

Математическая модель процесса очистки жидких и воздушных потоков с использованием волосяных ершей

НЕДОПЕКИН Ф.В., ДРЕМОВ В.В., ЧУБАРЬ Т.И.

Донецкий национальный университет
Донбасская Национальная Академия архитектуры и строительства

На основе гидродинамического подхода предложены физическая и математическая модели явлений очистки жидких и воздушных потоков волосяными ершами.

На основі гідродинамічного підходу запропоновані фізична і математична моделі явищ очищення рідких і повітряних потоків волосяними йоржками.

On the basis of hydrodynamic approach the physical and mathematical models of the phenomena of cleaning of liquid and air streams are offered by hair ruffs.

Введение. При современных темпах и масштабах роста промышленности огромное значение приобретают мероприятия, предотвращающие загрязнение жидкой и воздушной среды, и способствующие дальнейшему оздоровлению окружающей среды[1]. Удовлетворительную степень очистки жидкости и газа можно получить с использованием различных фильтров [2,3]. Тканевые фильтры обеспечивают степень очистки до 99,5%[4]. Но они очень быстро теряют свои свойства, вследствие осаждения твердых частиц на ткань фильтра, которые приводят к уменьшению пропускной способности фильтра. Поэтому для очистки воздушных и жидких потоков предложены фильтры с более редким расположением волос в единице объема. Эти фильтры представляют собой гирлянды из волосяных ершей. Так же наряду с ершами предлагается использовать метод аэрации для очистки сточных вод и адсорбцию - для газовых потоков.

Цель работы. Задача данного исследования состоит в создании достаточно простой физико-математической модели изучаемых явлений и получения математических выражений, описывающих процессы процеживания, аэрации и адсорбции.

Материалы и результаты исследования. При рассмотрении процесса очистки сточных вод можно выделить два главных процесса: процеживание и аэрация. Процеживание осуществляется волосяными ершами, которые представляют собой скрученные капроновые шнуры, в которые продеты капроновые волокна[1]. Шнуры крепятся на квадратных или прямоугольных рамах, изготовленных из металлического уголка. Для очистки жидкости аэрацией используются аэрационные трубы, которые пролегают по дну канала. На рис. 1 показан биореактор №1, в котором аэрационные трубы проложены равномерно по дну канала. Вдоль боковых стенок количество воздушных отверстий чаще, чем в центре устройства, за счет этого возникают две винтообразные траектории течения жидкости вдоль канала, закручивающиеся в разные стороны. Это происходит за счет наложения поперечной скорости течения жидкости на продольную. На рис.2 представлен биореактор №2, в котором трубы расположены тоже равномерно по всему дну вдоль

канала, но воздушные отверстия располагаются чаще к одной из стенок канала. Таким образом, возникает одна винтообразная траектория течения жидкости.

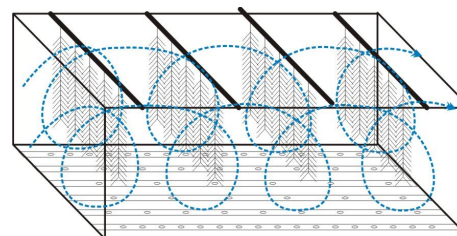


Рис. 1. Биореактор №1: аэрационные трубы проложены равномерно по дну канала, вдоль боковых стенок количество воздушных отверстий чаще, чем в центре устройства

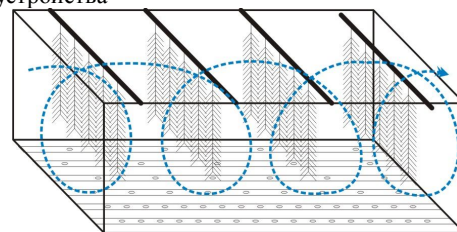


Рис. 2. Биореактор №2: аэрационные трубы расположены равномерно по всему дну вдоль канала, но воздушные отверстия располагаются чаще к одной из стенок канала

