

УДК 502/504 : 626/628 : 626.22 : 628.113

А. В. КЛОВСКИЙ, И. С. РУМЯНЦЕВ, Д. В. КОЗЛОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

НЕКОТОРЫЕ ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ БЕСПЛОТИННЫХ ВОДОЗАБОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ С ДОННЫМИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ ПОРОГАМИ

В статье изложена методика лабораторных гидравлических исследований условий работы донных циркуляционных порогов. Приведены результаты сравнительного анализа эффективности работы донных циркуляционных порогов с различными плано-геометрическими характеристиками в условиях водоотделения. Отмечается, что одним из критериев оценки качества отбираемой на речных водозаборных гидроузлах воды, используемой в различных отраслях экономики, является количество завлеченных в отвод русловых наносов. Установлено, что несмотря на обширный научный базис исследуемого вопроса, полностью решить проблему борьбы с наносами при отборе части речного потока пока не удалось. Данное обстоятельство объясняется сложностью достоверной оценки и учета характера трансформации потока при его делении и отсутствием в научной литературе однозначности в рекомендациях по устройству и эксплуатации различных типов противонаносных элементов в составе водозаборов. Эксперименты показали, что устройство донных циркуляционных порогов с углом установки $\beta = 45^\circ$ позволяет без снижения функций защиты преграды от наносов добиться значительного уменьшения длины порога: в 1,42 раза в сравнении с порогами при $\beta = 30^\circ$ и 2,73 раза – при $\beta = 15^\circ$. Донные циркуляционные пороги с углом установки $\beta = 45^\circ$ к береговой линии рекомендованы для широкого применения в составе компоновочных схем бесплотинных водозаборных гидроузлов на предгорных и долинных участках малых горных рек III группы.

Бесплотинные водозаборные гидроузлы, наносы, донный циркуляционный порог, искусственная поперечная циркуляция.

In the article there is stated a methodology of laboratory hydraulic researches of operation conditions of bottom circulation thresholds. There are given results of the comparative analysis of the operation efficiency of bottom circulation thresholds with different plan-geometric characteristics under the conditions of dehydration. It is stated that one of the criteria of quality assessment of the taken water from river diversion units used in different branches of the economy is the quantity of drifts got into the bed withdrawal. It is established that despite the considerable scientific basis of the researched question it has been failed so far to fully solve the problem of drifts control when selecting a part of the river flow. This fact is explained by the difficulty of reliable assessment and accounting of the character of flow transformation when it is divided and at the absence of different types of anti-alluvial elements within water intakes. Experiments showed that arrangement of bottom circulation thresholds with an angle of installation $\beta = 45^\circ$ allows without decreasing protection functions of barrier to achieve a substantial reduction of the threshold length; by 1,42 times in comparison with thresholds at $\beta = 30^\circ$ and by 2,73 times – at $\beta = 15^\circ$. Bottom circulation thresholds with the angle of installation $\beta = 45^\circ$ to the coastal line are recommended for a wide use within construction arrangement of damless diversion hydraulic units on submountain and valley parts of small mountain rivers of III group.

Damless diversion units, alluvia, bottom circulation threshold, forced transverse circulation.

Одним из критериев оценки качества отбираемой на речных водозаборных гидроузлах воды, используемой в различных отраслях экономики, является количество завлеченных в отвод русловых наносов.

Несмотря на обширный научный базис исследуемого вопроса, полностью решить проблему борьбы с наносами при отборе части речного потока пока не удалось. Данное обстоятельство объясняется, с одной стороны,

сложностью достоверной оценки и учета характера трансформации потока при его делении, а, с другой стороны, отсутствием в научной литературе однозначности в рекомендациях по устройству и эксплуатации различных типов противонаносных элементов в составе водозаборов. В этой связи разработка новых и совершенствование существующих компоновочных схем и отдельных конструктивных решений для элементов водозаборных гидроузлов, а также методов их эксплуатации с целью обеспечения надежной защиты водоприемников от завлечения вредных наносов, приобретает важное стратегическое и инженерно-техническое значение [1].

Проведенный авторами анализ эффективности компоновочных схем бесплотинных водозаборов, зарекомендовавших себя надежной работой в тяжелых наносных и гидрологических условиях показал, что одним из наиболее эффективных и вместе с тем простых в конструктивном и эксплуатационном отношении противонаносных элементов в их составе является донный циркуляционный порог конструкции Г. В. Соболина – И. К. Рудакова [2]. Такой порог, расположенный под некоторым углом β к берегу, эффективно перераспределяя удельные расходы по ширине подводящего русла, формирует в потоке искусственную поперечную циркуляцию (ИПЦ), которая наряду с защитными винтовыми течениями в створе преграды изменяет характер движения наносов в зоне влияния защищаемого водозаборного сооружения в нужном для практики направлении. Интенсивность всех трех защитных течений зависела, в общем случае, от угла расположения порога β к линии берега, относительной высоты донного порога $P_{\text{отп}} = P/H_0$ (P – высота донного порога в его средней части, H_0 – глубина воды бытового русла), величины стеснения потока $n = l_{\text{п}} \cdot \sin\beta / B$ ($l_{\text{п}}$ – геометрическая длина порога), средней скорости потока V_0 и уклона верхней грани порога $i_{\text{п}}$.

