

УДК 628.3

**В. В. Дремов¹, д-р техн. наук, Ф. В. Недопекин², д-р техн. наук,
Н. И. Куликов³, д-р техн. наук, И. А. Артемова⁴**

1 – Донбасская академия строительства и архитектуры, г. Макеевка,

2, 4 – Донецкий национальный университет, г. Донецк,

3 – Сочинский государственный университет, г. Сочи

УВЕЛИЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАМЕР С ВОЛОСЯНЫМИ ЕРШАМИ И АЭРАЦИОННЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Исследуются процессы комплексной очистки сточных вод, которые осуществляются гирляндами волосяных ершей и аэрацией, с учетом их гидродинамического сопротивления жидкому потоку и с определением времени загрязнения ершей. Разработана упрощенная физико-математическая модель, которая рассматривает жидкость, как элементарные жидкие кубики. В ходе исследования выявлено, что на скорость убывания примеси влияет количество волос в единице объема и плотность пузырьков воздуха.

***Ключевые слова:** камера очистки, волосяные ерши, аэрация, жидкий поток, степень очистки*

Введение

Существование воды в абсолютно чистом виде невысказимо из-за ее высокой растворяющей способности. Природные и сточные воды представляют собой сложную динамическую систему, содержащую газы, минеральные и органические вещества в истинно растворенном или нерастворимом состояниях [1].

В данной работе для очистки сточных вод рассматриваются очистные устройства, представляющие собой канал прямоугольного сечения, в котором на определенном расстоянии устанавливаются рамки с ершами, а по дну канала проложены трубы с отверстиями [2], через которые пропускается воздух.

Цель работы

Построение физико-математической модели явления процеживания жидкого потока сквозь рамки с волосяными ершами с учетом гидродинамического сопротивления и загрязнения ершей; исследование влияния аэрации на процесс очистки; расчет рационального расположения рамок с ершами.

Очистка сточных вод ершами

Процессы, протекающие в биореакторах очень сложны. Чтобы применить методы математического анализа, 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 [3].

Размер жидкого кубика определяется исходя из того, что в данный момент с одним волосом ерша реагирует один жидкий кубик [4]. Поэтому объем элементарного жидкого кубика равен всему объему устройства, деленному на число волос в устройстве:

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

где N_{01} – общее число волос во всем объеме биореактора;

H – высота коридора биореактора, м;
 B – ширина коридора, м;
 L – длина коридора, м.

Формула (1) получена в предположении, что распределение волос в биореакторе равномерное. Длина ребра жидкого кубика будет равна

$$a = \left(\frac{HBL}{N_{01}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$

Введем понятие средней плотности волос в устройстве

$$k_1 = \frac{N_{01}}{HBL}, \text{ м}^{-3}, \quad (3)$$

тогда формула (2) с учетом (3) примет вид

$$a = \left(\frac{1}{k_1} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (4)$$

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

$$l = L \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \right). \quad (5)$$

Из описания устройства ершей следует, что диаметр волоса много меньше его длины и поэтому не учитывается влияние торцов на эффект очистки. Т. к. волосы располагаются в ерше веерообразно по окружности, то введем среднюю эффективную площадь жидкости, прочерченной волосом в жидком кубике, при однократном его проходе через волос [5]

$$S_{cp} = 2ab \overline{\sin \alpha}, \quad (6)$$

где a – длина ребра жидкого кубика, м;
 b – длина волоса ерша;

α – угол между волосом и ребром кубика, изменяющийся от 0 до $\frac{\pi}{2}$.

Среднее значение синуса будет равно

$$\overline{\sin \alpha} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi}. \quad (7)$$

Учитывая (7) в (6), получим

$$S_{cp} = \frac{4ab}{\pi}. \quad (8)$$

Объем жидкости, прореагировавшей с волосами при однократном проходе жидкого кубика, будет равен

$$V_{cp} = S_{cp} \sigma_x = \frac{4ab}{\pi} \sigma_x, \quad (9)$$

где σ_x – толщина эффективного пограничного слоя жидкости, успевшей прореагировать с волосом ерша, м.

При этом происходит выделение примеси, содержащейся в жидкости. Ее масса, при однократном пересечении жидким кубиком первого волоса, равна

$$\Delta m_0 = \rho_0 V_{cp} = \rho_0 \frac{4ab}{\pi} \sigma_x, \quad (10)$$

где ρ_0 – первоначальная плотность примесей в жидкости, кг/м³.