В рассматриваемой работе теоретически исследуются процессы комплексной очистки грязного воздуха, которые осуществляются гирляндами волосяных ершей и каплями воды, которые располагаются в двух камерах очистки (Рис. 3). В первой камере равномерно размещаются кассеты с ершами, а во второй разбрызгивающие форсунки. Заселяя волосы ерша определенным видом микроорганизмов, можно осуществить выборочную адсорбцию той или иной примеси и переработку ее с помощью микроорганизмов в безвредное состояние. Эффективность очистки тем выше, чем больше плотность волос. Но высокая концентрация волос

приводит к увеличению гидродинамического сопротивления, а, следовательно, к уменьшению скорости протекания воздушного потока в устройстве, и к замедлению очитки. Поэтому увеличение плотности волос нужно осуществлять до разумных пределов, чтобы не занижать очень сильно расход газа через устройство, тем самым уменьшая степень очистки.

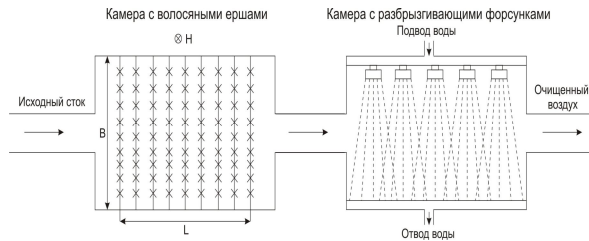


Рис. 3. Конструкция камер с волосяными ершами и разбрызгивающими форсунками для очистки воздушных потоков

Процессы, протекающие в биореакторах очень сложны. Чтобы применить методы математического анализа была разработана следующая упрощенная физическая модель: вся жидкость, находящаяся в канале, разбивается на элементарные жидкие кубики, которые при движении по коридору биореактора реагируют с волосами ершей и пузырьками воздуха, что приводит к удалению примесей.

Размер жидкого кубика определяется исходя из того, что в данный момент с одним волосом ерша реагирует один жидкий кубик. Поэтому объем элементарного жидкого кубика равен всему объему устройства, деленному на число волос в устройстве

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

где H – высота камеры; B – ширина камеры; L – длина камеры.

Введем понятие средней плотности волос в устройстве

$$\kappa_1 = \frac{N_{01}}{HBL}. \quad (2)$$

Траектория движения жидкого кубика определяется размерами камеры очистки, а также поперечной V_{\perp} и продольной V_{\parallel} составляющими скорости движения жидкого потока. Среднее значение длины l траектории жидкого 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 введем среднюю эффективную площадь, прочерченную волосом в единичном жидком кубике при однократном его проходе через волос:

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

где a – длина ребра жидкого кубика; b – длина волоса ерша; α – угол между волосом и ребром кубика.

Учитывая формулы (2-4) и проводя математические преобразования, получим

$$\frac{\rho_n}{\rho_0} = (1 - E_{01}) \left[\kappa_1^{1/3} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \right) \right]^n, \quad (5)$$

где E_{01} – относительное изменение плотности примеси при однократном пересечении волоса ерша, ρ_0 – начальная плотность вредных примесей в жидкости, ρ_n – плотность вредных примесей в жидком кубике при n -ом пересечении волос ерша.

Анализируя формулу (5) можно отметить, что изменение плотности примеси в фильтре уменьшается по степенному закону и концентрация примесей зависит от плотности ершей. Для подтверждения сделанных выводов были построены графики показывающие зависимость относительной концентрации примесей от плотности волос (рис. 4). Рассмотрим очистное сооружение в виде канала прямоугольного сечения шириной $B=3$ м, высотой $H=2$ м, числом волос $N_{01} = 10^6$. Отношение скоростей продольного и поперечного течения примем $\frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} = 0,1$, относительное

изменение плотности примеси в жидком кубике при однократном пересечении волосом $E_{01} = E_{02} = 0,0001$. По формуле (5) были проведены численные расчеты необходимых размеров камеры очистки при различных значениях параметров жидкого потока. Результаты расчетов представлены на графиках (рис.4). Кривая 1 для $L=10$ м, кривая 2 для $L=15$ м, кривая 3 для $L=20$ м. Исследуя графики можно сделать вывод, что концентрация примесей зависит от длины канала. Наглядно видно, что при $\kappa_1 = 10^4 \text{ м}^{-3}$ и при длине камеры 10 м относительная концентрация примесей составляет 27%, а при $L=20$ м – 7%. Т.е. чем больше длина камеры очистки, тем лучше происходит удаление примесей. Из рисунков видно, что эффективные рабочие участки лежат вблизи вершин гипербол. Это значит, что создавая очистное устройство с соответствующими значениями параметров с необходимой степенью очистки, при минимальных затратах необходимо использовать результаты расчетов.

