

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА  
И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

## Анализ возможностей фильтрующего рыбозащитного устройства при горизонтальном размещении кассет

УДК 626.882

**П.А. Михеев,**

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости, Российский государственный аграрный университет РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Тимирязевская ул., 49., г. Москва, 127434, Россия  
e-mail: mikheev.pa@gmail.com

**В.П. Боровской**

Канд. техн. наук, доцент кафедры водоснабжения и использования водных ресурсов, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова филиал Донского государственного аграрного университета, ул. Пушкинская, 111, г. Новочеркасск, 346428, Россия  
e-mail: vladimbor@mail.ru;

Статья получена: 18.07.2022. Рассмотрена: 19.09.2022. Одобрена: 20.09.2022. Опубликовано онлайн: 27.09.2022. © РИОР

**Аннотация. Постановка задачи.** В соответствие со сводом правил (СП 101.13330.2012), использование рыбозащитных устройств с фильтрующим экраном и системой промывки распространяется на водозаборные сооружения в различных условиях размещения, в этой связи актуальным является расширение возможностей применения фильтрующих кассет при малых глубинах воды в водисточнике.

**Результаты.** Разработана методика по обоснованию параметров заполнителя горизонтальной

фильтрующей кассеты в виде пластмассовых шариков и их распределения по её длине, а также предварительной оценки равномерности скоростей поступления потока по площади фильтрующей кассеты.

**Выводы.** Для улучшения эксплуатационных характеристик фильтрующего рыбозащитного устройства в условиях малых глубин водоотбора вместо базовой конструкции с вертикальной компоновкой кассеты, рекомендуется фильтрующая кассета с

### ANALYSIS OF THE CAPABILITIES OF THE FILTERING FISH PROTECTION DEVICE WITH HORIZONTAL PLACEMENT OF CASSETTES

**P.A. Mikheev,**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Agricultural Construction and Expertise of Real estate, Russian State Agrarian University RGAU-MSHA named after K.A. Timiryazev1, Timiryazevskaya str., 49., Moscow, 127434, Russia  
e-mail: mikheev.pa@gmail.com

**V.P. Borovskoy**

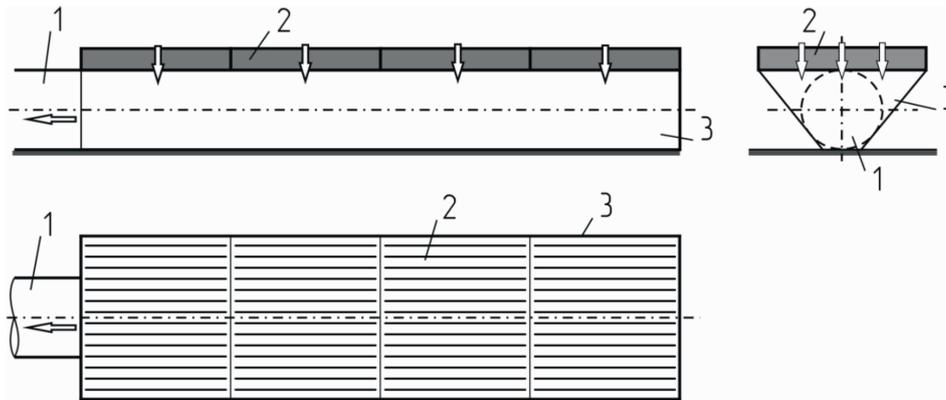
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Use of Water Resources, NovoCherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov –branch of the Don State Agrarian University 2, 111 Pushkinskaya str., NovoCherkassk, 346428, Russia  
e-mail: vladimbor@mail.ru;

**Annotation.** Problem statement. In accordance with the code of rules (SP 101.13330.2012), the use of fish protection devices with a filter screen and a flushing system applies to water intake facilities in various placement conditions, in this regard, it is relevant to expand the possibilities of using filter cassettes at shallow water depths in the water source.

Results. A methodology has been developed to substantiate the filler parameters of a horizontal filter cassette in the form of plastic balls and their distribution along its length, as well as a preliminary assessment of the uniformity of flow rates over the area of the filter cassette.