Абсолютное изменение плотности примесей в жидком кубике при этом составит

$$\Delta \rho_0 = \frac{\Delta m_0}{a^3} = \frac{4b\sigma_x}{\pi a^2} \rho_0. \quad (11)$$

Относительное изменение плотности примеси при одном пересечении волоса

$$E_0 = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \frac{4b\sigma_x}{\pi a^2}. \quad (12)$$

Предполагая, что толщина σ_x эффективного слоя жидкости, реагирующего с волосом, не зависит от номера пересечения жидкого кубика волосом, можно показать, что

$$\frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \frac{\Delta \rho_1}{\rho_1} = \dots = \frac{\Delta \rho_n}{\rho_n} \quad (13)$$

или

$$E_0 = E_1 = \dots = E_n. \quad (14)$$

Выражая относительное изменение плотности примеси в каждом пересечении через относительное изменение плотности к первоначальной, найдем, что

$$\frac{\rho_n}{\rho_0} = (1 - E_0)^n, \quad (15)$$

где n – число пересечений жидкого кубика волосами ершей.

Чтобы вычислить показатель степени n подсчитаем число волос, которые попадают внутрь объема жидкой трубки, длина траектории которой равна l . Умножив (5) на площадь поперечного сечения a^2 , получим

$$n = Lk_1^{1/3} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right). \quad (16)$$

Учитывая (16) в (15), найдем

$$\frac{\rho_n}{\rho_0} = (1 - E_0)^{Lk_1^{1/3} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)}. \quad (17)$$

Анализируя эту формулу, можно отметить, что изменение плотности примесей в био-реакторе уменьшается по степенному закону, в котором основанием служит число меньше единицы, а в показатель входит безразмерная величина, зависящая от плотности волос в камере реактора, его длины и скоростей движения жидкости.

Очистка аэрацией

Кроме того, в рассматриваемом случае жидкость насыщается кислородом для поддержания жизни колоний бактерий на волосах ерша и аэрации. При прохождении воздушно-го пузыря через элементарный жидкий кубик на толщине погранслоя вокруг пузыря, происходит окисление примесей в жидкости, что способствует выделению их в осадок.

Масса выделившейся примеси при однократном пересечении пузырьком воздуха жидкого кубика равна [6]

$$\Delta m_0 = \pi \delta_2 a \delta_z \rho_0, \quad (18)$$

где δ_2 – диаметр воздушного пузыря, м;

δ_z – толщина эффективного погранслоя вокруг пузыря, м.

Абсолютное изменение плотности примесей в жидком кубике при одном пересечении составит

$$\Delta \rho_0 = \frac{\Delta m_0}{a^3} = \frac{\pi \delta_2 \delta_z}{a^2} \rho_0. \quad (19)$$

Относительное изменение плотности примеси в жидком кубике при однократном пересечении пузыря

$$E_{02} = \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} = \frac{\pi \delta_2 \delta_z}{a^2}. \quad (20)$$

Проведя расчеты, аналогичные тем, что проделаны для случая с ершами по формулам (11)–(15), получим

$$\frac{\rho_m}{\rho_0} = (1 - E_{02})^m, \quad (21)$$

где m – число пересечений жидкого кубика воздушными пузырями.

Проводя дальнейшую аналогию подобно формуле (16) для волосяных ершей, вычислим показатель степени

$$m = L \frac{k_2}{k_1^{2/3}} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right), \quad (22)$$

где k_2 – средняя плотность пузырей в единице объема. $k_2 = \frac{N_{02}}{HBL}$.

С учетом формулы (22) выражение (21) примет вид

$$\frac{\rho_m}{\rho_0} = (1 - E_{02})^{\frac{L k_2}{k_1^{2/3}} \left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)}. \quad (23)$$

Совместное влияние процеживания и аэрации

В современных биореакторах процессы процеживания и аэрации идут одновременно, поэтому формулы (17) и (23) нужно объединить в одну. Рассмотрим процессы, идущие не одновременно, а последовательно. При таком проходе все главные факторы учитываются, но влияние одного явления на другое не учитывается [7].

После процеживания сквозь волосяные ерши жидкость с плотностью примеси ρ_n поступает на аэрацию. Учитывая n и m , запишем окончательную формулу:

$$\rho_m = \rho_0(1 - E_0)^{Lk_1^{1/3}(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}})} (1 - E_{02})^{L \frac{k_2}{k_1^{2/3}}(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}})} \quad (24)$$

Формула представляет собой произведение двух показательных функций, в которых основаниями являются числа меньше единицы, а показатели степени больше единицы. Анализируя данное выражение, можно сказать, что на скорость убывания примеси сильно влияет количество волос в единице объема и плотность пузырьков воздуха.

