

УДК 628.3

DOI 10.23947/2541-9129-2017-2-76-93

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ  
ВОЛОСЯНЫХ ЕРШЕЙ И АЭРАЦИИ\******В. В. Дрёмов<sup>1</sup>, Ф. В. Недопекин<sup>2</sup>,  
Н. И. Куликов<sup>3</sup>, И. А. Артёмова<sup>4</sup>***<sup>1</sup> Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, Украина<sup>2,4</sup> Донецкий национальный университет, г. Донецк, Украина<sup>3</sup> Сочинский государственный университет, г. Сочи, Российская Федерация[f.nedopekin@gmail.com](mailto:f.nedopekin@gmail.com)[Unpc23@mail.ru](mailto:Unpc23@mail.ru)[artyomova\\_i@mail.ru](mailto:artyomova_i@mail.ru)

В статье теоретически исследуются процессы комплексной очистки сточных вод, которые осуществляются гирляндами волосяных ершей и аэрацией, с учетом гидродинамического сопротивления ершей жидкому потоку и с определением времени залипания ершей. Для проведения расчетов разработана упрощенная физико-математическая модель, которая рассматривает жидкость, как элементарные жидкие кубики. Они реагируют с волосами ершей и пузырями воздуха, что приводит к удалению примесей. В ходе исследования установлено, что на скорость убывания примеси влияет количество волос в единице объема и плотность пузырьков воздуха. Также установлено, что при скоростях течения жидкости более 0,2 м/с обязательно необходимо учитывать гидродинамическое сопротивление ершей. Предложенные расчеты дают возможность более точно проектировать новые и модернизировать существующие устройства, чтобы повысить степень очистки жидкой среды с помощью процеживания и аэрации и облегчить уход за ними.

**Ключевые слова:** камера очистки, волосяные ерши, аэрация, жидкий поток, гидродинамическое сопротивление, время залипания.

UDC 628.3

DOI 10.23947/2541-9129-2017-2-76-93

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF  
WASTEWATER TREATMENT USING  
HAIR BRUSHES AND AERATION*****V. V. Dremov<sup>1</sup>, F. V. Nedopekin<sup>2</sup>,  
N. I. Kulikov<sup>3</sup>, I. A. Artemova<sup>4</sup>***<sup>1</sup> Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Ukraine<sup>2,4</sup> Donetsk National University, Donetsk, Ukraine<sup>3</sup> Sochi State University, Sochi, Russian Federation[f.nedopekin@gmail.com](mailto:f.nedopekin@gmail.com)[Unpc23@mail.ru](mailto:Unpc23@mail.ru)[artyomova\\_i@mail.ru](mailto:artyomova_i@mail.ru)

The article deals with the processes of complex waste water treatment, which are carried out with the sets of hair brushes and aeration, taking into account the hydrodynamic resistance of brushes to liquid stream with the definition of brushes sticking time. The simplified physical and mathematical model which considers liquid as elementary liquid cubes was developed for the calculations. These cubes interact with hair brushes and air bubbles resulting in the removal of impurities. During the study it was found that the number of hairs per unit volume and density of air bubbles greatly affects the stepping rate of impurities. It was established that it is necessary to consider the hydrodynamic resistance of brushes for a flow velocity more than 0.2 m/s. All the proposed calculations make it possible to design new devices and to upgrade the existing ones to provide a high degree of purification of liquid medium with the help of straining and aeration and to facilitate their maintenance.

**Keywords:** cleaning camera, hair brushes, aeration, liquid stream, hydrodynamic resistance, sticking time.

**Введение.** Существование воды в абсолютно чистом виде немыслимо 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 [2], а по дну канала проложены трубы с отверстиями [3], через которые пропускается воздух (Рис. 1.).

**Introduction.** The existence of water in an absolutely pure form is impossible because of its high solvent ability. Natural and sewage water represent a complex dynamic system containing gases, mineral and organic matter in truly dissolved or insoluble state [1].

In this work for wastewater treatment we consider treatment devices, which have a rectangular cross-section in which at a certain distance sets of brushes are set [2] and at the bottom of the channel there are pipes laid with holes [3], through which the air passes (Fig. 1.).

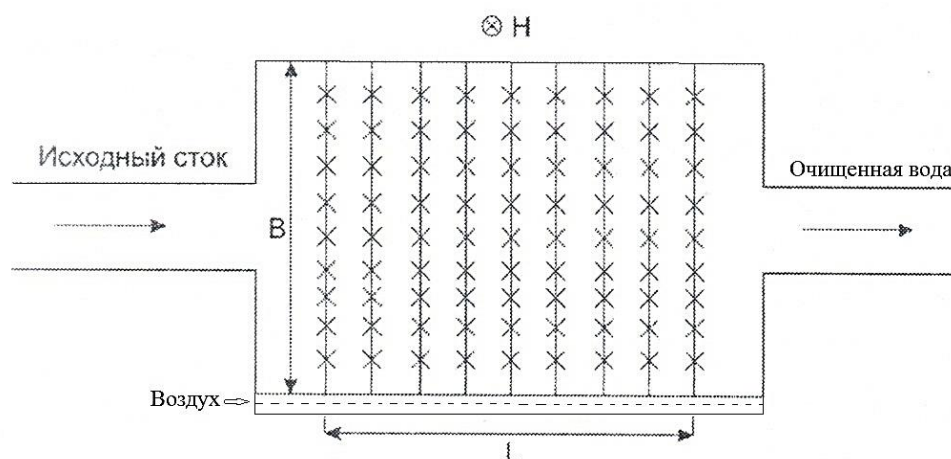


Рис. 1. Конструкция камеры с волосяными ершами и аэрационными трубами для очистки жидких потоков

Fig. 1. The design of the camera with hair brushes and aeration pipes for liquid flow cleaning

**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 [4,5].

Размер жидкого кубика определяется исходя из того, что в данный момент с одним волосом ерша реагирует один жидкий кубик [6]. Поэтому объем элементарного жидкого кубика равен всему объему устройства, деленному на число волос в устройстве.

**Wastewater treatment with brushes.** Processes in bioreactors are very complex. To apply the methods of mathematical analysis, we developed the following simplified physical model: all the liquid in the channel is divided into elementary liquid cubes, which while moving along the corridor of the bioreactor interact with hair brushes and air bubbles, resulting in the removal of impurities [4,5].

