

$$a^3 = \frac{HBL}{N_{01}}, \quad (1)$$

где H, B, L – размеры камеры с ершами.

Средняя плотность волос в камере очистки

$$K_1 = \frac{N_{01}}{HBL}. \quad (2)$$

Траектория движения воздушного кубика определяется размерами камеры очистки и поперечной V_{\perp} и продольной V_{\parallel} составляющими скорости движения воздушного потока. Среднее значение длины l траектории воздушного кубика в очистной камере определяется формулой

$$l = L \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \right). \quad (3)$$

Из описания устройства ершей следует, что диаметр волоса много меньше его длины и поэтому не учитывается влияние торцов на эффект очистки. Т.к. волосы в ерше располагаются веерообразно по окружности, то введём среднюю эффективную площадь, прочерченную волосом в единичном воздушном кубике при однократном его проходе через волос:

$$S_{cp} = 2ab \overline{\sin \alpha}, \quad (4)$$

где b – длина волоса ерша; α – угол между волосом и ребром кубика, изменяющийся от 0 до $\pi/2$.

Среднее значение синуса будет равно

$$\overline{\sin \alpha} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi}. \quad (5)$$

Учитывая (5) в (4), получим

$$S_{cp} = 4ab/\pi. \quad (6)$$

Объём воздуха, прореагировавшего с волосом при однократном проходе воздушного кубика

$$V_{cp} = S_{cp} \delta_x = \frac{4ab}{\pi} \delta_x, \quad (7)$$

где δ_x – толщина эффективного слоя воздуха, успевшего прореагировать с волосом ерша.

При этом происходит выделение примеси, содержащейся в воздухе. Масса выделившейся примеси при одном пересечении воздушным кубиком первого волоса равна

$$\Delta m_0 = \rho_0 V_{cp} = \rho_0 \frac{4ab}{\pi} \delta_x, \quad (8)$$

где ρ_0 – первоначальная плотность примесей в воздухе.

Абсолютное изменение плотности примеси в воздушном кубике при этом составит:

$$\Delta \rho_0 = \frac{\Delta m_0}{a^3} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{b \delta_x}{a^2} \rho_0. \quad (9)$$

Относительное изменение плотности примеси при одном пересечении волоса

$$E_0 = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{b \delta_x}{a^2}. \quad (10)$$

Предполагая, что толщина δ_x эффективного слоя воздуха, реагирующего с волосом, не зависит от номера пересечения воздушного кубика волосом, можем записать, что

$$\frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} = \dots = \frac{\Delta \rho_n}{\rho_n}$$

или

$$E_0 = E_1 = \dots = E_n. \quad (11)$$

Выражая относительные изменения плотности примеси в каждом пересечении через относительные изменения плотности к первоначальной, найдём, что

$$\rho_n / \rho_0 = (1 - E_0)^n, \quad (12)$$

где n – число пересечений воздушного кубика волосами ерша.

Чтобы вычислить показатель степени n подсчитаем число волос, которые попадают внутрь объёма воздушной трубки, длина траектории которой равна l , определяемой по формуле (3). Умножив (3) на площадь поперечного сечения воздушного кубика a^2 , найденной из формул (1) и (2), получим

$$n = L K_1^{1/3} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \right). \quad (13)$$

Учитывая (13) в (12), найдём

$$\frac{\rho_n}{\rho_0} = (1 - E_0) \left[L K_1^{1/3} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \right) \right]. \quad (14)$$

Преобразуем выражение (14), выразив в явном виде длину слоя с ершами, получим

$$L = \frac{\lg(\rho_1 / \rho_0)}{(1 + V_{\perp} / V_{\parallel}) \cdot K_1^{1/3} \lg(1 - E_0)}. \quad (15)$$

Результаты исследования. По формуле (15) были проведены численные расчеты необходимых размеров камеры очистки при различных значениях параметров газового потока. Результаты расчетов представлены на графиках. На рис. 2, а представлена зависимость длины L очищающего слоя в зависимости от числа волос в единице объёма.

Кривые 1 и 2 для параметров $V_{\perp} / V_{\parallel} = 1$, $E_0 = 0,01$, но кривая 1 для $\rho_1 / \rho_0 = 0,01$, что соответствует задерживанию примесей на 99%, а кривая 2 для $\rho_1 / \rho_0 = 0,1$, что соответствует задерживанию примесей на 90%. Видно, что для задержания 99% примесей при плотности волос $K_1 = 2 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$ длина камеры должна быть 3 м, а для задержания 90% примесей при тех же параметрах длина камеры может быть 1,5 м. При плотности волос $K_1 = 2 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$ для задержания 99% примесей длина камеры составит 0,5 м, а для задержания 90% примесей 0,25 м.

На рис. 2, б представлены длины слоя ершей в зависимости от эффективной толщины погранслоя, образующегося вокруг волоса, геометрических размеров волоса и воздушного кубика. Кривая 1 для $\rho_1 / \rho_0 = 0,01$; 2 для $\rho_1 / \rho_0 = 0,1$ при постоянных значениях $V_{\perp} / V_{\parallel} = 1$ и $K_1 = 5 \cdot 10^5$. На рис. 2, в длина слоя L выражена через отношение скоростей $V_{\perp} / V_{\parallel}$ при постоянных значениях $E_0 = 0,01$, $K_1 = 5 \cdot 10^5$; кривая 1 для $\rho_1 / \rho_0 = 0,01$; 2 для $\rho_1 / \rho_0 = 0,1$. Характер всех кривых примерно одинаков – это гиперболы. На все рисунки вынесены графики кривых длины очищающего слоя, которые пропускают от 1% до 10% вредных примесей в атмосферу. Из рисунков видно, что эффективные рабочие участки лежат вблизи вершин гипербол. Это значит, что, создавая очистное устройство с соответствующими зна-

чениями параметров, будет достигаться необходимая степень очистки при минимальных затратах.