**Conclusions.** To improve the operational characteristics of the filter fish-protective device in conditions of shallow water sampling depths, instead of the basic design with a vertical cassette layout, a filter cassette with a horizontally positioned water intake surface and a self-washing effect is recommended, in which a filler made of plastic balls (with positive buoyancy) is used and there is free space for their vertical movement. On the basis of hydraulic calculation, a method for preliminary estimation of filtration rates in such a cassette has been developed. To ensure a uniform distribution of the filtration rates of the water flow along the length of the cassette, it is recommended to use balls of different diameters. Evaluation of the working conditions of the cassette allowed us to obtain a pattern of changes in the diameter of the balls along its length, so for a specific example, the calculated diameter of the balls varied from 8 mm, in the suction nozzle, to 40 mm at the end of the cassette. The technique can be used to calculate the parameters of horizontal filter cassettes of fish protection devices.

**Keywords:** fish protection structure, filter cartridge, filler, plastic balls, clogging, reverse current flushing



**Рис. 1.** Схема горизонтальной кассеты фильтрующего рыбозащитного устройства:  
1 – всасывающая труба; 2 – секция фильтрующей кассеты; 3 – водоприёмный короб

горизонтально расположенной водоприёмной поверхностью и эффектом самопромывки, в которой используется наполнитель из пластмассовых шариков (с положительной плавучестью) и имеется свободное пространство для их вертикального перемещения. На основе гидравлического расчёта разработана методика предварительной оценки скоростей фильтрации в такой кассете. Для обеспечения равномерного распределения скоростей фильтрации потока воды по длине кассеты, рекомендуется использовать шарики разного диаметра. Оценка условий работы кассеты позволила получить закономерность изменения диаметра шариков по её длине, так для конкретного примера расчетный диаметр шариков изменялся от 8 мм, в створе всасывающего патрубка, до 40 мм в конце кассеты. Методика может быть использована для расчётного обоснования параметров горизонтальных фильтрующих кассет рыбозащитных устройств.

**Ключевые слова:** рыбозащитное сооружение, фильтрующая кассета, наполнитель, пластмассовые шарики, засорение, промывка обратным током

## Введение

В соответствии со сводом правил СП 101.13330.2012, рыбозащитные устройства на базе фильтрующих кассет с пластмассовыми шариками и системой промывки предназначены для защиты рыб на водозаборах с широким диапазоном забираемых расходов и различных условиях водоотбора, устройства основаны на использовании поведенческого и физического принципов рыбозащиты, эффективны и надежны в экс-

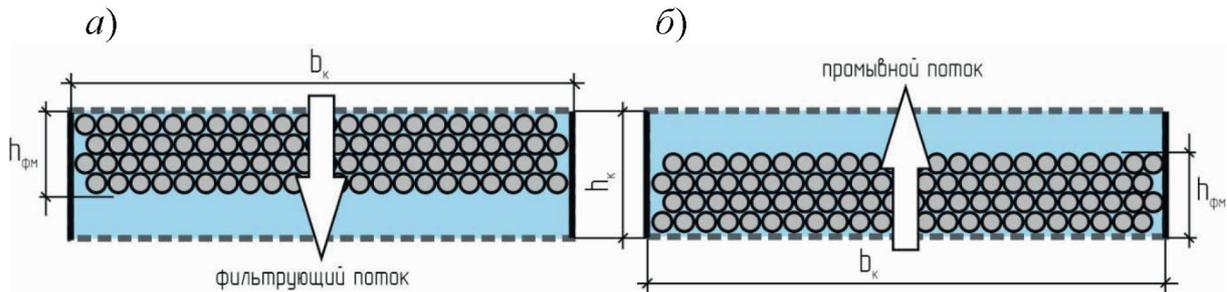
плуатации [1-3]. Традиционно основу конструкций фильтрующих устройств представляют вертикально установленные кассеты с возможностью промывки наполнителя подачей гидравлических или воздушных струй в сочетании с обратным током [4-5]. Наполнитель фильтрующих кассет – пластмассовые шарики, материал который в настоящее время успешно применяется в рыбозащитных устройствах, замещая традиционные – керамзит и щебень [6].

Однако, эффективность фильтрующих рыбозащитных устройств – это не только используемый материал, но и оптимальный выбор параметров, исходя из конструктивных особенностей и конкретных условий водоотбора.

В этой связи перспективным является исследование возможностей использования фильтрующих устройств на водозаборах в условиях малых глубин, когда фильтрующая кассета располагается не вертикально, а горизонтально, при этом возможности промывки наполнителя кассеты отличаются от существующих технических решений [7]. Предметом исследования остается и вопрос о закономерностях распределения скоростей поступления воды по площади фильтрующей кассеты.

