

УДК 628.3

## РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЛОСЯНЫХ ЕРШЕЙ ЖИДКОМУ ПОТОКУ

Ф.В. Недопекин, В.В. Дрёмов\*, Н.И. Куликов\*

\*Донбасская Национальная Академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

В предлагаемой работе, рассматривающей гидродинамические потери жидкого потока, протекающего через камеру с ершами, оценивается величина этих потерь в зависимости от скорости течения и приводится методика расчета угла наклона камеры, компенсирующего эти потери.

*Ключевые слова:* камера очистки, волосяные ерши, гирлянды, жидкий поток, коэффициент сопротивления, наклон камеры.

**Введение.** Использование фильтров из ершей для очистки сточных вод зарекомендовало себя с положительной стороны [1, 2]. Во-первых, ерши осуществляют функцию процеживания сточной воды, задерживая мелкие твердые примеси, а во-вторых ерши удерживают в потоке прикрепленные микроорганизмы, которые перерабатывают вредные примеси в сточных водах, очищая и обеззараживая их. Чтобы процесс очистки сточных вод ершами продолжался достаточно долго нужно предусмотреть очистку ершей от твердых примесей, которые на них насаждаются. Для этого нужно использовать регенерацию поверхности ершей с помощью барботажа воздушными пузырями. Совокупность процессов очистки ершами и аэрацией приведена в [3]. Очистная камера представляет собой прямоугольный канал, поперек которого устанавливаются рамки из уголка с вертикально расположенными гирляндами из ершей. По дну канала проложены воздушные трубы с отверстиями. Под давлением воздух закачивается в трубы и выходит через отверстия в виде пузырьков, которые всплывая перемешивают ее вследствие барботажного эффекта и обеспечивают дополнительную составляющую скорости.

Целью данной работы является теоретический расчет камер очистки сточных вод ершами и вывод соотношений, учитывающих гидродинамическое сопротивление ершей, а также вычисление угла наклона камеры компенсирующего уменьшение скорости потока

**Постановка задачи исследования.** Основными концепциями, используемыми в математической постановке задачи, являются: 1 – разбиение жидкого потока на отдельные кубики с длиной ребра равной длине волоса ерша и предположении, что в данный момент жидкий кубик пересекается только с одним волосом ерша вследствие чего происходит выделение примесей в тонком пограничном слое прилипающим к волосу; 2 – вводится равномерное распределение волос по объему камеры; 3 – диффузия примесей внутри жидкого кубика происходит быстрее, чем происходит процесс очистки; 4 – течение жидкости в канале происходит винтообразно, вследствие наличия двух составляющих скоростей; 5 – не учитывается влияние застойных зон, вследствие перемешивания жидкого потока. В работе [4] описана математическая модель для расчета эффективности очистки сточных вод, протекающих через камеру с ершами и получена формула, позволяющая оценивать степень очистки при различном расположении рамок с ершами. В формулу входят параметры гирлянд из ершей и скорость жидкого потока:

$$\rho_n = \rho_0 (1 - E_{01})^n, \quad (1)$$

где  $E_{01}$  – относительное уменьшение примеси в жидком кубике при однократном пересечении волоса ерша;  $n$  – число пересечений жидкого кубика с волосами ершей при проходе через всю камеру очистки;  $\rho_0$  – первоначальная плотность примесей в воде;  $\rho_n$  – конечная плотность примесей, остающаяся в воде на выходе из камеры очистки. Показатель  $n$  в формуле (1) определяется через длину камеры очистки  $L$ , плотность ершей  $K_1$  и скоростей потока поперечной  $v_{\perp}$  и продольной  $v_{\parallel}$ :

$$n = L K_1^{\frac{1}{3}} \left( 1 + \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} \right). \quad (2)$$

Приведенные формулы (1), (2) позволяют проектировать очистные сооружения на заранее заданную степень очистки. Если учитывать влияние на очистку потока и аэрации, то следует рассматривать более полную формулу [3]:

$$\rho_m = \rho_0 (1 - E_{01})^n \cdot (1 - E_{02})^m, \quad (3)$$

где  $n$  определяется по формуле (2),  $m$  имеет вид

$$m = L \frac{K_2}{K_1^{2/3}} \left( 1 + \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} \right), \quad (4)$$

где  $K_2$  – плотность воздушных пузырей в жидком потоке;  $E_{02}$  – относительная степень очистки при пересечении воздушным пузырем жидкого кубика.