The size of a liquid cube is determined on the basis that every moment one liquid cube interacts with a single hair brush [6]. Therefore, the volume of a liquid cube is equal to the entire volume of the device divided by the number of

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

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:

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

Введем понятие средней плотности волос в устройстве

$$k_1 = \frac{N_{01}}{HBL}, \quad (3)$$

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

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

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

$$l = L \left( 1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}} \right) \quad (2)$$

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 жидкости прочерченной волосом в единичном жидком кубике при однократном его проходе через волос [7]

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

где  $a$  — длина ребра жидкого кубика, м;  $b$  —

hairs in the device.

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

where  $N_{01}$  is the total number of hairs in the whole volume of the bioreactor;  $H$  — the height of the corridor of the bioreactor, m;  $B$  — the width of the corridor, m;  $L$  — the length of the corridor, m.

Formula (1) is obtained under the assumption that the distribution of hair in the bioreactor is uniform.

The edge length of the liquid cube is equal to

$$a = \left( \frac{HBL}{N_{01}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (4)$$

Let's introduce the concept of average hair density in the device

$$k_1 = \frac{N_{01}}{HBL}, \quad (3)$$

then the formula (2) taking into account (3) takes the form

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

The trajectory of the air cube is determined by the dimensions of the cleaning chamber, the transverse  $V_{\perp}$  and longitudinal  $V_{\parallel}$  components of the speed of liquid flow. The average value of the length  $l$  of the trajectory of a liquid cube in the cleaning chamber for two currents is universal and is determined by the formula:

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

From the description of the brushes, it is clear that the diameter of the hair is much less than its length and therefore does not account for the influence on the cleaning effect. As hair in the brushes is arranged fanwise around the circumference, we introduce the average effective area of the liquid touched by a hair in a single liquid cube after a single passage through this hair [7]

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

where  $a$  is the edge length of the liquid cube, m;

длина волоса ерша;  $\alpha$  — угол между волосом и ребром кубика, изменяющийся от 0 до  $\frac{\pi}{2}$ .

Среднее значение синуса будет равно

$$\overline{\sin \alpha} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi}. \quad (3)$$

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  $\sigma_x$  — толщина эффективного пограничного слоя жидкости успевшей прореагировать с волосом ерша, м.

При этом происходит выделение примеси содержащейся в жидкости. Масса выделившейся примеси 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  $\rho_0$  — первоначальная плотность примесей в жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

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  $\sigma_x$  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

$b$  is the length of the hair;  $\alpha$  — the angle between the hair and the edge of the cube, varying from 0 to  $\frac{\pi}{2}$ .

The average value of the sine is equal to

$$\overline{\sin \alpha} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi}. \quad (6)$$

Considering (7) in (6), we obtain

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

The volume of fluid interacted with the hair in a single pass of the liquid cube, is equal to

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

where  $\sigma_x$  is the thickness of the effective boundary layer of the fluid which had enough time to interact with the hair, m.

In this case the impurities contained in the liquid are separated from it. The mass of the separated impurities in case of single passage of the liquid cube through the first hair is equal to

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

where  $\rho_0$  — the initial density of impurities in the liquid, kg/m<sup>3</sup>.

The absolute change in the density of impurities in the liquid cube will be

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

The relative change of the impurity density at a single passage through the hair is

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

Assuming that the thickness  $\sigma_x$  of the effective fluid layer, interacting with the hair, does not depend on the liquid cube passage number, it can be shown that

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

or

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

Expressing the relative change of the

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 биореакторе 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 скорости движения жидкости.

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

Масса выделившейся примеси при однократном пересечении пузырьком воздуха жидкого кубика равна [8]

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

где  $\delta_2$  — диаметр воздушного пузыря, м;  $\delta_z$  — толщина эффективного погранслоя вокруг пузыря, м.

Абсолютное изменение плотности примесей в жидком кубике при одном пересечении составит

impurity density in each passage using the relative change in density to the initial one, we find that

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

where  $n$  is the number of passages of a liquid cube through hair brushes.

To calculate the exponent  $n$ , we calculate the number of hairs that get inside the volume of the liquid tube, the trajectory length of which is equal to  $l$ . Multiplying (5) on the cross-sectional area  $a^2$ , we receive

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

Considering (16) in (15), we find

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

Analyzing this formula we can note that the change in the density of impurities in the bioreactor decreases by power law, where the basis is the number less than one, and the indicator includes a dimensionless value, depending on the density of hair in the reactor chamber, the length and the speed of movement of the liquid.

**Purification by aeration.** Also in this case, the liquid is saturated with oxygen to maintain life of bacteria colonies on hair brushes and aeration. At the passage of an air bubble through an elementary liquid cube at the thickness of the boundary layer the oxidation of the impurities in liquid around the bubble occurs, which promotes their sedimentation.

The mass of the separated impurities in case of a single passage of an air bubble through a liquid cube is equal to [8]

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

where  $\delta_2$  — the diameter of the air bubble, m;  $\delta_z$  — the thickness of the effective boundary layer around the bubble, m.

The absolute change in the density of impurities in the liquid cube at one passage will be

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

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

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

**Совместное влияние процеживания и аэрации.** В современных биореакторах процессы процеживания и аэрации идут одновременно, поэтому формулы (17) и (23) необходимо объединить в одну. Рассмотрим процессы, идущие не одновременно, а последовательно. При таком подходе все главные факторы учитываются, но влияние одного явления на другое не учитывается [9].

Перепишем формулы (15) и (23) в виде

$$\rho_n = \rho_0(1 - E_0)^n, \quad (24)$$

$$\rho_m = \rho_n(1 - E_{02})^m. \quad (25)$$

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

The relative change in the density of impurities in the liquid cube at one passage will be

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

Having carried out the calculations similar to those which were done for brushes by the formulas (11)-(15) we get

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

where  $m$  is the number of crossings of a liquid cube by air bubbles.

Continuing this analogy, like the formula (16) for hair brushes, we calculate the exponent

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

where  $k_2$  is the average density of bubbles per volume unit,  $k_2 = \frac{N_{02}}{HBL}$ .

Taking into account formulas (22) the expression (21) will take the form of

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

### The joint effect of straining and aeration.

In modern bioreactors the processes of filtration and aeration go simultaneously, therefore the formulas (17) and (23) must be combined into one. Let us consider the processes which take place not simultaneously, but sequentially. At this all the key factors are taken into account, but the influence of one phenomenon on another is not taken into account [9].