1. Принципиальная конструктивно-компоновочная схема фильтрующего рыбозащитного устройства с горизонтальным расположением кассеты, особенности работы наполнителя.

Для предотвращения попадания рыбы в водозабор рассмотрен вариант использования фильтрующего рыбозащитного устройства с кассетами, установленными горизонтально на всасывающем трубопроводе (рис. 1).



**Рис. 2.** Схема состояния фильтрующей кассеты с наполнителем из лёгких шариков:  
*а – чистое; б – сильно заиленное (погружённое)*

Важным аспектом применения фильтрующих рибозащитных устройств является распределение скоростей течения воды по их площади. При неравномерном распределении скоростей возникают локальные прорывы загрузки фильтра в виде своеобразных свищей. Поэтому необходимо обеспечение равномерного распределения скоростей течения воды через кассету по всей её площади, причём, как при всасывании (водозаборе), так и промывке обратным током воды.

Как показывает опыт эксплуатации, для предотвращения коагуляции пор фильтрующих водоприёмников необходима их регулярная промывка. Применительно к горизонтальному фильтру очистка может быть усилена подачей сжатого воздуха снизу. Для этого важно обеспечить равномерность выхода воздуха по всей площади из-под фильтра. Также в конструкции должна быть предусмотрена возможность оперативного поднятия на поверхность фильтрующих элементов для их обслуживания (очистка, ремонт) [7].

В лёгких кассетах шарики с положительной плавучестью одного размера заполняют не всю кассету по высоте, но большую её часть вверху кассеты, при погружении в воду они поднимаются вверх, образуя свободное пространство в нижней части кассеты (рис. 2, а).

В процессе фильтрации воды через такую кассету по мере её засорения субстрат из лёгких шариков может опускаться в нижнюю часть кассеты под воздействием разрежения, возникающего в подкассетном пространстве водоприёмной секции. В случае равномерного заиления весь слой фильтрующего материала плавно (по мере заиления) опускается в нижнюю часть кассеты (рис. 2, б).

На стадии промывки обратным током воды и сжатым воздухом при смене направления течения на

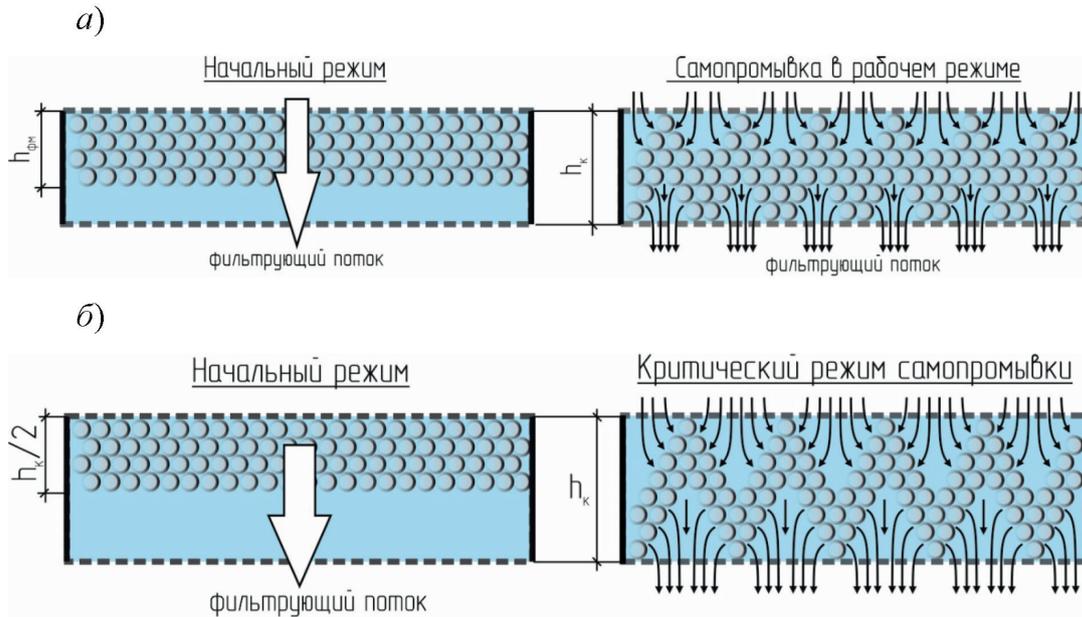
противоположное, в результате перемешивания (дополнительно инициируемого снизу воздушными пузырьками), вращения и взаимного столкновения шариков, сплошность заиленного слоя фильтрующего материала нарушается и происходит процесс его очистки (рис. 3).