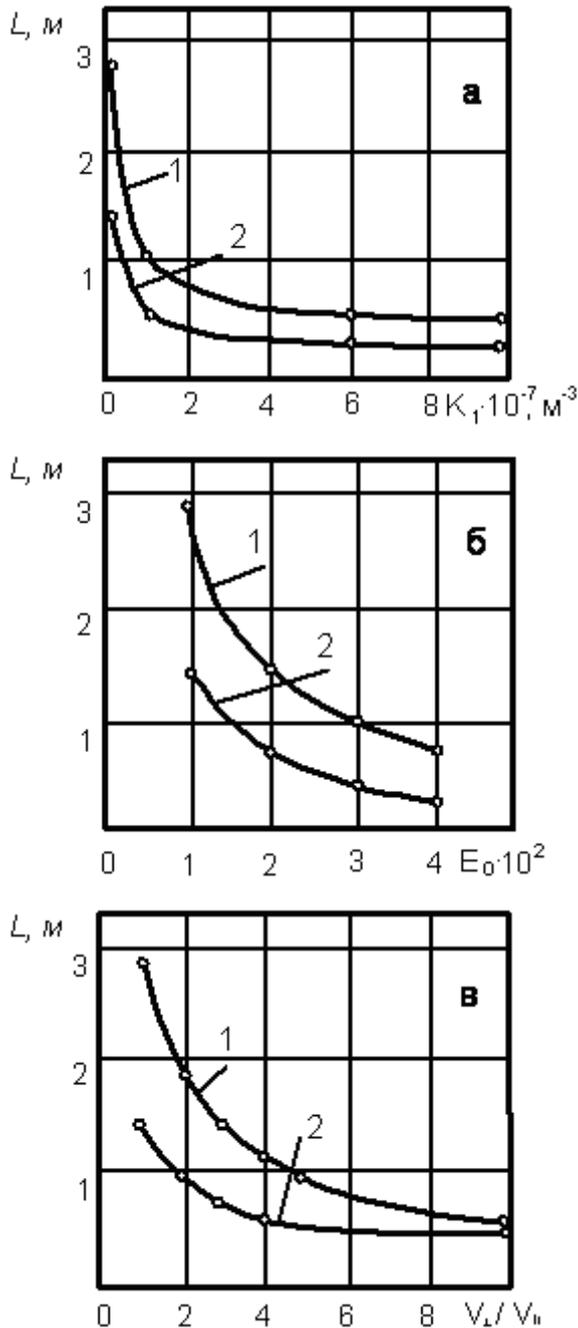


Рис. 2. Зависимость длины очищающего слоя от числа волос в единице объема (а), эффективной толщины погранслоя (б) и отношения скоростей (в): 1 - $\rho_l/\rho_0 = 0,01$; 2 - $\rho_l/\rho_0 = 0,1$.

Предлагаемый расчет пригоден для широкого диапазона скоростей. Ограничение по скорости воздушного потока вытекает из упругих свойств волоса. Эксперимент по определению коэффициента упругости

на изгиб волоса длиной $R = 40$ мм и диаметром $d = 0,25$ мм дает смещение конца волоса на ~ 20 мм при грузе, приложенном к концу в $0,98$ Н. Это значит, что гирлянды из ершей будут сохранять свои поперечные размеры до скоростей, определяемых условием

$$\frac{R}{2} S \cdot \frac{\rho_0 V^2}{2} = R \cdot f, \quad (16)$$

где $S = R \cdot d$ - площадь продольного сечения волоса; $\rho_0 = 1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - плотность воздуха при нормальных условиях, $f \cong 2H$ - сила, действующая на один волос.

Выразив V из (16), получим

$$V = \sqrt{\frac{4f}{\rho_0 R d}}.$$

Подставляя численные значения, найдём

$$V \cong 6 \cdot 10^2 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса, соответствующее этой скорости будет равно

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{600 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 10^4.$$

Из этого можно заключить, что ершами можно эффективно очищать как ламинарные, так и турбулентные потоки.

Выводы

1. Разработана физико-математическая модель процесса очистки грязного воздуха от примесей с помощью фильтров, представляющих собой гирлянды из волосяных ершей.
2. Получена формула, описывающая процесс очистки воздушного потока фильтром из волосяных ершей.
3. Выполнены расчеты эффективности очистки в зависимости от плотности ершей, эффективной толщины погранслоя и величины скорости воздушного потока.
4. Предложены наиболее экономичные схемы устройств из волосяных ершей для очистки воздушных потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов Н.И., Нойманов А.Я., Омельченко Н.П. Теоретические основы очистки воды. – Макеевка: ДГАСА, 1999. – 277 с.
2. Доочистка сточных вод. Сборник научных трудов. Кишинёв. Молцагроинформреклама. 1990., 72 с.
3. Лазарев В.И. Химические проблемы защиты атмосферы. В кн. Химия нашими глазами. Наука. М.: 1981. – С. 451–468.
4. Устройство для очистки воды. А.С. 1450173 СССР, СКИ, В01 Д 29/08, 35/10, Н.И.Куликов, Н.П. Омельченко, В.Р. Пудвиль. Оpubл. в Б.И., 1989, № 48.
5. Дрёмов В.В., Куликов Н.И., Недопёкин Ф.В. Расчет эффективного удаления примесей в биореакторах с волосяными ершами. Вестник национального технического университета «ХПИ», 2004, № 37, С. 108 – 113.