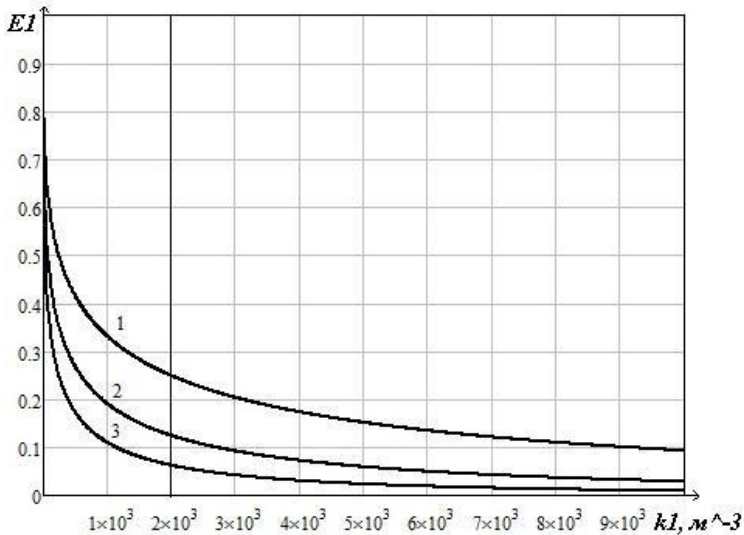


Рисунок 1 – Зависимость относительной концентрации примесей от плотности волос:
1 – $L = 10$ м; 2 – $L = 15$ м; 3 – $L = 20$ м.

жидком кубике при однократном пересечении $E_{01} = E_{02} = 0,01$, начальной плотности примесей $\rho_0 = 5$ кг/м³.

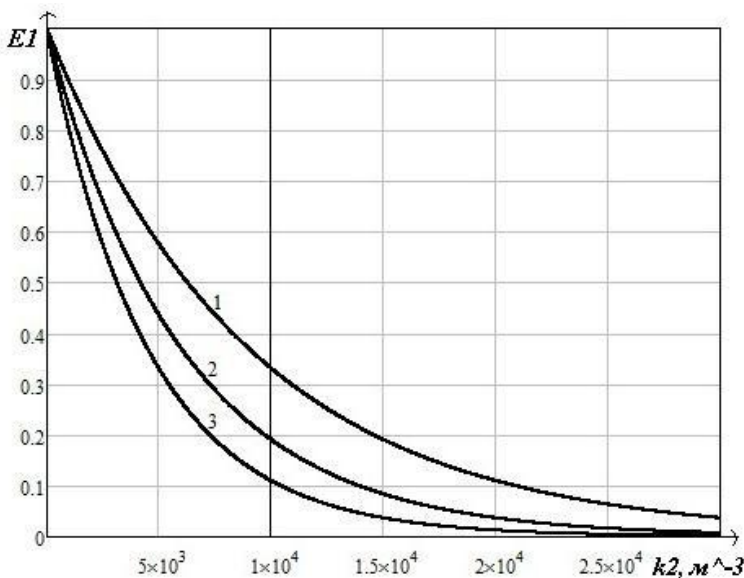


Рисунок 2 – Зависимость относительной концентрации примесей от плотности пузырей:
1 – $L = 10$ м; 2 – $L = 15$ м; 3 – $L = 20$ м.

Численные примеры расчетов реальных устройств

По формулам (17) и (23) выполнены численные расчеты зависимости относительной плотности примесей в потоке в зависимости от средней плотности волос и плотности пузырей, они изображены на рисунках 1 и 2, соответственно.

Рассмотрим очистное сооружение в виде канала длиной $L = 10; 15; 20$ м прямоугольного сечения шириной $B = 3$ м, высотой $H = 2$ м, числом волос $N_{01} = 10^6$, отношением скоростей продольного и поперечного течения $V_{\perp}/V_{\parallel} = 0,1$, относительным изменением плотности примеси в

Из рисунка 1 видно, что степень очистки зависит от объема камеры при заданной плотности волос. При средней плотности заполнения объема волосами $k_1 = 2 \cdot 10^3$ м⁻³ количество извлеченной примеси будет больше в очистном сооружении длиной 20 м, чем в остальных. Для достижения аналогичных результатов в конструкциях меньшей длины необходимо увеличить плотность волос. Например, при плотности волос 2000 м⁻³ в камере длиной 10 м степень очистки будет около 0,25, в 15-метровой – 0,13, а в 20 м – около 0,06.

Зависимость на рисунке 2 аналогична предыдущему случаю. При средней плотности пу-

зырей 10000 м^3 в канале длиной 10 м будет достигнута степень очистки равная 0,34, в 15-метровом канале – 0,2, а при 20 м – 0,1.

Учет гидродинамического сопротивления

При прохождении жидкости через рамки с ершами происходит торможение жидкости вследствие трения о ерши, при этом скорости V_{\perp} и V_{\parallel} уменьшаются и процесс очистки замедляется. За счет аэрационных труб, проложенных по дну канала, возникает барботажный эффект, который сохраняет поперечную составляющую скорости. А чтобы компенсировать уменьшение продольной скорости, нужно делать камеру с наклоном.

Для расчета гидродинамического сопротивления, оказываемого ершами, рассмотрим следующую физическую модель взаимодействия жидкости с гирляндами ершей: весь жидкий поток разобьем на прямоугольные параллелепипеды по высоте равные длине гирлянды и на примере взаимодействия одного такого параллелепипеда с гирляндой ершей посчитаем величину потерь поступательного движения потока.