Освобождённые в процессе перемешивания частицы ила и водорослей выносятся течением вверх из пространства кассеты, при этом рибозащитный эффект конструкции сохраняется, как и для любого фильтрующего устройства [7].

Важно отметить, что на начальной стадии процесс заиления может происходить не равномерно, а локально – по отдельным участкам. В этом случае будет срабатывать эффект самопромывки шаров в процессе вращения, ныряния (провалов) и всплытия вверх (под воздействием архимедовой силы) (рис. 3).

Механизм заключается в том, что шарик, находясь в своей матрице и соприкасаясь с двенадцатью соседними шариками (при их компактной схеме укладки), имеет вращательную степень свободы с наименьшим сопротивлением тангенциальному сдвигу (благодаря сферической гладкой форме), поэтому он способен переворачиваться при осаждении ила (как результат нарушения остойчивости). Такой «поворот-ныряющий» эффект возможен только с лёгкими шариками, имеющими правильно-выпуклую, сферическую форму поверхности (характеризующуюся наименьшей площадью по отношению к объёму тела), а следовательно, минимальным сопротивлением вращению, что, несомненно, является достоинством такого рода наполнителя.

При определении оптимального объёма заполнения кассеты лёгкими шариками необходимо учитывать высоту свободного пространства, исходя из компактности укладки шариков. Во время самопромывки она не должна превышать  $1/3$  высоты кассеты



**Рис. 3.** Схема промывки фильтрующей кассеты при:  
*а* – нормальной толщине слоя шариков; *б* – критической толщине

(см. рис. 3 *а*). В противном случае шарики будут сбиваться в группы, образуя провалы без заполнителя для свободного поступления воды (свищи) (см. рис. 3 *б*). Нельзя также плотно забивать кассету, исключая возможность вертикального перемещения шаров.

2. Обоснование параметров заполнителя фильтрующей кассеты из шариков и их распределения по длине водоприёмной поверхности.

Анализ гидравлического режима работы фильтрующей кассеты указывает на неравномерность распределения гидравлических потерь, а следовательно, и скоростей фильтрации по её длине из-за вытянутой формы водоприёмного короба (см. рис. 1). Наибольшие скорости будут непосредственно над отверстием всасывающей трубы в начале кассеты, а наименьшие – в конце водоприёмного короба.

Задача обоснования размеров шариков по длине кассеты связана с необходимостью определения гидравлических потерь напора и скоростей фильтрации по длине кассеты. Для выполнения гидравлического расчёта всасывающее отверстие заменяется точкой сток. Тогда изменение скоростей течения вокруг неё ( $u_r$ ) зависит только от радиуса  $r$ , то есть

$$u_r = f(r)$$

Основным условием является соблюдение постоянства расхода жидкости через любую условно-цилиндрическую поверхность, то есть  $2\pi r u_r = Q$ .

Так как водоприёмный короб имеет вытянутую форму, то для выяснения общего характера распределения скоростей фильтрации достаточно рассмотреть течение в продольной вертикальной плоскости по оси устройства. То есть, принимается допущение равномерности распределения скоростей фильтрации в поперечных сечениях фильтрующей кассеты. Расчётная схема представлена на рис. 4.

При отсутствии фильтрующего материала факел всасывания ограничивается поверхностью прямоугольного контура водоприёмного короба, в секторе с углом между лучами  $OA$  и  $OB$  (или осью  $ou$  и радиусом  $r_{max}$ ). Длина дуги, заключённая между этими двумя лучами, определяется из геометрических соображений по формуле