We rewrite the formulas (15) and (23) in the form

$$\rho_n = \rho_0(1 - E_0)^n, \quad (24)$$

$$\rho_m = \rho_n(1 - E_{02})^m. \quad (25)$$

После процеживания сквозь волосяные ерши жидкость с плотностью примеси  $\rho_n$  поступает на аэрацию.

$$\rho_m = \rho_0(1-E_0)^n(1-E_{02})^m. \quad (26)$$

Учитывая  $n$  и  $m$ , запишем окончательную формулу.

$$\rho_m = \rho_0(1-E_0)^{Lk_1^{1/3}(1+\frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}})}(1-E_{02})^{L\frac{k_2}{2/3}(1+\frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}})}. \quad (27)$$

Формула (27) 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.

**Численные примеры расчетов реальных устройств.** По формулам (17) и (23) выполнены численные расчеты зависимости относительной плотности примесей в потоке от средней плотности волос и плотности пузырей (Рис. 2 и 3). 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 жидком кубике при однократном пересечении  $E_{01} = E_{02} = 0.01$ , начальной плотности примесей  $\rho_0 = 5$  кг/м<sup>3</sup>.

After straining through hair brushes liquid with a density of impurities SI  $\rho_n$  is supplied to aeration.

$$\rho_m = \rho_0(1-E_0)^n(1-E_{02})^m. \quad (26)$$

Taking into account  $n$  and  $m$ , we write down the final formula.

$$\rho_m = \rho_0(1-E_0)^{Lk_1^{1/3}(1+\frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}})}(1-E_{02})^{L\frac{k_2}{2/3}(1+\frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}})}. \quad (27)$$

Formula (27) represents the product of two exponential functions, in which the bases are numbers less than one, and exponents are greater than one. Analyzing this expression we can say that the rate of the impurity decrease strongly affects the number of hairs per volume unit and the density of air bubbles.

**Numerical examples of real devices calculations.** According to the formulas (17) and (23) the dependences of the relative density of impurities in the flow on the average hair density and the density of bubbles are calculated (Fig. 2 and 3). Let's consider the treatment facility as a channel of  $L=10;15;20$  m length of rectangular cross section with the breadth of  $B = 3$  m, the height of  $H = 2$  m, the number of hairs  $N_{01} = 10^6$ , the ratio of the velocities of longitudinal and transverse flow  $V_{\perp}/V_{\parallel} = 0.1$ , the relative variation of the impurity density in the liquid cube with a single passage  $E_{01} = E_{02} = 0.01$ , the initial density of impurities  $\rho_0 = 5$  kg/m<sup>3</sup>.

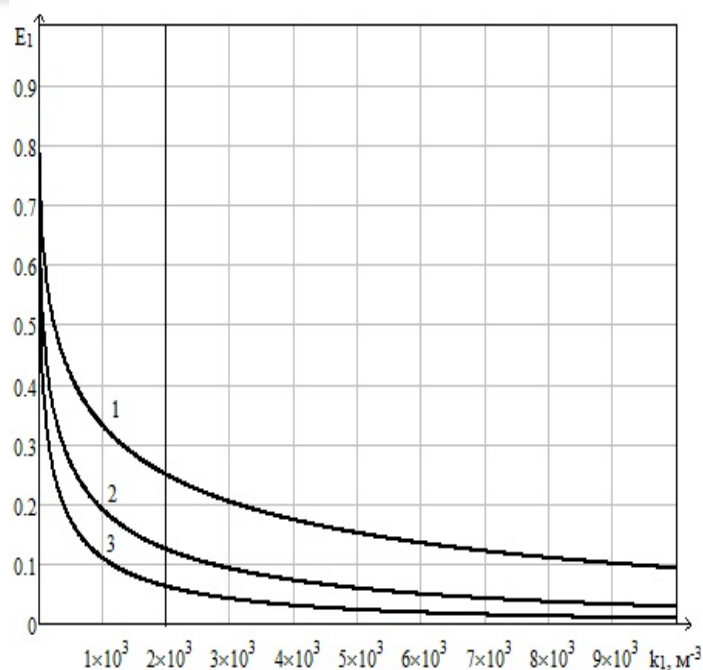


Рис. 2. Зависимость относительной концентрации примесей от плотности волос: 1 —  $L = 10$  м; 2 —  $L = 15$  м; 3 —  $L = 20$  м.

Fig. 2. The dependence of the relative concentration of impurities on hair density: 1 —  $L = 10$  m; 2 —  $L = 15$  m; 3 —  $L = 20$  m

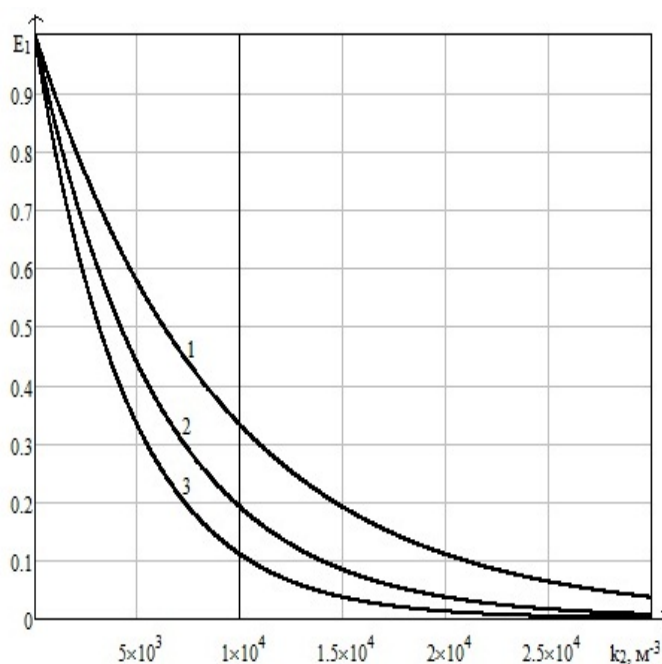


Рис. 3. Зависимость относительной концентрации примесей от плотности пузырей: 1 —  $L = 10$  м; 2 —  $L = 15$  м; 3 —  $L = 20$  м

Fig. 3. The dependence of the relative concentration of impurities on bubbles density: 1 —  $L = 10$  m; 2 —  $L = 15$  m; 3 —  $L = 20$  m

Из рисунка 2 видно, что степень очистки зависит от объема камеры при заданной плотности волос. При средней плотности волос  $k_1 = 2 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$  количество извлеченной примеси будет больше в очистном сооружении длиной 20 м, чем в остальных. Для достижения

Figure 2 shows that the degree of purification depends on the volume of the chamber at the given hair density. At the average hair density  $k_1 = 2 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$  the amount of the extracted impurities will be more in the cleaning facility with a length of 20 m, than in

аналогичных результатов в конструкциях меньшей длины необходимо увеличить плотность волос.