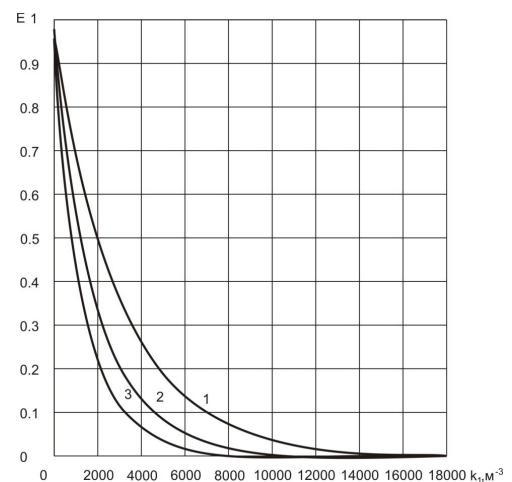


Рис. 4. Зависимость относительной концентрации примесей от плотности волос: 1 – кривая для $L=10$ м; 2 – кривая для $L=15$ м; 3 – кривая для $L=20$ м

Далее рассмотрим очистку сточных вод при помощи аэрации. Введение средней длины траектории позволяет сделать вывод, что остальные воздушные кубики взаимодействуют с волосами ершей подобным же образом, что и один кубик, движущийся по средней линии.

Т.к. в фильтре очистка происходит также с помощью пузырьков воздуха необходимо определить массу выделившейся примеси при однократном пересечении жидкого кубика пузырьком:

$$\Delta m_0 = \pi \delta_2 a \delta_z \rho_0, \quad (6)$$

где δ_2 – диаметр воздушного пузыря; δ_z – толщина эффективного погранслоя вокруг пузыря; a – длина ребра жидкого кубика; ρ_0 – первоначальная плотность примесей в сточной воде.

Абсолютное изменение плотности примеси при одном пересечении пузырьком жидкого кубика с учетом (6), будет

$$\Delta \rho_0 = \frac{\Delta m_0}{a^3} = \frac{\pi \delta_2 \delta_z \rho_0}{a^2}. \quad (7)$$

Относительное изменение плотности примеси в жидком кубике при однократном пересечении пузырька

$$E_{02} = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \frac{\pi \delta_2 \delta_z}{a^2}. \quad (8)$$

Проведя дальнейшие расчеты, аналогичные тем, что были проделаны для волос в ершах, получим

$$\frac{\rho_m}{\rho_0} = (1 - E_{02})^m, \quad (9)$$

где показатель степени m определяет число пересечений жидкого кубика воздушными пузырьками.

Проводя дальнейшую аналогию подобно формуле для ершей, получим выражение m для воздушных пузырьков

$$m = L \frac{\kappa_2}{\kappa_1^{2/3}} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right), \quad (10)$$

где κ_2 – средняя плотность пузырьков в единице объема.

Она равна общему числу пузырьков, находящихся в устройстве в данный момент времени, деленному на объем устройства.

С учетом формул (9, 10) получаем

$$\frac{\rho_m}{\rho_0} = (1 - E_{02})^{\left[L \frac{\kappa_2}{\kappa_1^{2/3}} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right) \right]}. \quad (11)$$

Формула (11) для явления пересечения жидкости пузырьками, отличается от формулы (5) тем, что в показатель степени входит плотность пузырьков воздуха κ_2 . Для наглядного подтверждения эффективности очистки были построены графики показывающие зависимость относительной концентрации примесей от пузырьков воздуха (рис. 5). Рассмотрим очистное сооружение с такими же параметрами, как и для ершей. По формуле (11) были проведены численные расчеты необходимых размеров камеры очистки при различных значениях параметров жидкого потока. Результаты расчетов представлены на графиках (рис. 5). Кривая 1 для $L=10$ м, кривая 2 для $L=15$ м, кривая 3 для $L=20$ м. По графикам можно