**Решение задачи.** При прохождении жидкости через гирлянды ершей происходит торможение жидкого потока вследствие трения о волосы ершей, поэтому величины скоростей  $v_{\perp}$  и  $v_{\parallel}$  будут уменьшаться, и процесс очистки будет замедляться. Так как воздушные трубы проложены по всей длине канала, то сохранение поперечной составляющей обеспечивается барботажным эффектом, а продольная составляющая скорости будет уменьшаться. Чтобы компенсировать уменьшение скорости потока при прохождении через камеру с ершами 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. В данном случае предполагается, что с каждой гирляндой взаимодействует один прямоугольный параллелепипед и теряет часть своей энергии. Расстояние между рамками с гирляндами тоже примем равным  $a$ , но можно его брать произвольным, тогда размеры параллелепипеда будут изменяться. Лобовое сопротивление гирлянды с ершами определим по формуле [5]:

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $v$  – скорость течения жидкости;  $S$  – площадь вертикального поперечного сечения гирлянды с ершами;  $C_x$  – коэффициент сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса, определяется по графику, приведенному в [5].

Число Рейнольдса в нашем случае будет таким

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (6)$$

где  $d$  – диаметр гирлянды с ершами;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

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

$$\rho a^2 b g h = C_x \frac{\rho v^2}{2} a^2 b, \quad (7)$$

где  $a = 2d$  – представляет собой сторону прямоугольного параллелепипеда, пересекающего гирлянду с ершами;  $b$  – длина гирлянды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – перепад высот.

Из формулы (7), получим для высоты перепада, компенсирующей гидродинамические потери следующее выражение:

$$h = C_x \frac{v^2}{2g}. \quad (8)$$

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

Таблица 1

№ 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	$0,73 \cdot 10^{-3}$	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

Из табл. 1 видно, что при малых скоростях течения жидкого потока ерши оказывают небольшое сопротивление и его можно не учитывать при расчете камер очистки, но при скоростях больших 0,2 м/с сопротивление ершей потоку становится заметным и его влияние нужно учитывать при строительстве очистных сооружений. Таким образом, помимо формул (1) – (4), рассчитывающих плотность ершей, обеспечивающих заданную степень очистки жидкого потока, нужно учитывать гидродинамические потери при пересечении потоком ершей и компенсировать эти потери соответствующим наклоном камеры (8).

#### РЕЗЮМЕ

У пропонованій роботі, що розглядає гідродинамічні втрати рідкого потоку, що протікає через камеру з йоржами, оцінюється величина цих втрат залежно від швидкості течії і приводиться методика розрахунку кута нахилу камери, що компенсує ці втрати.

*Ключові слова:* камера очищення, волосяні йоржі, гірлянди, рідкий потік, коефіцієнт опору, нахил камери.

#### SUMMARY

In this paper, considering the hydrodynamic losses of liquid flow through the chamber with ershami. Estimated the value of these losses Depending on the flow rate and provides a method of calculating the angle of the camera. Compensating for those losses.

*Keywords:* chamber cleaning, hair ruffs, garlands, a liquid stream, the drag coefficient, tilt the camera.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Куликов Н.И. Теоретические основы очистки воды / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко. – Макеевка: ДГАСА, 1999. – 277 с.
2. А.С.1450173 СССР, СКИ, ВО1Д 29/08, 35/10. Устройство для очистки воды / Н.И. Куликов, Н.П. Омельченко, В.Р. Пудвиль. – Опубликовано в БИ. – 1989. – № 48.
3. Математическая модель явления очистки сточных вод ершами и аэрацией / В.В. Дрёмов, Ф.В. Недопекин, Н.И. Куликов, Т.И. Чубарь // Вісник Донецького нац. ун-ту. Сер. А. Природн. науки– 2009. – № 2. – С. 335-337.
4. Дрёмов В.В. Расчет эффективного удаления примесей в биореакторах с волосяными ершами / В.В. Дрёмов, Н.И. Куликов, Ф.В. Недопекин // Вестник Национального техн. ун-та «ХПИ». – 2004. – № 37. – С. 108-113.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М. Наука, 1974. – 712 с.

*Поступила в редакцию 07.11.2012 г.*