#### **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 [10]

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (28)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $v$  — скорость течения жидкости,  $\text{м/с}$ ;  $S$  — площадь вертикального поперечного сечения гирлянды с ершами,  $\text{м}^2$ ;  $C_x$  — коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса, определяемого по формуле

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}. \quad (29)$$

Здесь  $d$  — диаметр гирлянды с ершами,  $\text{м}$ ;  $\nu$  — 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:

the other. To achieve the same results in constructions of smaller length it is necessary to increase hair density.

#### **Hydrodynamic resistance consideration.**

When the liquid passes through the frame with brushes the inhibition of the fluid due to the friction on the brushes occurs, and the speeds  $V_{\perp}$  and  $V_{\parallel}$  are reduced and the cleaning process slows down. Due to the aeration pipes laid along the bottom of the channel, there is bubbling effect which preserves the transverse component of velocity. And in order to compensate the decrease of the longitudinal velocity it is necessary to make a camera with a tilt.

To calculate the hydrodynamic resistance of brushes, let's consider the following physical model of the interaction of the fluid with the sets of brushes: the entire liquid flow can be divided into rectangular parallelepipeds which height equals the length of the set. On the interaction example of one such parallelepiped with a set of brushes let's count the loss value of the translational motion of the flow.

Let's define the head resistance of a set of brushes by the formula [10]

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (28)$$

where  $\rho$  is the fluid density,  $\text{kg/m}^3$ ;  $v$  — velocity of the fluid flow,  $\text{m/s}$ ;  $S$  — area of the vertical cross section of a set of brushes,  $\text{m}^2$ ;  $C_x$  — resistance coefficient which depends on the Reynolds number, defined by the formula

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu}. \quad (29)$$

Here  $d$  is the diameter of the set of brushes,  $\text{m}$ ;  $\nu$  is the kinematic viscosity of the medium,  $\text{m}^2/\text{s}$ .

The elevation difference of the camera on the entrance and exit we define as the difference of potential energy at entrance and exit and the magnitude of energy losses due to friction of the fluid stream on brush hair:

$$\rho a^2 b g h = C_x \frac{\rho v^2}{2} a^2 b, \quad (30)$$

где  $a = 2b$  — представляет собой сторону прямоугольного параллелепипеда, пересекающего гирлянду с ершами, м;  $b$  — длина гирлянды, м;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  — перепад высот, м.

Из формулы (30) получим для высоты перепада, компенсирующей гидродинамические потери выражение

$$h = C_x \frac{v^2}{2g}. \quad (31)$$

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

$$\rho a^2 b g h = C_x \frac{\rho v^2}{2} a^2 b, \quad (30)$$

where  $a = 2b$  is a side of a rectangular parallelepiped that intersects the set of brushes, m;  $b$  — the length of the set, m;  $g$  — gravitational acceleration, m/s<sup>2</sup>;  $h$  — elevation difference, m.

From the formula (30) we get the expression for the height difference, which compensates the hydrodynamic loss

$$h = C_x \frac{v^2}{2g}. \quad (31)$$

The values of the height difference and tilting angles of the camera for different flow rates values when the distance between frames is  $l = 0.08$  m are given in table 1. The value  $H$  is the tilt height of the chamber bottom of the reactor at  $L = 10$  m.

Таблица 1

Table 1

Значение высоты перепада и углов наклона камеры  
*The value of the height difference and tilt angles of the camera*

| №<br>п/п | $v$ , м/с           | Re    | $C_x$ | $h$ , м              | $\alpha$ , ° | $h/l$   | $H$ , 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 сопротивление опустить нельзя [3].

**Учет залипания 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

At low fluid flow velocities brushes have small resistance and it can be ignored, but at velocities larger than 0.2 m/s the resistance cannot be omitted [3].

**Brushes sticking consideration.** When a brush hair passes through a liquid cube part of the solid impurities in it settle on hair. Let's assume that the hair flow of liquid is laminar

тонкий слой жидкости с эффективной толщиной  $\Delta a_0$ . Будем считать, что вся твердая примесь, находящаяся в слое, налипает на волос. Ее масса в тонком слое равна

$$m_0 = \Delta a_0 S_0 \rho_0. \quad (32)$$

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

$$S_0 = \frac{4ab_0}{\pi}. \quad (33)$$

Объем осевшей примеси равен

$$\Delta V_0 = \frac{m_0}{\rho_T}, \quad (34)$$

где  $\rho_T$  — плотность примеси в твердом состоянии,  $\text{кг/м}^3$ .

При пересечении волосом  $n$ -ого жидкого кубика выделившаяся масса будет равна

$$M = nm_0. \quad (35)$$

А ее объем

$$V_n = \frac{M}{\rho_T} = \frac{n\Delta a_0 S_0 \rho_0}{\rho_T}. \quad (36)$$

Выразим объем чистого волоса через геометрические размеры в виде объема цилиндра

$$V_0 = \frac{\pi \beta_0^2}{4} b_0, \quad (37)$$

где  $\beta_0$  — диаметр чистого волоса, м;  $b_0$  — длина чистого волоса, м.

Тогда объем загрязненного волоса будет равен

$$V_n = \frac{\pi \beta_n^2}{4} b_n, \quad (38)$$

где

$$\beta_n = \beta_0 + 2\Delta\beta_n, \quad (39)$$

$$b_n = b_0 + \Delta b_n. \quad (40)$$

Здесь  $\Delta\beta_0$  — толщина слоя примеси, м.

Предположим, что толщина слоя примеси, осевшей на волос, везде одинакова. Тогда полный объем грязного волоса определяется по формуле (38).