Лобовое сопротивление гирлянды с ершами определим по формуле [8]

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (25)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

v – скорость течения жидкости, м/с ;

S – площадь вертикального поперечного сечения гирлянды с ершами, м^2 ;

C_x – коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса, определяемого по формуле

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}, \quad (26)$$

где d – диаметр гирлянды с ершами, м ;

ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Перепад высот камеры на входе и выходе определим из разности потенциальной энергии на входе и выходе и величине потерь энергии на трение жидкого потока о волосы ершей:

$$\rho a^2 b g h = C_x \frac{\rho v^2}{2} a^2 b, \quad (27)$$

где $a = 2b$ – представляет собой сторону прямоугольного параллелепипеда, пересекающего гирлянду с ершами, м ;

b – длина гирлянды, м ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

h – перепад высот, м .

Из формулы (27) получим для высоты перепада, компенсирующей гидродинамические потери, выражение

$$h = C_x \frac{v^2}{2g}. \quad (28)$$

Значения высоты перепада и углов наклона камеры для различных значений скоростей потока при расстоянии между рамками $l = 0,08 \text{ м}$ приведены в таблице 1. Величина H обозначает высоту наклона дна камеры реактора при $L = 10 \text{ м}$.

Таблица 1 – Значение высоты перепада и углов наклона камеры

№ п/п	v , м/с	Re	C_x	h , м	a , °	h/l	H , м
1	$8 \cdot 10^{-3}$	320	1,5	$5 \cdot 10^{-6}$	0,003	0,00006	0,0006
2	$5 \cdot 10^{-2}$	2000	1	$1,27 \cdot 10^{-4}$	0,09	0,0016	0,016
3	$8 \cdot 10^{-2}$	3200	1	$3,26 \cdot 10^{-4}$	0,23	0,004	0,04
4	$1,2 \cdot 10^{-1}$	4800	1	$0,13 \cdot 10^{-3}$	0,52	0,009	0,09
5	$1,5 \cdot 10^{-1}$	6000	1	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,8	0,014	0,14
6	$2 \cdot 10^{-1}$	8000	1,2	$0,24 \cdot 10^{-2}$	0,72	0,03	0,3
7	$5 \cdot 10^{-1}$	20000	1,3	$0,17 \cdot 10^{-1}$	11,5	0,2	2

При малых скоростях течения жидкого потока ерши оказывают небольшое сопротивление и его можно не учитывать, но при скоростях больших 0,2 м/с сопротивлением пренебречь нельзя [2].

Учет загрязнения ершей

При прохождении волоса ерша через жидкий кубик часть твердых примесей, находящихся в нем, оседает на волос. Предположим, что обтекание жидкостью волоса ламинарное, тогда с волосом будет реагировать тонкий слой жидкости с эффективной толщиной Δa_0 . Будем считать, что вся твердая примесь, находящаяся в слое, налипает на волос. Ее масса в тонком слое равна

$$m_0 = \Delta a_0 S_0 \rho_0. \quad (29)$$

Здесь средняя площадь S_0 , прорезаемая волосом в жидком кубике, определяется по формуле

$$S_0 = \frac{4ab_0}{\pi}. \quad (30)$$

Объем осевшей примеси равен

$$\Delta V_0 = \frac{m_0}{\rho_T}, \quad (31)$$

где ρ_T – плотность примеси в твердом состоянии, кг/м³.

При пересечении волосом n -го воздушного кубика, выделившаяся масса будет равна

$$M = nm_0, \quad (32)$$

а ее объем

$$V_n = \frac{M}{\rho_T} = \frac{n\Delta a_0 S_0 \rho_0}{\rho_T}. \quad (33)$$

Выразим объем чистого волоса через геометрические размеры в виде объема цилиндра

$$V_0 = \frac{\pi \beta_0^2}{4} b_0, \quad (34)$$

где β_0 – диаметр чистого волоса, м;

b_0 – длина чистого волоса, м.

Тогда объем загрязненного волоса будет равен

$$V_n = \frac{\pi\beta_n^2}{4} b_n, \quad (35)$$

где

$$\beta_n = \beta_0 + 2\Delta\beta_n, \quad (36)$$

$$b_n = b_0 + \Delta\beta_n, \quad (37)$$

где $\Delta\beta_0$ – толщина слоя примеси, м.

Предположим, что толщина слоя примеси, осевшей на волос, везде одинакова. Тогда полный объем грязного волоса определяется по формуле (35).