заметить, что для высокой степени очистки необходимо увеличивать длину очистного устройства или плотности пузырьков воздуха, пронизывающих поток. Но удлинение биореактора нужно осуществлять до разумных пределов, так как это связано с увеличением затрат, кроме того можно увеличивать количество пузырьков воздуха для заданной длины камеры. Например, эффективное удаление примесей, при длине устройства $L=10$ м, происходит до значения $\kappa_2 = 10^4 \text{ м}^{-3}$ и в дальнейшем увеличение плотности пузырьков воздуха не имеет смысла, так как это уже экономически не выгодно.

В используемых фильтрах процессы процеживания и аэрации идут последовательно и формулы (5) и (11) можно объединить в одну. Исходя из этого, запишем окончательную формулу в полном виде

$$\rho_m = \rho_0 (1 - E_{01})^n (1 - E_{02})^m, \quad (12)$$

где $n = L \kappa_1^{1/3} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)$, а $m = L \frac{\kappa_2}{\kappa_1^{2/3}} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)$.

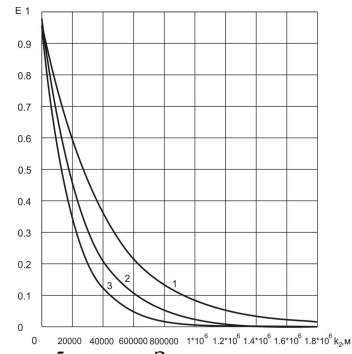


Рис. 5. Зависимость относительной концентрации примесей от плотности пузырей: 1 – кривая для $L=10$ м; 2 – кривая для $L=15$ м; 3 – кривая для $L=20$ м

Анализируя выражение (12) можно сделать вывод, что на скорость убывания примесей очень сильно влияет плотность волос в единице объема устройства и плотность пузырьков воздуха. Также можно сказать, что чем больше отношение перпендикулярной и продольной составляющих скоростей, тем быстрее происходит очистка от примесей.

Далее рассмотрим очистку воздушного потока. В предлагаемой модели рассматривается идеальный газ при нормальных условиях. В этом газе могут быть примеси в виде капель, мелкодисперсных твердых частиц, либо в виде паров. Размер воздушного кубика определяется исходя из того, что в данный момент с одним волосом ерша реагирует один воздушный кубик. Они аналогичны жидким кубикам, которые использовались при рассмотрении очистки сточных вод. Процессы очистки воздушной и водной среды при помощи гирлянды волосяных ершей одинаковые. Пользуясь выводом формул для очистки сточных вод, можно записать аналогичную для грязного воздуха:

$$\rho_m = \rho_0 (1 - E_{01})^n (1 - E_{02})^m, \quad (13)$$

где $n = L \kappa_1^{1/3} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)$, а $m = L \frac{\kappa_2}{\kappa_1^{2/3}} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)$.

Анализируя выражение можно сделать вывод, что на скорость убывания примесей очень сильно влияет плотность волос в единице объема устройства и плотность водяных капель. Также можно сказать, что чем больше отношение скоростей перпендикулярной и продольной составляющих, тем быстрее происходит очистка от примесей.

Анализом результатов являются графики (рис.6, рис.7). Выполняя расчеты по формуле (13), получим относительное изменение плотности примесей, которое характеризует степень очистки. На рис.6 число капель в единице объема $\kappa_2 = 10^3$, а κ_1 - число волос в единице объема принимало значение $\kappa_1 = 10^4, 10^5, 10^6$, что на графиках представлено кривыми 1-3. Из рис.6 следует, что чем больше плотность ершей, тем быстрее идет процесс очистки и тем меньше нужна длина камеры для заданной степени очистки. И, следовательно, можно указать оптимальную длину камеры, обеспечивающую выбранную степень очистки. На рис.7 $\kappa_1 = 10^4$, а $\kappa_2 = 10^3, \kappa_2 = 10^4, \kappa_2 = 10^5$, которым соответствуют кривые 1,2,3. Из рисунка 7 следует, что чем больше плотность капель, тем быстрее происходит очистка. По графикам видно, что изменение относительной плотности примесей зависит от количества ершей и количества капель в камере очистки. Также по данным графикам можно подобрать оптимальное значение длины камеры при заданном количестве ершей и капель, обеспечивающее заданную степень очистки.