Учтем (39) и (40) в (38), получим

then the hair will interact with a thin liquid layer with an effective thickness of  $\Delta a_0$ . We assume that all the solid impurities in the layer stick to the hair. Its mass in a thin layer is then

$$m_0 = \Delta a_0 S_0 \rho_0. \quad (32)$$

Here, the average area cut by a hair in the liquid cube,  $S_0$  is determined by the formula

$$S_0 = \frac{4ab_0}{\pi}. \quad (33)$$

The amount of settled impurities is equal to

$$\Delta V_0 = \frac{m_0}{\rho_T}, \quad (34)$$

where  $\rho_T$  — the density of impurities in the solid state,  $\text{kg/m}^3$ .

At the intersection of a hair of the  $n^{\text{th}}$  liquid cube the released mass will be equal to

$$M = nm_0. \quad (35)$$

And its volume

$$V_n = \frac{M}{\rho_T} = \frac{n\Delta a_0 S_0 \rho_0}{\rho_T}. \quad (36)$$

Let's express the volume of a clean hair using the geometric dimensions in the form of a cylinder volume

$$V_0 = \frac{\pi \beta_0^2}{4} b_0, \quad (37)$$

where  $\beta_0$  is the diameter of a clean hair, m;  $b_0$  — the length of a clean hair, m.

Then the volume of a contaminated hair will be equal to

$$V_n = \frac{\pi \beta_n^2}{4} b_n, \quad (38)$$

where

$$\beta_n = \beta_0 + 2\Delta\beta_n, \quad (39)$$

$$b_n = b_0 + \Delta b_n. \quad (40)$$

Here  $\Delta\beta_0$  — the thickness of the layer of impurities, m.

Let's assume that the thickness of the layer of impurities on the hair is the same everywhere. Then the total volume of the dirty hair is determined by the formula (38).

Let's consider (39) and (40) into (38), and obtain

$$\frac{\pi}{4}(\beta_0 + 2\Delta\beta_n)^2(b_0 + \Delta\beta_n) = V_n. \quad (41)$$

Выполнив математические преобразования и учитывая (36) и (37), получим

$$\Delta\beta_n^3 + \Delta\beta_n^2(\beta_0 + \frac{b_0}{2}) + \Delta\beta_n \frac{\beta_0}{4}(\beta_0 + 2b_0) = \frac{nS_0\rho_0}{2\pi\rho_T} \Delta a_0. \quad (43)$$

Вводя новые обозначения в (43), получим

$$G = n\alpha, \quad (44)$$

где

$$\alpha = \frac{S_0\rho_0}{2\pi\rho_T} \Delta a_0. \quad (45)$$

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

$$n = \frac{t_{зал}}{t_{1куб}}, \quad (46)$$

где

$$t_{1куб} = \frac{a}{v_{cp}}. \quad (47)$$

Здесь  $v_{cp}$  — средняя скорость движения жидкого потока, м/с:

$$v_{cp} = \sqrt{v_{||}^2 + v_{\perp}^2}. \quad (48)$$

Преобразуем выражение (46), учитывая (47) и (48), получим

$$n = \frac{t_{зал}}{n} \sqrt{v_{||}^2 + v_{\perp}^2}. \quad (49)$$

Из формул (49) и (44) имеем

$$t_{зал} = \frac{G}{\alpha} * \frac{a}{\sqrt{v_{||}^2 + v_{\perp}^2}}. \quad (50)$$

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

$$\frac{\pi}{4}(\beta_0 + 2\Delta\beta_n)^2(b_0 + \Delta\beta_n) = V_n. \quad (41)$$

Having done the math and taken into account (36) and (37), we obtain

$$\Delta\beta_n^3 + \Delta\beta_n^2(\beta_0 + \frac{b_0}{2}) + \Delta\beta_n \frac{\beta_0}{4}(\beta_0 + 2b_0) = \frac{nS_0\rho_0}{2\pi\rho_T} \Delta a_0. \quad (43)$$

Introducing the new notation in (43), we obtain

$$G = n\alpha, \quad (44)$$

where

$$\alpha = \frac{S_0\rho_0}{2\pi\rho_T} \Delta a_0. \quad (45)$$

Let's express  $n$ -number of liquid cubes, crossing this hair, through the sticking time  $t_{зал}$  and the crossing time of one cube by a brush hair  $t_{1куб}$ .

$$n = \frac{t_{зал}}{t_{1куб}}, \quad (46)$$

where

$$t_{1куб} = \frac{a}{v_{cp}}. \quad (47)$$

Here  $v_{cp}$  is the average speed of liquid flow, m/s:

$$v_{cp} = \sqrt{v_{||}^2 + v_{\perp}^2}. \quad (48)$$

If we convert the expression (46), taking into account (47) and (48), we get

$$n = \frac{t_{зал}}{n} \sqrt{v_{||}^2 + v_{\perp}^2}. \quad (49)$$

From formulas (49) and (44) we have

$$t_{зал} = \frac{G}{\alpha} * \frac{a}{\sqrt{v_{||}^2 + v_{\perp}^2}}. \quad (50)$$

Let's perform a numerical calculation of the time of full sticking of brushes hair with the following flow and brushes parameters:  $\Delta a_0 = 10^{-5}$  m,  $\rho_0 = 10$  kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_T = 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,  $\Delta\beta_{пред} = 10^{-3}$  m,  $\Delta\beta_0 = 2,5 \cdot 10^{-4}$  m,  $b_0 = 8 \cdot 10^{-5}$  m,  $a = 1,3 \cdot 10^{-2}$  m при  $k_I = 0,5 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>,  $V_I = V_{\perp} = 6 \cdot 10^{-3}$  м/с. The results are shown in figure 4.