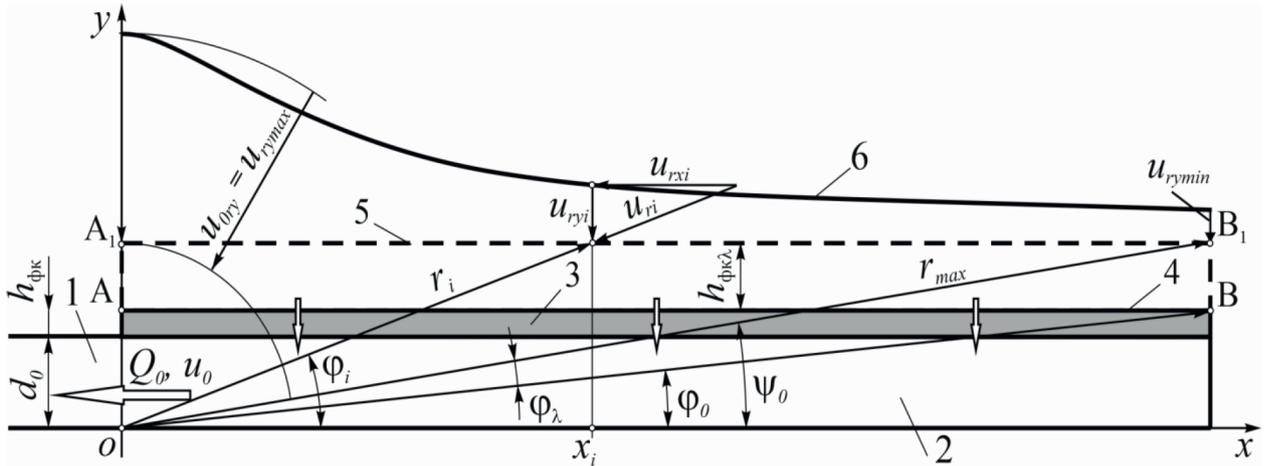
$$l_{ri} = r_i(\pi/2 - \varphi_0).$$

Так как для каждой дуги в секторе расход одинаков, то есть

$$Q_0 = Q_A = Q_{ri} = Q_B = \text{const.}$$

или

$$Q_0 = (d_0 + h_{фк}) \frac{\pi}{2} b_{фк} u_{rA} = r(x) \left( \frac{\pi}{2} - \varphi_0 \right) b_{фк} u_r(x),$$



**Рис. 4.** Расчётная схема горизонтальной фильтрующей кассеты:  
 1 – всасывающая труба; 2 – водоприёмный короб; 3 – фильтрующая кассета;  
 4 – всасывающий фронт кассеты; 5 – виртуальная поверхность кассеты;  
 6 – эпюра осреднённых (по ширине кассеты) скоростей фильтрации

то из условия неразрывности потока определяет радиальная скорость на поверхности фильтрующего экрана в плоскости АВ по следующей формуле:

$$u_r(x) = \frac{Q_0}{b_{фк} u_r(x) \left(\frac{\pi}{2} - \varphi_0\right)}. \quad (1)$$

По вектору этой скорости определяются её проекции – на вертикальную  $u_{ry}(x)$  и горизонтальную  $u_{rx}(x)$  плоскости (кассеты без шаров), то есть:

$$\begin{aligned} u_{ry}(x) &= u_r(x) \sin \varphi(x); \\ u_{rx}(x) &= u_r(x) \cos \varphi(x) \end{aligned} \quad (2)$$

Наполнение кассеты шарами изменяет в эпюру скоростей в сечении АВ, способствуя частичному её выравниванию за счёт увеличения потерь напора при связанное с перераспределением всего течения. Для построения эпюры скоростей воспользуемся формулой Е.А. Замарина [8], которая широко используется при расчётах фильтрации в грунтовых плотинах и основаниях гидротехнических сооружений и удобна тем, что охватывает ламинарную и турбулентную области фильтрации

$$u_{\phi} = 173 m_{\phi} \left(\frac{d_{ш}}{90} J_{\lambda}\right)^{n_1}, \quad (3)$$

где  $d_{ш}$  – диаметр частиц фильтрующего материала (шариков), мм;

$m_{\phi}$  – пористость фиктивного грунта, равна:

$$m_{\phi} = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \frac{\pi}{3}) \sqrt{1 + 2 \cos \frac{\pi}{3}}}, \quad (4)$$

$$n_1 = \frac{0,8 + d_{ш}}{0,8 + 2d_{ш}}. \quad (5)$$

Если  $u_{\phi 0}$  – средняя скорость течения по одной из поровых трубок, то скорость фильтрации  $u_{\phi}$  на единицу площади поперечного сечения слоя фильтрующего материала, будет равняться

$$u_{\phi} = m_{\phi} u_{\phi 0}.$$

Эта формула устанавливает связь между фиктивной скоростью фильтрации через идеальный грунт ( $u_{\phi}$ ) и действительной скоростью течения жидкости по поровым трубкам ( $u_{\phi 0}$ ), из которых построен идеальный грунт [9]. Подобный эффект «выравнивания» эпюры может быть достигнут и другим способом, без наличия фильтрующего материала – увеличением высоты кассеты ( $h_{фк}$ ).