Учтем (36) и (37) в (35), получим

$$\frac{\pi}{4} (\beta_0 + 2\Delta\beta_n)^2 (b_0 + \Delta\beta_n) = V_n. \quad (38)$$

Выполнив математические преобразования и учитывая (33) и (34), получим

$$\Delta\beta_n^3 + \Delta\beta_n^2 \left(\beta_0 + \frac{b_0}{2}\right) + \Delta\beta_n \frac{\beta_0}{4} (\beta_0 + 2b_0) = \frac{nS_0\rho_0}{2\pi\rho_T} \Delta a_0. \quad (39)$$

Найдем время полного загрязнения гирлянды волосяных ершей. Для этого предположим, что толщина налипшей примеси равна предельно возможной толщине $\Delta\beta_0 = \Delta\beta_{пред}$.

Тогда левая часть уравнения (40) будет известна:

$$G = \Delta\beta_n^3 + \Delta\beta_n^2 \left(\beta_0 + \frac{b_0}{2}\right) + \Delta\beta_n \frac{\beta_0}{4} (\beta_0 + 2b_0). \quad (40)$$

Вводя новые обозначения в (40), получим

$$G = n\alpha, \quad (41)$$

где

$$\alpha = \frac{S_0\rho_0}{2\pi\rho_T} \Delta a_0. \quad (42)$$

Выразим n -число жидких кубиков, пересекших данный волос, через время загрязнения $t_{заг}$ и время пересечения одного кубика волосом ерша $t_{1куб}$.

$$n = \frac{t_{заг}}{t_{1куб}}, \quad (43)$$

где

$$t_{1куб} = \frac{a}{v_{cp}}. \quad (44)$$

Здесь v_{cp} – средняя скорость движения жидкого потока, м/с.

$$v_{cp} = \sqrt{v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2}. \quad (45)$$

Преобразуем выражение (43), учитывая (44) и (45), получим

$$n = \frac{t_{заг}}{a} \sqrt{v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2}. \quad (46)$$

Из формул (46) и (41) получим

$$t_{\text{заг}} = \frac{G}{\alpha} \cdot \frac{a}{\sqrt{v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2}}. \quad (47)$$

Приведем численный расчет времени полного загрязнения волос ершей при следующих параметрах потока и ершей: $\Delta a_0 = 10^{-5}$ м, $\rho_0 = 10$ кг/м³, $\rho_T = 10^3$ кг/м³, $\Delta\beta_{\text{пред}} = 10^{-3}$ м, $\Delta\beta_0 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м, $b_0 = 8 \cdot 10^{-2}$ мм, $a = 1,3 \cdot 10^{-2}$ м при $k_1 = 0,5 \cdot 10^6$ м³, $V_{\parallel} = V_{\perp} = 6 \cdot 10^{-3}$ м/с. Результаты приведены на рисунке 3.

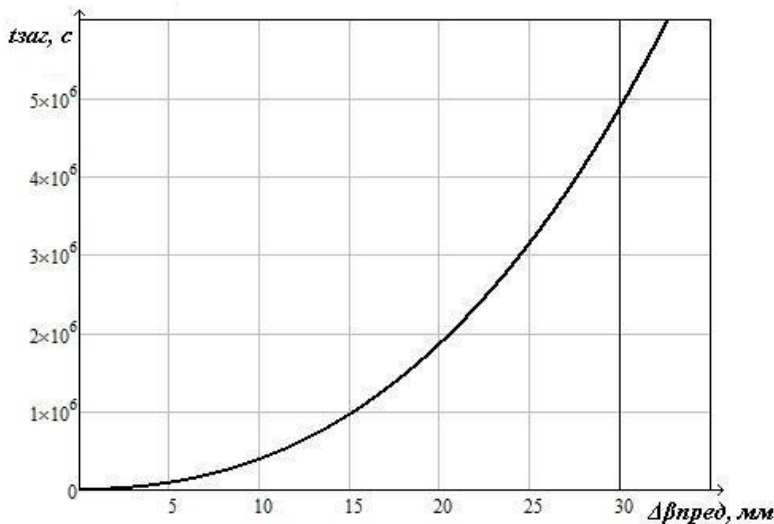


Рисунок 3 – Зависимость срока службы фильтра от толщины слоя примеси

канала x . Если на координате x плотность волос равна $r_1(x)$, то на всем участке пути от 0 до x число волос будет равно интегралу от $r_1(x)$. Тогда формула (17) примет вид

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = (1 - E_0)^{\left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right) \int_0^x r_1(x) dx}, \quad (48)$$

где $\frac{\rho_x}{\rho_0}$ – степень относительного загрязнения на координате x ;

$r_1(x)$ – безразмерная плотность волос на координате x .

Выделим в формуле (48) величины, независящие от x , и обозначим их в виде

$$G = (1 - E_0)^{\left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)}, \quad (49)$$

тогда выражение (48) примет вид

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = G^{\int_0^x r_1(x) dx}. \quad (50)$$

Так как равномерная нагрузка представляется линейной зависимостью, то

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = 1 - \beta x. \quad (51)$$

Из графика (рисунок 3) видно, что если расстояние между ершами составляет порядка 0,03 м, то процесс зарастания займет около 1,5 месяца.