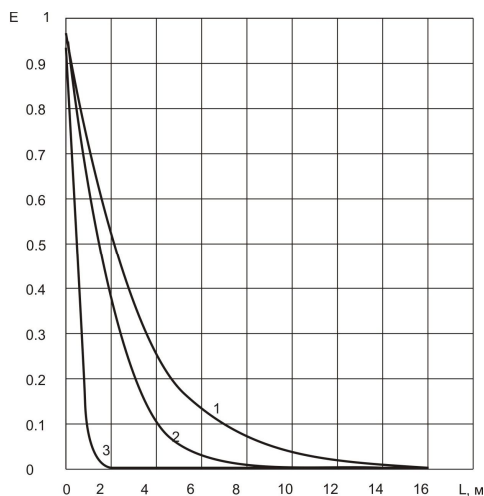


Рис. 6. Зависимость длины канала от количества ершей. Для $\kappa_2 = 10^3$:
1 – $\kappa_1 = 10^4$; 2 – $\kappa_1 = 10^5$; 3 – $\kappa_1 = 10^6$.

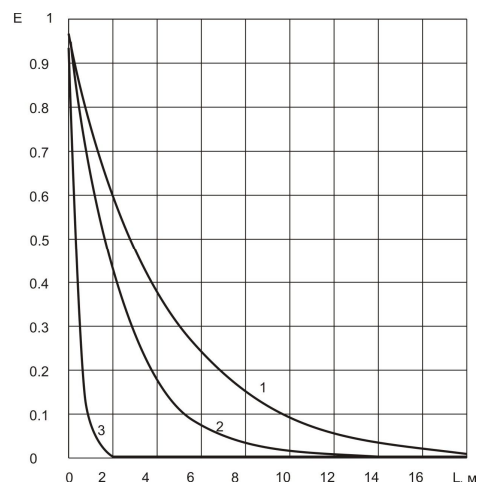


Рис.7. Зависимость длины канала от количества капель. Для $\kappa_1 = 10^4$:
1 – $\kappa_2 = 10^3$; 2 – $\kappa_2 = 10^4$; 3 – $\kappa_2 = 10^5$.

Выводы

Разработаны физико-математические модели явлений процеживания, аэрации, а также адсорбции, протекающие при очистке жидких и газообразных потоков.

Получены формулы, описывающие процессы очистки, протекающие в биореакторе, которые предлагают новую методику расчета очистных устройств.

Предложена методика, которая позволяет рассчитывать оптимальное строение камеры, обеспечивающее заданную степень очистки жидких и газовых потоков.

Установлены главные факторы, влияющие на степень удаления вредных примесей в жидкостях и газах: плотность волосяных ершей; плотность воздушных пузырей и капель; отношение скоростей продольной и поперечной составляющих; длина канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов Н.И., Омельченко Н.П., Пудвиль В.Р. Устройства для очистки воды. А.С. 1450173 СССР, СКИ, В01 Д 29/08,35/10 №49 – Б.И.: 1989.
2. Куликов Н.И., Найманов А.Я., Омельченко Н.П. Теоретические основы очистки воды – М.: ДГАСА, 1999. – 277с.
3. Доочистка сточных вод. Сборник трудов – Кишинев: Молцагроинформреклама, 1990. – 72с.
4. Лазарев В.И. Химические проблемы защиты атмосферы // Химия нашими глазами – М.: Наука, 1981. С. 451 – 468.
5. Дремов В.В., Недопекин Ф.В., Куликов Н.И. Расчет эффективного удаления примесей в биореакторах с волосяными ершами // Вестник национально технического университета ХПИ №37, 2004. – С.108 – 113.

пост. 17.06.11