При большей высоте короба эпюра тоже сглаживается. Поэтому (также как и в фильтрационном расчёте грунтовых плотин с ядром или экраном [8]) слой фильтрующего материала заменяется дополнительной, виртуальной высотой  $h_{фк}$ , которую (для предварительных расчётов) можно определить по гидравлическому уклону, найденному из (3)

$$J_{\lambda 1}(x) = \frac{90}{d_{ш}} \left(\frac{u_{ry\lambda}(x)}{173 m_{\phi}}\right)^{\frac{1}{n_1}}.$$

По уклону определяется угол  $\varphi_{\lambda}$

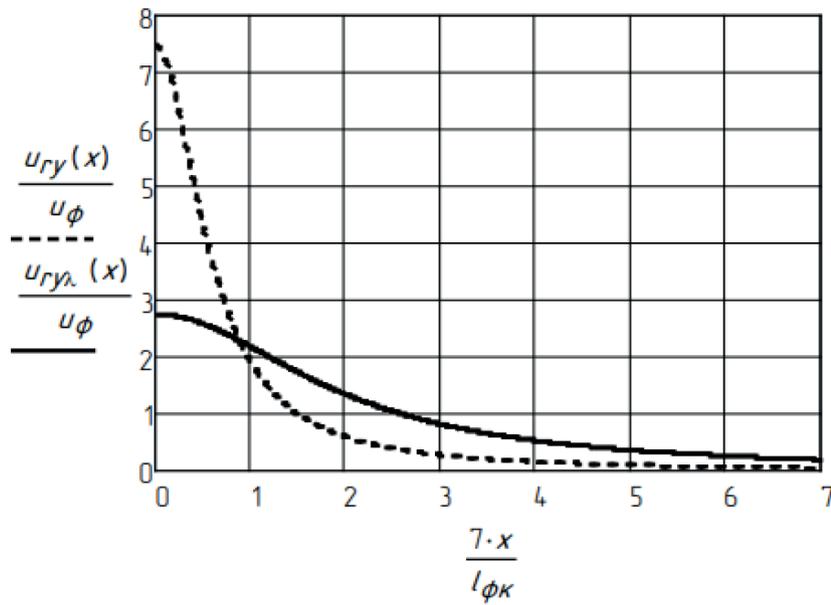


Рис. 5. Безразмерные эпюры скоростей фильтрации

$$\varphi_{\lambda} = \arctg J_{\lambda}.$$

Тогда общий наклон луча  $OB_1$  увеличивается на угол  $\varphi_{\lambda}$  (см. рис. 6), то есть:

$$\psi_0 = \varphi_0 + \varphi_{\lambda}, \quad (6)$$

где  $\psi_0$  – виртуальный угол наклона луча  $OB_1$ .

Полярные координаты точек виртуальной поверхности кассеты  $r_{\lambda}(x)$  и  $\psi(x)$  связаны с ортогональной системой координат  $xoy$  следующими зависимостями:

$$\psi(x) = \arctg \left( \frac{l_{\phi k} \varphi_0}{x} \right); r_{\lambda}(x) = \frac{x}{\cos \psi(x)}. \quad (7)$$

Тогда радиальная скорость на поверхности кассеты определяется по (1), с учётом (6) и (7), то есть:

$$u_{r\lambda}(x) = \frac{Q_0}{r_{\lambda}(x) b_{\phi k} \left( \frac{\pi}{2} - \psi_0 \right)}. \quad (8)$$

Проекции радиальной скорости определяются по (2) с учётом (8), то есть:

$$u_{ry\lambda}(x) = u_{r\lambda}(x) \sin \psi(x); \quad u_{rx\lambda}(x) = u_{r\lambda}(x) \cos \psi(x).$$

По изменению вертикального вектора скорости  $u_{ry\lambda}(x)$  можно судить о равномерности/неравномерности распределения скоростей фильтрации по длине кассеты.

На рисунке 5 в безразмерных координатах в качестве примера представлены две эпюры скоростей для кассеты: наполненной шариками диаметром  $d_{ш} = 40$  мм (сплошная линия) и без наполнителя (пунктирная линия), при условном расходе РЗУ  $Q_0 =$

$= 0,625 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для наглядности горизонтальная шкала поделена на семь частей.

Сравнение эпюр скоростей свидетельствует о сглаживающем воздействии фильтрующего материала (шариков) на распределение скоростей по длине кассеты. Хотя неравномерность и имеет место быть при  $h_{\phi M} = 0,125 \text{ м}$ , скорость в начале кассеты с шарами значительно уменьшена, а в конце – увеличена (по сравнению с пустой кассетой).