Рациональное расположение рамок с волосяными ершами в камере для очистки сточных вод

Когда плотность волос в устройстве одинакова по всему объему, на первые рамки с ершами оседает больше примеси, чем на остальные. Чтобы обеспечить равномерную нагрузку по всему объему камеры предположим, что плотность волос зависит от длины

Учитывая (51), в (50)

$$1 - \beta x = G^{\int r_1(x) dx} \quad (52)$$

Прологарифмировав и продифференцировав, получим

$$\frac{1}{1 - \beta x} (-\beta) = \ln G \cdot r_1(x). \quad (53)$$

Выразим $r_1(x)$ из (53)

$$r_1(x) = -\frac{\beta}{(1 - \beta x) \ln G}. \quad (54)$$

Выполнены (54) численные расчеты зависимости увеличения плотности волос по длине. Рассмотрим очистное сооружение в виде канала прямоугольного сечения шириной $B = 3$ м, высотой $H = 2$ м, с начальной плотностью примесей $\rho_0 = 5$ кг/м³, отношением скоростей продольного и поперечного течения жидкости $V_{\perp}/V_{\parallel} = 0,1$. Рисунок 4 показывает как должна увеличиваться плотность ершей при увеличении длины. Так, для канала, протяженность которого в два раза превышает высоту, плотность ершей остается практически неизменной по всему объему. В иных случаях она существенно увеличивается в конце очистного сооружения.

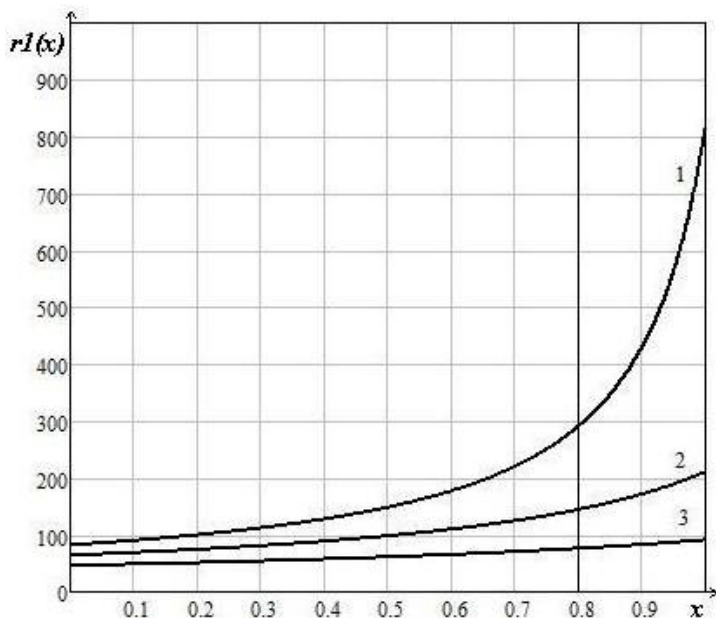


Рисунок 4 – Зависимость увеличения плотности волос по длине канала:
1 – $\beta = 0,9$; 2 – $\beta = 0,7$; 3 – $\beta = 0,5$

ного погранслоя жидкости, прореагировавшей с волосом ерша $\Delta a_0 = 10^{-5}$ м, диаметр воздушного пузыря $\delta_2 = 10^{-3}$ м, толщина эффективного погранслоя вокруг пузыря $\delta_z = 2,5 \cdot 10^{-6}$ м, плотность воздушных пузырей $k_2 = 10^3$, площадь поперечного сечения гирлянды с ершами $S = 0,16$ м², плотность примеси в твердом состоянии $\rho_T = 10$ кг/м³.

Найдем ширину канала B , используя формулу (2), из расчета, что длина ребра жидкого кубика будет равна $a = 1,3 \cdot 10^{-2}$ м и общее число волос во всем объеме биореактора $N_{01} = 10^7$:

$$B = \frac{(1,3 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 10^7}{10} \approx 2,2 \text{ м}. \quad (55)$$

Тогда средняя плотность волос k_1 по формуле (3)

которого в два раза превышает высоту, плотность ершей остается практически неизменной по всему объему. В иных случаях она существенно увеличивается в конце очистного сооружения.

Пример расчета очистных камер с учетом вышеприведенных процессов

Для расчета параметров очистных сооружений возьмем жидкость с начальной концентрацией примеси $\rho_0 = 10$ кг/м³ и пропустим ее через очистное сооружение длиной $L = 5$ м и высотой $H = 2$ м и объемным расходом сточных вод $Q = 172,8$ м³/ч.

