ISSN 0135-3500. Записки Санкт-Петербургского государственного горного института. 1994. Том 139

УДК 622.457.2

Ю.В.АДАМЕНКО, А.Г.ДЕЙНИС,
И.П.ОЗЕРНОЙ, М.М.СМЕТАНИН

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ОСАЖДЕНИЯ ГИГРОСКОПИЧЕСКИХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В УВЛАЖНЕННОМ ПОТОКЕ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА

Предложена методика расчета времени осаждения гигроскопичных частиц аэрозоля в воздушном потоке с относительной влажностью, превышающей точку гигроскопичности пылевых частиц. Представлены расчетные формулы, позволяющие оценить время выпадения частиц на различных стадиях их роста за счет конденсации и гравитационной коагуляции.

Эффективность пылеподавления с помощью увеличения относительной влажности рудничного воздуха зависит от умения обеспечить и поддержать конденсационный и коагуляционный рост гигроскопичных частиц в воздушном потоке горной выработки. Конденсационный рост гигроскопичной частицы можно условно разбить на две стадии: полное растворение твердой части частицы и образование капли насыщенного раствора; дальнейший рост капли, сдерживаемый разбавлением раствора соли и падением влажности среды. Можно рассчитать время осаждения гигроскопичных частиц аэрозоля в воздушном потоке с относительной влажностью, превышающей точку гигроскопичности пылевых частиц, на различных стадиях их роста за счет конденсации и гравитационной коагуляции.

Основные обозначения

D – коэффициент диффузии пара, $см^2 \cdot с^{-1}$; E – упругость пара, мм рт.ст.; $E_н$ – упругость насыщенного пара над плоской поверхностью дистиллированной воды, мм рт.ст.; H – относительная влажность воздуха в среде, выраженная в долях единицы; M – молекулярная масса, $г \cdot моль^{-1}$; r – радиус сферы, см; $R = 62363$ – универсальная газовая постоянная, $см^3$ $(мм\ рт.ст.) \cdot К^{-1} \cdot моль^{-1}$; T_0 – температура среды, К; ρ – плотность, $г \cdot см^{-3}$; τ – время, с; индексы: в – вода; к – капля, конечный; н – насыщенный, начальный; о – среда; р – раствор; с – соль; величины, не вошедшие в список обозначений, определены в месте их первого появления в тексте.

Радиус капли насыщенного раствора $r_н$ в момент полного растворения солевой частицы радиуса $r_с$ можно определить по формуле

$$r_н/r_с = \sqrt[3]{(1+100/s)\rho_с/\rho_{н.р}}\ , \qquad (I)$$

в которой s – концентрация насыщенного раствора в граммах соли на I00 г воды. С учетом справочных данных значения $r_н/r_с$ для солей NaCl, KCl, $MgSO_4$ и $CaCl_2$, вычисленные по (I), равны соответственно I,9; I,9; 2,0 и I,6.

Чтобы оценить время, за которое происходит увеличение радиуса капли от $r_с$ до $r_н$, следует обратиться к уравнению Максвелла [2]

$$r\frac{dr}{d\tau} = \frac{DM}{\rho_в RT_0}(E_0 - E_к)\ . \qquad (2)$$

Согласно [3] величина $E_к$ при $r_с < r \le r_н$ постоянна, причем

$$E_к = E_н(1 - c_р)\ . \qquad (3)$$

Если же $r > r_н$, то

$$E_к = E_н(1 - c_р r_н^3/r^3)\ . \qquad (4)$$

По справочным данным для перечисленных выше солей значения постоянной $c_р$ соответственно равны 0,22; 0,I8; 0,I5 и 0,65.

Для определения характера изменения радиуса частицы от времени по (2) надо выяснить характер величины E_0. Одним из возможных является предположение о постоянстве E_0, если пылевая нагрузка на парогенератор не слишком велика. Причем

$$E_0 = E_н H > E_н(1 - c_р).$$

Тогда уравнение (2) для двух упомянутых ранее стадий конденсационного роста преобразуется с учетом (3) и (4) в уравнения соответственно

$$r\frac{dr}{d\tau} = \frac{DME_н}{\rho_в RT_0}(H + c_р - 1) \quad \text{при} \quad r_с < r \le r_н \qquad (5)$$

и

$$r\frac{dr}{d\tau} = \frac{DME_н}{\rho_в RT_0}(H - 1 + c_р r_н^3/r^3) \quad \text{при} \quad r > r_н\ . \qquad (6)$$