Потери напора по длине кассеты изменяются пропорционально гидравлическому уклону  $J_{\lambda 1}(x)$  в соответствии с эпюрой скоростей  $u_{ry}(x)$ :

$$h_{\lambda 1}(x) = h_{\phi M} J_{\lambda 1}(x). \quad (9)$$

Выравнивание скоростей фильтрации по длине кассеты возможно выполнить двумя способами: увеличением толщины слоя фильтрующего материала из шаров одинакового диаметра ( $d_{ш} = \text{const}; h_{\phi M} = \text{var}$ ); изменением диаметра шаров при заданной постоянной толщине слоя фильтрующего материала ( $d_{ш} = \text{var}; h_{\phi M} = \text{const}$ ).

В первом случае необходимая для выравнивания эпюры скоростей фильтрации по длине кассеты высота слоя определяется из формулы (9) при условии  $J = \text{const}$ , то есть:  $h_{\phi M 1}(x) = \frac{h_{\lambda 1}(x)}{J_{\lambda}}$ .

График этой функции представлен на рисунке 6 в безразмерных координатах.

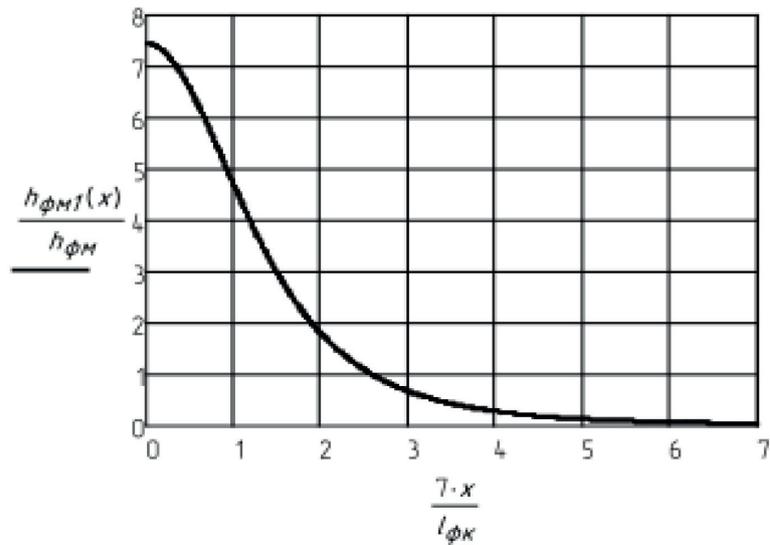


Рис. 6. График изменения толщины слоя фильтрующего материала, состоящего из шаров одного размера ( $d_{ш} = 4$  см)

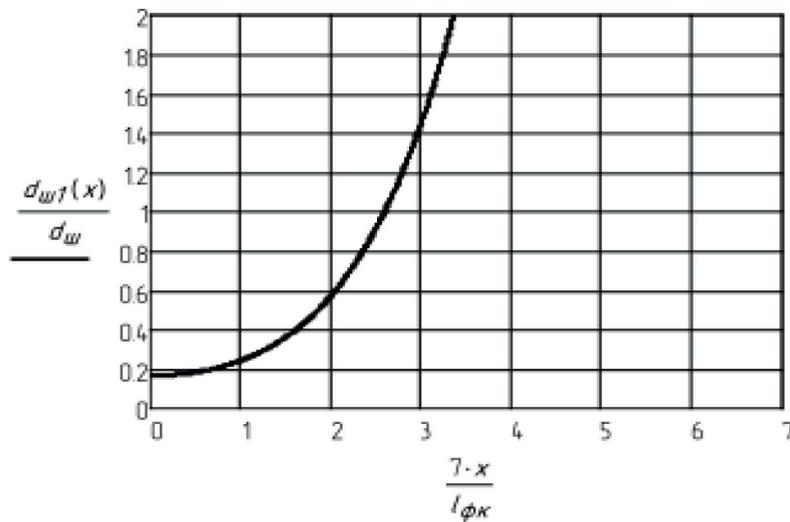


Рис. 7. Изменение диаметра шаров по длине кассеты при  $h_{фм} = \text{const}$

Как видно на графике, для выравнивания скоростей фильтрации по длине, в начале РЗУ толщина фильтрующего материала в кассете должна быть в 7,5 раз больше средней толщины  $h_{фм} = 0,125$  м, а в конце кассеты она сводится практически к нулю.