Также учтем, что длина волоса ерша $b = 8 \cdot 10^{-2}$ м, продольная скорость течения $V_{\parallel} = 8 \cdot 10^{-3}$ м/с, а поперечная – $V_{\perp} = 8 \cdot 10^{-4}$ м/с, толщина эффектив-

$$k_1 = \frac{10^7}{22} \approx 4,5 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}. \quad (56)$$

Найдем уклон камеры h по формуле (28). Для этого подсчитаем число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{0,16 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 1275. \quad (57)$$

Из рисунка в [8] следует, что для данного числа Рейнольдса коэффициент сопротивления $C_x = 1$.

$$h = 1 \frac{(8 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9,8} \approx 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}. \quad (58)$$

При данных параметрах сопротивление ершей ничтожно мало и его можно не учитывать.

Рассчитаем время загрязнения ершей $t_{\text{заг}}$ по формуле (47). Предположим, что предельно возможная толщина налипшей примеси $\Delta\beta_{\text{пред}} = 3 \cdot 10^{-2}$ м, а диаметр чистого волоса $\Delta\beta_0 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м.

$$G = 0,03^3 + 0,03^2 \cdot 0,04025 + 0,03 \cdot 1,002 \cdot 10^{-5} \approx 6,35 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \quad (59)$$

$$\alpha = \frac{0,416 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-3}} \approx 2,107 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3, \quad (60)$$

$$t_{\text{заг}} = \frac{6,35 \cdot 10^{-5}}{2,107 \cdot 10^{-11}} \cdot \frac{1,3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{0,008^2 + 0,0008^2}} \approx 4,9 \cdot 10^6 \text{ с}. \quad (61)$$

Время загрязнения при таких условиях займет около 1,5 месяца.

Выводы

1. Установлены и рассмотрены главные факторы, влияющие на процесс очистки жидкой среды волосяными ершами и аэрацией: геометрические размеры очистного сооружения, плотность заполнения объема волосяными ершами и скорость течения жидкости.

2. Получено, что при скоростях течения жидкости меньших 0,2 м/с сопротивление ершей не оказывает существенного влияния на процесс очистки.

3. Вычислены для заданной степени очистки необходимый угол наклона камеры для преодоления гидродинамического сопротивления, а также время загрязнения ершей.

Список литературы

1. Куликов, Н. И. Теоретические основы очистки воды : учеб. пособие / Н. И. Куликов, А. Я. Найманов, Н. П. Омельченко. – Макеевка, 1999. – 8 с.
2. Недопекин, Ф. В. Расчет гидродинамического сопротивления волосяных ершей жидкому потоку / Ф. В. Недопекин, В. В. Дремов, Н. И. Куликов // Вісник Донецького національного університету. Серія А. Природничі науки. – 2013. – № 2. – С. 161–163.
3. Дремов, В. В. Математическая модель процесса очистки воздушного потока волосяными ершами / В. В. Дремов, Ф. В. Недопекин, Н. И. Куликов // Математическое моделирование. – 2007. – № 1. – С. 68–70.
4. Недопекин, Ф. В. Расчет действия аэрации на процесс очистки сточных вод / Ф. В. Недопекин, В. В. Дремов, Н. И. Куликов // Вісник Донецького національного університету. Серія А. Природничі науки. – 2008. – № 2. – С. 161–163.
5. Математическая модель процесса очистки воздушного потока комбинированным методом / В. В. Дремов, Ф. В. Недопекин, Т. И. Чубарь, В. А. Сорока // Вісник Донецького національного університету. Серія А. Природничі науки. – 2011. – № 1 – С. 156–159.

6. Недопекин, Ф. В. Экологическая проблема очистки сточных вод аэрацией / Ф. В. Недопекин, В. В. Дремов, Н. И. Куликов // Вісник Донецького національного університету. Серія А. Природничі науки. – 2008. – № 2 – С. 471–473.
7. Математическая модель явления очистки сточных вод ершами и аэрацией / В. В. Дремов, Ф. В. Недопекин, Н. И. Куликов, Т. И. Чубарь // Вісник Донецького національного університету. Серія А. Природничі науки. – 2009. – № 2 – С. 335–337.
8. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. : Наука, 1974. – 712 с.

В. В. Дремов¹, Ф. В. Недопекин², Н. И. Куликов³, И. А. Артемова⁴
1 – Донбасская академия строительства и архитектуры, г. Макеевка,
2, 4 – Донецкий национальный университет, г. Донецк,
3 – Сочинский государственный университет, г. Сочи

**Увеличение производительности камер с волосяными ершами и аэрационными трубами
для очистки сточных вод**

Исследуются процессы комплексной очистки сточных вод, которые осуществляются гирляндами волосяных ершей и аэрацией. Очистная камера представляет собой прямоугольный канал, поперек которого устанавливаются рамки из металлического уголка с вертикально расположенными гирляндами из ершей, а по дну канала проложены аэрационные трубы. Ерши представляют собой скрученные капроновые шнуры, в которые продеты капроновые волокна. При обтекании жидким потоком волос ерша происходит выделение органических и неорганических примесей, находящихся в жидкости. По дну канала проложены воздушные трубы с отверстиями. Под давлением воздух закачивается в трубы и выходит через отверстия в виде пузырьков, которые, всплывая, перемешивают жидкость вследствие барботажного эффекта и обеспечивают дополнительную составляющую скорости. Также при взаимодействии воздушного пузыря и жидкости на толщине погранслоя происходит окисление примесей, что способствует выделению их в осадок.

