{гр}, м/с$	$3.6 \cdot 10^{-7}$	$6.6 \cdot 10^{-6}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$	0.24
$v_{э1}, м/с$	$7 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$5.5 \cdot 10^{-2}$	0.11	0.27	0.55
$v_{э2}, м/с$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$1.6 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-2}$	0.14	0.29	0.71	1.42

Приведенное описание физических процессов зарядки и осаждения частиц аэрозоля в электрических полях позволяет определить количественные значения эффективности процессов в энергосберегающих технологиях вентиляции и оздоровления воздуха как в производственных помещениях, так и в открытых пространствах.

Особенность ионизатора-очистителя воздуха и технологии на основе его применения:

— отсутствие механических побудителей тяги (вентиляторов) и, следовательно, вращающихся частей, так как перемещение воздуха осуществляется под воздействием “электрического ветра”;

— очистка воздуха от наиболее вредных для здоровья частиц аэрозоля микронного диапазона, которые не улавливаются другими видами очистителей (за исключением дорогостоящих и создающих большое аэродинамическое сопротивление рукавных фильтров);

— возвращение воздушной среде в производственных помещениях биологически активных свойств свежего воздуха;

— возможность возвращения в производство уловленных частиц ценных материалов;

— значительное снижение загрязнения окружающей среды вредными выделениями производства.

Опытно-промышленные испытания энергосберегающих технологий вентиляции и улучшения воздуха в рабочих пространствах с использованием направленных ионизированных потоков воздуха показали высокую эффективность применения многофункциональных аппаратов очистки и ионизации воздуха. Установленные в бурозаправочном цехе на руднике Шерегеш производственного объединения “Сибруда” (при отсутствии в помещении приточно-вытяжной вентиляции) ионизаторы-очистители воздуха позволили снизить содержание пыли в воздухе помещения в 4 раза и концентрацию средних и тяжелых ионов, характеризующих содержание мелкодисперсной пыли, в 10 раз.

В корпусе спекания Мундыбашской обогатительно-агломерационной фабрики установленные в приточной системе производительностью 50 тыс. м³/ч при скорости очищаемого воздуха 3.5 м/с ионизаторы-очистители воздуха снизили концентрацию пыли в помещении с 6 до 1 мг/м³.

Очистка воздуха от вредных примесей, запахов и микробных загрязнений непосредственно на рабочих местах с возвратом очищенного и уже нагретого воздуха в производство позволяет значительно снизить энергетические затраты на вентиляцию и теплоснабжение. Применение локальных рециркуляционных систем вентиляции при необходимом подсыщении воздуха до 15 % приведет к снижению затрат энергии только на подогрев 1000 м³/ч воздуха для условий юга Западной Сибири около 32 000 кВт·ч/год. При этом мощность вентиляторов общеобменной вентиляции может быть снижена в десятки раз. Например, для участка на 10 сварочных мест в мастерских горных предприятий энергетические затраты на теплоснабжение могут быть снижены более чем на 1500 тыс. кВт·ч/год. Одновременно с энергосбережением, очистка воздуха от вредных примесей и компенсация аэроионной недостаточности в воздушной среде помещений и рабочих пространств способствует улучшению воздуха и восстановлению его природных биологических свойств. При выделении в атмосферу частиц ценных веществ последние могут быть возвращены в производство, а не загрязнять окружающую среду.

Аналогичные устройства и технологии могут оказаться востребованными при вентиляции карьеров при разработке полезных ископаемых открытым способом [9].

ВЫВОДЫ

Установлена область коронного разряда с напряженностью $15 \cdot 10^5 < E < 19 \cdot 10^5$ В/м, в которой имеет место эффективный механизм ионизации путем распада молекул кислорода на атомы, что способствует образованию озона, благотворно влияющего при малой концентрации на организм человека.

Полученные зависимости параметров электрического ветра от характеристики коронного разряда позволяют определить структуру и параметры коронно-разрядного узла устройства ионизации, обеспечивающие его необходимые аэродинамические свойства.

Показано, что скорость осаждения частиц аэрозоля микронного диапазона радиусом до 10 мкм под действием сил электрического поля на несколько порядков выше скорости осаждения частиц под действием гравитационных сил.

Энергосберегающие технологии вентиляции на основе использования многофункциональных устройств, создающих направленные ионизированные потоки воздуха, позволяют создать благоприятную атмосферу в рабочих пространствах и улучшить экологическую обстановку при значительном снижении энергетических затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пономарев П. Т.** Энергосберегающие технологии вентиляции и оздоровления воздуха в производственных помещениях: материалы междунар. науч.-практ. конф. “Безопасность и проектирование конструкций в машиностроении и строительстве”. — Курск, 2013.
2. **Чижевский А. Л.** Аэроионификация в народном хозяйстве. — М.: Стройиздат, 1989.
3. **Бондаренко В. В.** Повышение устойчивости организма шахтеров под влиянием аэроионизации // Научно-технический прогресс и оздоровление в угольной промышленности. — Донецк, 1975.
4. **Погожаев С. В.** Особенности задержки органами дыхания электроаэрозоля // Гигиена труда и проф. заболевания. — 1981. — № 4.
5. **Пономарев П. Т., Слайковская В. А.** Физические процессы образования электрического ветра при коронном разряде в газах // Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. “Перспективное развитие науки, техники и технологий”. — Курск, 2013.
6. **Александров Г. Н.** Техника высоких напряжений. — М.: Высш. шк., 1973.
7. **Пономарев П. Т.** Использование электрического ветра для повышения эффективности работы аппаратов электрогазоочистки // Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. “Современные материалы, техника и технология”. Т. 3. — Курск, 2013.
8. **Фукс Н. А.** Механика аэрозолей. — М.: Изд-во АН СССР, 1955.
9. **Петров Н. Н., Пономарев П. Т.** Подавление вредных примесей направленными ионизированными потоками воздуха // Теоретические и прикладные вопросы воздухообмена в глубоких карьерах. — Апатиты: КФ АН СССР, 1985.

Поступила в редакцию 21/V 2014