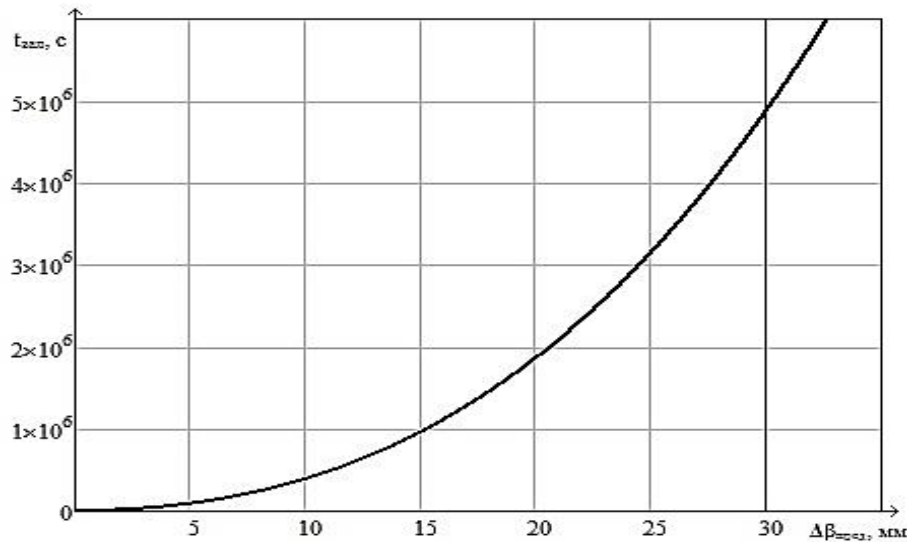


Рис. 4. Зависимость срока службы фильтра от толщины слоя примеси

Fig. 4. The dependence of filter lifetime on thickness of the impurity layer

Из графика следует, что нарастание примеси на волосах ерша представлено параболической кривой, по которой можно рассчитать срок службы фильтра. 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 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

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = (1 - E_0)^{\left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right) \int_0^x r_1(x) dx}, \quad (51)$$

где  $\frac{\rho_x}{\rho_0}$  — степень относительного загрязнения на координате  $x$ ;  $r_1(x)$  — безразмерная плотность волос вдоль координаты  $x$ .

Выделим в формуле (51) величины, не зависящие от  $x$  и обозначим их в виде

$$G = (1 - E_0)^{\left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)}, \quad (52)$$

From this it follows that the buildup of impurities on brushes hair is presented as a parabolic curve, using which one can calculate a filter lifetime. If the distance between the brushes is about 0.03 m, then the buildup process will take about 1.5 months.

**Rational location of frames with hair brushes in chamber for wastewater treatment.** When hair density in the device is the same throughout the volume, more impurities settle on the first frame. To ensure uniform loading throughout the volume of the chamber we assume that the density of hair depends on the length of the channel  $x$ . If on the  $x$ -coordinate the hair density equals  $r_1(x)$ , then on the entire section of the path from 0 to  $x$  the number of hairs will equal the integral of  $r_1(x)$ . Then the formula (17), takes the form

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = (1 - E_0)^{\left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right) \int_0^x r_1(x) dx}, \quad (51)$$

where  $\frac{\rho_x}{\rho_0}$  the degree of relative contamination on the  $x$  coordinate;  $r_1(x)$  — dimensionless density of hair along the coordinate  $x$ .

Let's take in the formula (51) the values that do not depend on  $x$  and write them down in the form

$$G = (1 - E_0)^{\left(1 + \frac{V_{\perp}}{V_{\parallel}}\right)}, \quad (52)$$

тогда выражение (51) примет вид

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = G^{\int_0^x r_1(x) dx}. \quad (53)$$

Так как равномерная нагрузка представляется линейной зависимостью, то

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = 1 - \beta x, \quad (54)$$

Учитывая (54) в (53)

$$1 - \beta x = G^{\int_0^x r_1(x) dx}. \quad (55)$$

Прологарифмировав и продифференцировав, получим

$$\frac{1}{1 - \beta x} (-\beta) = \ln G * r_1(x). \quad (56)$$

Выразим  $r_1(x)$  из (56)

$$r_1(x) = -\frac{\beta}{(1 - \beta x) \ln G}. \quad (57)$$

Выполнены (57) 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/м<sup>3</sup>, отношением скоростей продольного и поперечного течения жидкости  $V_{\perp}/V_{\parallel} = 0,1$ .

Рисунок 5 показывает, как должна увеличиваться плотность ершей при увеличении длины.

then the expression (51) takes the form

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = G^{\int_0^x r_1(x) dx}. \quad (53)$$

Since the uniform load is represented by a linear dependence, then

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = 1 - \beta x, \quad (54)$$

Taking into consideration (54) in (53)

$$1 - \beta x = G^{\int_0^x r_1(x) dx}. \quad (55)$$

Having taken the logarithm and differentiated, we get

$$\frac{1}{1 - \beta x} (-\beta) = \ln G * r_1(x). \quad (56)$$

Let's express  $r_1(x)$  from (56)

$$r_1(x) = -\frac{\beta}{(1 - \beta x) \ln G}. \quad (57)$$

We have performed (57) the numerical calculations of the dependence of hair density increase along the length. Let's consider a treatment facility in the form of a rectangular channel of width  $B = 3$  m, height  $H = 2$  m with an initial impurity density of  $\rho_0 = 5$  kg/m<sup>3</sup>, the ratio of the velocities of longitudinal and transverse flow  $V_{\perp}/V_{\parallel} = 0,1$ .

Figure 5 shows how the brushes density should increase with the increasing length.

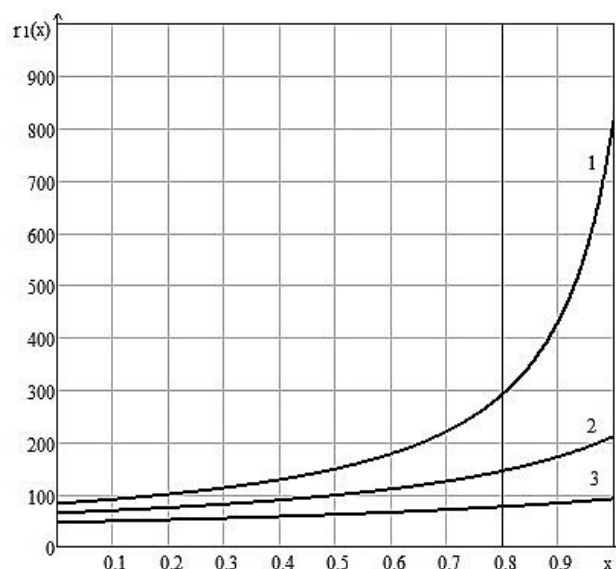


Рис. 5. Зависимость увеличения плотности волос по длине канала:

1 —  $\beta = 0,9$ ; 2 —  $\beta = 0,7$ ; 3 —  $\beta = 0,5$

Fig. 5. The dependence of hair density increase along the length of the channel:

1 —  $\beta = 0.9$ ; 2 —  $\beta = 0.7$ ; 3 —  $\beta = 0.5$

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.