Во втором случае для условия  $h_{фм} = \text{const}$  оптимальный размер шаров  $d_{ш1}(x)$  определяется по известной средней скорости фильтрации ( $u_{ф}$ ) по формуле (3) путём решения уравнения относительно  $d_{ш1}(x)$  с учётом (4) и (5), то есть:

$$u_{ф} - 1,73m_{ф} \left( \frac{d_{ш1}}{0,9} J_{\lambda_1}(x) \right)^{\frac{0,8+d_{ш1}}{0,8+2d_{ш1}}} = 0 .$$

Решение этого уравнения представлено в относительных координатах на следующем графике (рис. 7).

В первой секции средний диаметр составляет  $\approx 0,2 d_{ш} = 0,2 \cdot 4 = 8$  мм; во второй  $\approx 0,4 d_{ш} = 16$  мм; в третьей  $\approx 1 d_{ш} = 40$  мм и т.д. Начиная с третьей секции, размер шаров становится больше проектного значения (40 мм).

Анализ графиков на рисунках 6 и 7 свидетельствует о наличии двух характерных участков, с границей на 4-й секции. В соответствии с этим, на первом участке выравнивание эпюры фильтрующих скоростей может быть достигнуто пошаговым увеличением диаметра шаров в каждой из секций РЗУ. На втором участке можно оставить шары с максимально допустимым в рыбозащите размером  $d_{ш} = 40$  мм.

## Выводы

Для увеличения эксплуатационных возможностей рекомендуется использовать фильтрующую кассету с субстратом из пластмассовых шариков с положительной плавучестью, имеющей свободное пространство под ними.

На основе гидравлического расчёта разработан метод предварительной оценки скоростей фильтрации в кассете с наполнителем в виде шариков. Для равномерного распределения скоростей фильтрации по длине кассеты рекомендуется использовать шарики разного диаметра. Оценка условий работы такой кассеты (на конкретном примере) позволила получить закономерность изменения диаметра шаров по длине кассеты, используя которую приняты следующие размеры шариков в кассетах (начиная от всасывающего патрубка): 1 кассета – 8 мм; 2 кассета – 16 мм; 3 кассета – 40 мм и последующие кассеты с диаметром шариков 40 мм.

Предложенная методика рекомендуется для использования на стадии предварительного расчёта параметров горизонтальных фильтрующих рыбозащитных кассет.

## Литература

1. СП 101.1333.2012 (С Изменением № 1) «Подпорные стены, судходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07 87».
2. Павлов, Д.С. Биологические основы защиты молоди рыб от попадания в водозаборные сооружения. / Д.С. Павлов, А.М. Пахоруков. М.: Пищевая промышленность, 1973. – 292 с.
3. Павлов, Д.С. Миграции рыб в зарегулированных реках. / Д.С. Павлов, М.А. Скоробогатов. М.: Товарищество научных изданий КМК. – 2014. – 413 с.
4. Михеев П.А., Шелестова Т.Д. Гидравлические исследования фильтрующей рыбозаградительной кассеты // Охрана и возобновление гидрофлоры и ихтиофауны: Тр. акад. водохоз. наук – Новочеркасск: НГМА, 2001. – Вып. 3. – С. 42 – 49.
5. Вдовин, Ю.И. Фильтрующие рыбозащитные сооружения и устройства коммунальных и промышленных водозаборов / Ю.И. Вдовин, А.В. Анисимов, В.И. Симакин и др. Пенза-Ухта: ПГСХА, 2002. – 198 с.
6. Михеев П.А., Шелестова Н.А., Картузова Т. Д. Гидравлический расчет рыбозащитного сооружения Чусовского водозабора // Гидротехника, гидравлика и гидроэкология». Матер. рег. техн. конф. ФГБОУ ВПО НГМА. – Новочеркасск: Лик, 2011. – С. 81-88.
7. Михеев, П.А. Защита молоди рыб при водозаборе. Учебное пособие / П.А. Михеев. – Новочеркасск, 2004. – 112 с.
8. Замарин, Е.А. Гидротехнические сооружения / Е.А. Замарин, В.В. Фандеев. – М.: Колос, 1965. – 618 с.
9. Шелкачёв, В.Н. Подземная гидравлика / В.Н. Шелкачёв, Б.Б. Лапук. – М. Л.: Гостоптехиздат, 1949. – 523 с.