Результат интегрирования (5) устанавливает связь между временем $\tau_н$, за которое завершается растворение ядра и образуется капля насыщенного раствора, и радиусом $r_н$:

$$r_н^2 - r_с^2 = 2\frac{DME_н}{\rho_в R T_0}(H + c_р - 1)\tau_н . \qquad (7)$$

Например, пылевая частица NaCl радиусом $r_с = 5$ мкм за $\tau_н = 3{,}9$ с "вырастает" до $r_н = 9{,}5$ мкм при относительной влажности $H = 0{,}8$, лишь немного превосходящей критическое значение I – $c_р = 0{,}78$. Дальнейшее изменение радиуса капли от времени находим, интегрируя (6):

$$\int_1^{r/r_н} \frac{x\,dx}{H - 1 + c_р/x^3} = \frac{1 - r_с^2/r_н^2}{2(H - 1 + c_р)}(\tau/\tau_н - 1). \qquad (8)$$

При $H = 1$ из (8) следует

$$r^5/r_н^5 = 1 + 2{,}5(1 - r_с^2/r_н^2)(\tau/\tau_н - 1). \qquad (9)$$

В выработке, где падение капли ограничено, более удобна пространственная координата z – расстояние от капли до кровли. В этом случае соотношение, аналогичное (9), имеет вид

$$r^7/r_н^7 = 1 + 7Az/h, \qquad (10)$$

где h – высота выработки, см; A – безразмерная величина, $A = hDMc_р E_н/(a r_н^4 \rho_в R T_0)$; a – постоянная Стокса, $a = 2g\rho_к/(9\rho_0\nu)$.

Интегрируя аналог (8) для переменной z при $H < 1$ и полагая $z = h$, получаем уравнение

$$0{,}25(x^4 - 1) + u^3(x - 1) + \frac{u^4}{3}\left(\ln\frac{x-u}{1-u}\sqrt{\frac{1+u+u^2}{x^2+xu+u^2}} - \right.$$
$$\left. - \sqrt{3}\,\mathrm{arctg}\frac{(x-1)u\sqrt{3}}{2u^2+u+ux+2x}\right) = (H-1)A/(H-1+c_р), \qquad (11)$$

где $x = r_к/r_н$; $u = \sqrt[3]{c_р/(1-H)}$.

Из уравнения (II) можно найти конечное (максимальное) значение $r_к$ при движении частицы от кровли до почвы выработки и, следовательно, потребное количество воды для осаждения пыли с известными характеристиками. Затем по (8) определяется время осаждения пылевых частиц.

После того, как за счет конденсационного роста размеры более крупных капель превзойдут величину

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{1{,}214}{g}\left(\frac{9\eta}{\rho_к}\right)^2},$$

начинается [I] гравитационная коагуляция этих капель с основной массой аэрозоля радиуса $r_с$.

Уравнение, связывающее r с z, имеет вид

$$\frac{dr}{dz}=\frac{1}{4}\,\frac{\Delta\omega}{\rho_к}\left[1-\frac{1}{3}\left(\frac{r_c}{r}\right)^3\right]\left[1-\left(\frac{r_c}{r}\right)^2\right]\left[1+\frac{r_c}{r}\right]\left[1-\frac{r r_0^3}{4r_c^2(r^2-r_c^2)}\right]^2, \qquad (12)$$

где $\Delta\omega$ – водность аэрозоля, $г\cdot см^{-3}$.

Для оценки решения последний множитель в правой части уравнения (12) – коэффициент захвата – заменим его наибольшим значением, которое достигается, если $r_c = r/\sqrt{2}$. В этом случае интеграл (12) имеет вид

$$F(r_к/r_0)-F(r_н/r_0)=0{,}32\,\frac{\Delta\omega}{\rho_к}\,\frac{h}{r_0}, \qquad (13)$$

где $$F(x)=x-\frac{1}{3}\,\frac{x}{x^3-1}+\frac{4}{9}\ln\frac{x-1}{\sqrt{x^2+x+1}}-\frac{4\sqrt{3}}{9}\operatorname{arctg}\frac{2x+1}{\sqrt{3}}.$$

Соотношение (13) позволяет оценить эффект "прочесывания" крупными каплями основной массы аэрозоля – вынос влаги и падение запыленности.

По предлагаемой методике установлено, что для пылевых частиц каменной соли размерами от 1 до 10 мкм время осаждения капель в 5–15 раз меньше, чем для сухих частиц, что подтверждается экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Борьба с пылью на калийных рудниках. М.: Недра, 1977.

2. Райст П. Аэрозоли. М.: Недра, 1987.

3. Тверской П.Н. Курс метеорологии. М.: Наука, 1962.