**Пример расчета очистных камер с учетом вышеприведенных процессов.** Для расчета параметров очистных сооружений возьмем жидкость с начальной концентрацией примеси  $\rho_0 = 10 \text{ кг/м}^3$  и пропустим ее через очистное сооружение длиной  $L = 5 \text{ м}$  и высотой  $H = 2 \text{ м}$  и объемным расходом сточных вод  $Q = 172,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Также учтем, что длина волоса ерша  $b = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , продольная скорость течения  $V_{\parallel} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ , а поперечная  $V_{\perp} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ , толщина эффективного погранслоя жидкости, прореагировавшей с волосом ерша  $\Delta a_0 = 10^{-5} \text{ м}$ , диаметр воздушного пузыря  $\delta_2 = 10^{-3} \text{ м}$ , толщина эффективного погранслоя вокруг пузыря  $\delta_z = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , плотность воздушных пузырей  $k_2 = 10^3 \text{ м}^{-3}$ , площадь поперечного сечения гирлянды с ершами  $S = 0,16 \text{ м}^2$ , плотность примеси в твердом состоянии  $\rho_T = 10 \text{ кг/м}^3$ .

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

$$B = \frac{(1,3 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 10^7}{10} \approx 2,2 \text{ м}, \quad (58)$$

тогда получим, что средняя плотность волос  $k_1$  по формуле (3)

$$k_1 = \frac{10^7}{22} \approx 4,5 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}. \quad (59)$$

Найдем уклон камеры  $h$  по формуле (31). Для этого подсчитаем число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{0,16 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 1275. \quad (60)$$

Из рисунка в [10] следует, что для данного числа Рейнольдса коэффициент сопротивления  $C_x = 1$ .

So, for the channel, which length is twice the height, the brushes density remained virtually unchanged throughout the volume. In other cases it is significantly increased at the end of the treatment facility.

**The example of calculation of treatment chambers based on the above mentioned processes.** For calculation of treatment plants parameters let's take a liquid with initial impurity concentration  $\rho_0 = 10 \text{ kg/m}^3$  and pass it through the treatment plant of length  $L = 5 \text{ m}$  and height  $H = 2 \text{ m}$  and with the wastewater volume flow of  $Q = 172.8 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Also let's take into account that the length of a brush hair  $b = 8 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ , the longitudinal flow velocity  $V_{\parallel} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ , and the transverse one  $V_{\perp} = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ , the thickness of the effective liquid boundary layer interacted with the brush hair  $\Delta a_0 = 10^{-5} \text{ m}$ , the diameter of an air bubble  $\delta_2 = 10^{-3} \text{ m}$ , the thickness of the effective boundary layer around the bubble  $\delta_z = 2.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ , density of air bubbles  $k_2 = 10^3 \text{ m}^{-3}$ , the cross-sectional area of the set of brushes  $S = 0.16 \text{ m}^2$ , the density of the impurity in the solid state  $\rho_T = 10 \text{ kg/m}^3$ .

Let's find the width of channel  $B$ , using the formula (2), on the basis that the edge length of the cube of liquid is equal  $a = 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ , and the total number of hairs in the whole volume of bioreactor  $N_{01} = 10^7$ .

$$B = \frac{(1,3 \cdot 10^{-2})^3 \cdot 10^7}{10} \approx 2,2 \text{ м}, \quad (58)$$

then we get, that the average hair density  $k^1$  is according to the formula (3)

$$k_1 = \frac{10^7}{22} \approx 4,5 \cdot 10^5 \text{ м}^{-3}. \quad (59)$$

Let's find the chamber inclination  $h$  by the formula (31). To do this, we calculate the Reynolds number

$$\text{Re} = \frac{0,16 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 1275. \quad (60)$$

From the figure in [10] it follows that for a given Reynolds number the resistance coefficient  $C_x = 1$

$$h = 1 \frac{(8 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 9.8} \approx 3.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

(61)

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

Рассчитаем время залипания ершей  $t_{зал}$  по формуле (50). Предположим, что предельно возможна толщина налипшей примеси  $\Delta\beta_{пред} = 3 \cdot 10^{-2}$  м, а диаметр чистого волоса  $\Delta\beta_0 = 2,5 \cdot 10^{-4}$  м.

$$G = 0.03^3 + 0.03^2 \cdot 0.04025 + 0.03 \cdot 1.002 \cdot 10^{-5} \approx 6.35 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3, \quad (62)$$

$$\alpha = \frac{0.416 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi^2 \cdot 10^{-3}} \approx 2.107 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3, \quad (63)$$

$$t_{зал} = \frac{6.35 \cdot 10^{-5}}{2.107 \cdot 10^{-11}} \cdot \frac{1.3 \cdot 10^{-2}}{\sqrt{0.008^2 + 0.0008^2}} \approx 4.9 \cdot 10^6 \text{ с}. \quad (64)$$

Время залипания при таких условиях около 1,5 месяца.

**Выводы.** В работе установлены и рассмотрены главные факторы, влияющие на процесс очистки жидкой среды волосяными ершами и аэрацией. Вычислены для заданной степени очистки необходимый угол наклона камеры для преодоления гидродинамического сопротивления и время залипания ершей. Учтены все вышеперечисленные факторы при расчете реальных устройств. Приведен численный пример расчета определенного очистного сооружения.

#### Библиографический список

1. Куликов, Н. И. Теоретические основы очистки воды / Н. И. Куликов, А. Я. Найманов, Н. П. Омельченко. — Макеевка. — 1999. — 8 с.
2. Устройство для очистки воды / Н. И. Куликов, Н. П. Омельченко, В. Р. Пудвил. — А.С. 1450173 СССР, СКИ, ВО1Д 29/08, 35/10. — Опубликовано в БИ. — 1989. — №48.
3. 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. —

Under these parameters, the resistance of brushes is negligible and can be ignored.

Let's find the brushes sticking time  $t_{зал}$  by the formula (50). We assume that the maximum possible thickness of the adhered impurities  $\Delta\beta_{пред} = 3 \cdot 10^{-2}$  m and the diameter of a clean hair  $\Delta\beta_0 = 2,5 \cdot 10^{-4}$  m.

The sticking time under such conditions is about 1.5 months.