Для упрощения явления взаимодействия жидкости с волосами ершей весь поток жидкости разбивается на элементарные жидкие кубики. Рассматривается невязкая, несжимаемая жидкость. Предполагается, что в данный момент времени с данным волосом ерша и пузырьком воздуха взаимодействует только один элементарный жидкий кубик. Таким образом, определяется размер жидкого кубика. После первого взаимодействия предполагается, что на протяжении времени движения жидкого кубика происходит выравнивание концентрации примесей в объеме этого кубика до тех пор, пока он не подойдет ко второму волосу или воздушному пузырю.

В ходе исследования выявлено, что на скорость убывания примеси в жидкости влияет количество волос в единице объема и плотность пузырьков воздуха. При прохождении ершей замедляется течение жидкости, что нужно принимать во внимание. Гидродинамическое сопротивление сильно зависит от скорости течения жидкости: при малых скоростях течения жидкого потока ерши оказывают небольшое сопротивление и его можно не учитывать, но при скоростях больших 0,2 м/с сопротивление нужно учитывать. Учет залипания ершей показал, что если расстояние между ершами составляет порядка 0,03 м, то процесс зарастания займет около 1,5 месяца. Все вышеперечисленные факторы учитываются при расчете реальных устройств. Приведен численный пример расчета конкретного очистного сооружения.

КАМЕРА ОЧИСТКИ, ВОЛОСЯНЫЕ ЕРШИ, АЭРАЦИЯ, ЖИДКИЙ ПОТОК, СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ

V. V. Dremov¹, F. V. Nedopekin², N. I. Kulikov³, I. A. Artemova⁴
1 – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka,
2, 4 – Donetsk National University, Donetsk, 3 – Sochi State University, Sochi

Productivity Increase of Chambers with Hair Brushes and Aeration Pipes for Sewage Purification

Processes of the sewage-integrated treatment carried out by chains of hairbrushes and aeration are studied. The treatment chamber is a rectangular canal across which frames from metal angles with vertically arranged chains of hairbrushes are installed. On the canal bottom, aeration pipes are laid. Brushes are twisted nylon cords through which capron fibers are run. At the brush hair flowing with liquid stream, organic and inorganic impurities being in liquid are released. On the canal bottom, air pipes with openings are laid. Air is pumped in the pipes under pressure and escapes through openings in the form of beads, which emerge and mix liquid because of bubble effect and provide additional component of speed. In addition, at the air bubble and liquid interaction on the interface thickness there is impurity oxidation. It causes their deposition.

All fluid flow is divided into elementary liquid cubes to simplify liquid interaction with brush hair. Inviscid incompressible liquid is considered. It is suggested that at given time only one elementary liquid cube interacts with given brush hair. So liquid cube size is determined. After first interaction, it is supposed that during liquid cube

movement there is an alignment of the impurities concentration in the volume of this cube until it reaches the second hair or air bubble.

In the course of study, it is revealed that hair number in the unit of volume and density of air bubbles influence on the speed of the impurity decrease in the liquid. At the brushes passing fluid flow is slowing down, it should be taken into account. Hydrodynamic resistance heavily depends on the fluid flow speed: at low fluid flow speed brushes resist insignificantly and it can be ignored, but at the speed more than 0,2 m/s the resistance should be considered. Accounting of the brushes sticking has shown that if the distance between brushes is about 0,03 m, then the process of overgrowing will take about 1,5 of a month. All above-mentioned factors are taken into account at real devices calculations. Все вышеперечисленные факторы учитываются при расчете реальных устройств. Numerical calculation example of concrete treatment plant is given.

PURIFICATION CHAMBER, HAIR BRUSHES, AERATION, FLUID FLOW, PURIFICATION RATE

Сведения об авторах:

В. В. Дремов

Телефон: 099 787 3467
Эл. почта: vdremov@gmail.com

Ф. В. Недопекин

Телефон: 050 745 3875
Эл. почта: f.nedopekin@gmail.com

Н. И. Куликов

Эл. почта: unpc23@mail.ru

И. А. Артемова

Телефон: 095 511 0556
Эл. почта: artyomova_i@mail.ru

Статья поступила 24.11.2016

© В. В. Дремов, Ф. В. Недопекин, Н. И. Куликов, И. А. Артемова, 2017

Рецензент: С. П. Высоцкий, д-р техн. наук, проф. АДИ ГОУВПО «ДонНТУ»