**Conclusion.** In the work the main factors have been stated and considered which influence the purification process of liquid medium by hair brushes and aeration. For a given degree of purification the desired angle of camera inclination to overcome the hydrodynamic resistance and brushes sticking time were calculated. All the above mentioned factors were taken into account in real devices calculation. Numerical example of calculation of a specific treatment plant is provided.

#### References:

1. Kulikov, N.I., Naymanov, A.Y., Omelchenko N.P. Teoreticheskie osnovy ochistki vody. [Theoretical basics of water cleaning.] Makeevka, 1999, p. 8 (in Russian).
2. Kulikov, N.I., Omelchenko, N.P., Pudvil, V.R. Ustroystvo dlya ochistki vody. [A device for water cleaning] AS 1450173 USSR, SKI, VO1D 29/08, 35 / 10, published in BI, 1989, №48 (in Russian).
3. Nedopekin, F.V., Dremov, V.V., Kulikov N.I. Raschet gidrodinamicheskogo soprotivleniya volosyanykh ershey zhidkomu potoku. [Calculation of hydrodynamic resistance of hair brushes to liquid stream.] Vesntik Donetskogo natsional'nogo universiteta, ser. A., Prirodnye nauki, no.2,

2013. — №2 — С. 161–163.

4. 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.

5. Дремов, В. В. Расчет эффективного удаления примесей в биореакторах с волосяными ершами / В. В. Дремов, Н. И. Куликов, Ф. В. Недопекин // Вестник национального технического университета «ХПИ». — 2004. — №37. — С. 108–113.

6. Недопекин, Ф. В. Расчет действия аэрации на процесс очистки сточных вод / В. В. Дремов, Н. И. Куликов // Вісник Донецького національного університету. Серія А. Природничі науки. — 2008. — №2. — С. 161–163.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. — Москва : Наука. — 1974. — 712 с.

2013, pp. 161-163 (in Russian).

4. Dremov, V.V., Nedopekin, F.V., Kulikov, N.I. Matematicheskaya model' protsessa ochistki vozdušnogo potoka volosyanyymi ershami. [Mathematical model of cleaning process of airflow by hair brushes.] Matematicheskoe modelirovanie, no.1, 2007, p. 68-70 (in Russian).

5. Dremov, V.V., Kulikov, N.I., Nedopekin F.V. Raschet effektivnogo udaleniya primesey v bioreaktorakh s volosyanyymi ershami. [Calculation of the effective removal of contaminants in bioreactors with hair badgers.] Vestnik natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta "KHPI", 2004, no. 37, pp. 108-113 (in Russian).

6. Nedopekin, F.V., Dremov, V.V., Kulikov, N.I. Raschet deystviya aeratsii na protsess ochistki stochnykh vod. [Calculation of aeration effect on the process of wastewater treatment.] Vesntik Donetskogo natsional'nogo universiteta, ser. A., Prirodnye nauki, no.2, 2008, pp. 161-163 (in Russian).

7. Dremov, V.V., Nedopekin, F.V., Chubar, T.I., Soroka V.A. Matematicheskaya model' protsessa ochistki vozdušnogo potoka kombinirovannym metodom. [Mathematical model of the process of air flow cleaning by a combined method.] Vesntik Donetskogo natsional'nogo universiteta, ser. A., Prirodnye nauki, no.1, 2011, pp. 156-159 (in Russian).

8. Nedopekin, F.V., Dremov, V.V., Kulikov, N.I. Ekologicheskaya problema ochistki stochnykh vod aeratsiey. [The environmental problem of wastewater treatment by aeration.] Vesntik Donetskogo natsional'nogo universiteta, ser. A., Prirodnye nauki, no.2, 2008, pp. 471-473 (in Russian).

9. Dremov, V.V., Nedopekin, F.V., Kulikov, N.I., Chubar, T.I. Matematicheskaya model' yavleniya ochistki stochnykh vod ershami i aeratsiey. [Mathematical model of the phenomenon of wastewater treatment by brushes and aeration.] Vesntik Donetskogo natsional'nogo universiteta, ser. A., Prirodnye nauki, no.2, 2009, pp. 335-337 (in Russian).

10. Shlikhting, G. Teoriya pogranichnogo sloya. [Boundary layer theory.] M.:Nauka, 1974, 712 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 10.03.2017

Сдана в редакцию 10.03.2017

Запланирована в номер 20.05.2017

Received 10.03.2017

Submitted 10.03.2017

Scheduled in the issue 20.05.2017

**Дремов Владимир Владимирович,**

*доктор технических наук, профессор кафедры физики и физического материаловедения Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (Украина, г. Макеевка, ул.Державина, 2)*

**Недопекин Федор Викторович,**

*Доктор технических наук, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха Донецкого национального университета (Украина, г. Донецк, ул. Университетская, 24)*  
[f.nedopekin@gmail.com](mailto:f.nedopekin@gmail.com)

**Куликов Николай Иванович,**

*Доктор технических наук, Профессор кафедры инженерной экологии и управления недвижимостью, Сочинского государственного университета (РФ, г. г. Сочи, ул. Советская, 26а)*  
[Unpc23@mail.ru](mailto:Unpc23@mail.ru)

**Артемова Ирина Александровна,**

*Студентка кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха Донецкого национального университета (Украина, г. Донецк, ул. Университетская, 24)*  
[artyomova\\_i@mail.ru](mailto:artyomova_i@mail.ru)

**Vladimir Vladimirovich Dremov,**

*Doctor of technical sciences, Professor of Physics and Physical Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture (Derzhavin str, 2, Makeyevka, Ukraine)*

**Fedor Viktorovich Nedopekin,**

*Doctor of technical sciences, Professor of the department of physics of non equilibrium processes, metrology and ecology, Donetsk National University (Universitetskaya str., 24, Donetsk, Ukraine)*  
[f.nedopekin@gmail.com](mailto:f.nedopekin@gmail.com)

**Nikolay Ivanovich Kulikov,**

*Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Environmental Engineering and Real Estate Management, Sochi State University. (Sochi, Sovetskaya str., 26a, Russian Federation)*  
[Unpc23@mail.ru](mailto:Unpc23@mail.ru)

**Irina Aleksandrovna Artemova,**

*Student of the department of physics of non equilibrium processes, metrology and ecology, Donetsk National University (Universitetskaya str., 24, Donetsk, Ukraine)*  
[artyomova\\_i@mail.ru](mailto:artyomova_i@mail.ru)