Необходимо отметить, что рекомендации по проектированию донных циркуляционных порогов носят весьма противоречивый характер [3]. Принципиальным здесь является вопрос назначения рациональных планово-геометрических характеристик донных преград с точки зрения формирования ими в потоке всех трех защитных течений требуемой интенсивности. Данное обстоятельство относится к выбору

оптимально угла β (по Г. В. Соболину $\beta = 15^\circ \dots 30^\circ$, по В. С. Бондаренко $\beta = 40^\circ \dots 50^\circ$, по В. А. Шаумяну $\beta = 15^\circ \dots 90^\circ$) и определению требуемой величины n (рекомендации В. А. Шаумяна и А. С. Образовского).

На основании вышеизложенного авторами было принято решение о необходимости проведения серии экспериментов по изучению гидравлических и наносных условий работы донных циркуляционных порогов в режиме водоотделения на размываемой модели бесплотинного водозаборного гидроузла.

Целью настоящих исследований было определение таких планово-геометрических характеристик донного порога, при которых была бы обеспечена надежная защита водоприемника от завлечения русловых наносов во всем диапазоне углов установки порога $\beta = 15^\circ \dots 90^\circ$ для каждого экспериментального режима при различных значениях коэффициента водозабора $\alpha = Q_{\text{вз}}/Q_{\text{р}} = 0,10 \dots 0,20$ ($Q_{\text{вз}}$ – расход, забираемый из реки с помощью водозаборного сооружения, $Q_{\text{р}}$ – расход реки). В этом случае, основываясь на результатах экспериментальных исследований гидравлических условий работ донных циркуляционных порогов [4–10] и учитывая характерную для каждого угла установки порога β интенсивность возбуждаемых в потоке защитных течений, можно будет сделать вывод о степени влияния каждого из них на эффективность защиты водоприемника от завлечения русловых наносов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

проверить и уточнить имеющиеся рекомендации по определению ширины захвата отводом донных линий токов $b_{\text{д}}$, насыщенных влекомыми наносами, в широком диапазоне изменения гидравлических режимов модельного потока.

имея возможность достоверно оценить величину $b_{\text{д}}$ и, следовательно, необходимую степень перекрытия русла (фактически – величину стеснения потока n), исследовать защитные функции донных циркуляционных порогов во всем диапазоне углов установки порога $\beta = 15^\circ \dots 90^\circ$ для каждого экспериментального режима при различных коэффициентах водозабора. Схема экспериментальной установки, выполненной авторами в лаборатории кафедры «Гидротехнических сооружений» ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, представлена на рисунке 1.

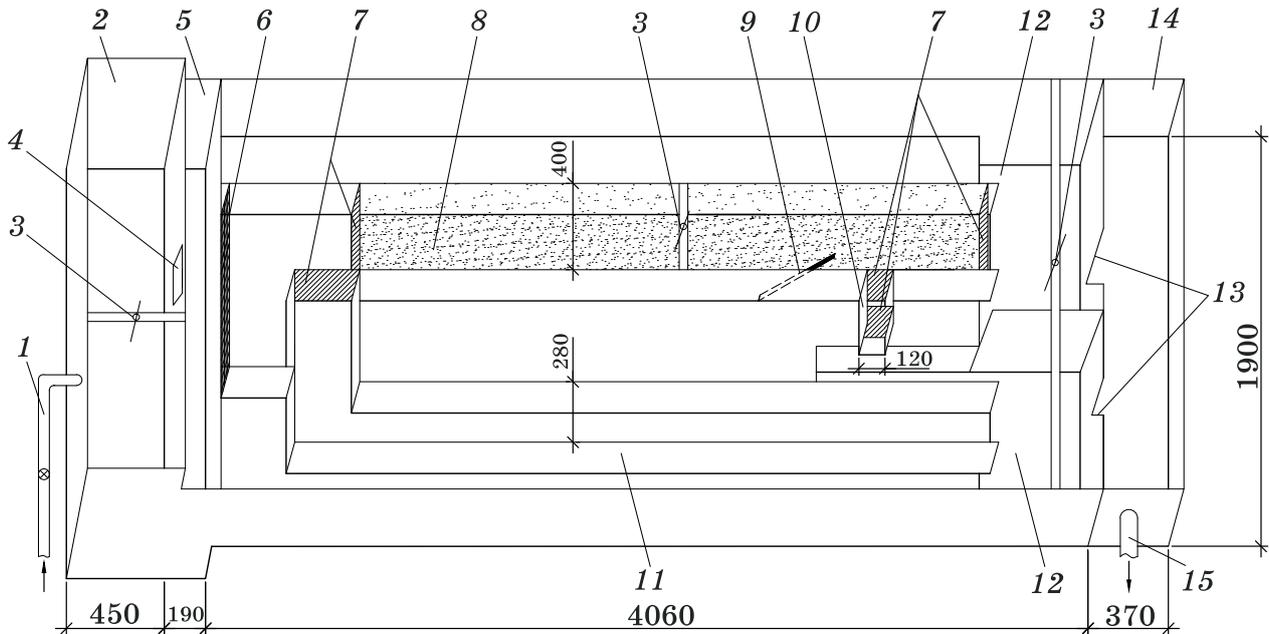


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – подводящая труба; 2 – водоприемный бак; 3 – подвижные «шпиценмасштабы»; 4 – трапецидальный мерный водослив; 5 – успокоительный резервуар; 6 – успокоительная решетка; 7 – плоские затворы; 8 – русловой лоток; 9 – косо направленный донный порог; 10 – участок отводящего русла; 11 – обводной канал; 12 – успокоительные баки-отстойники; 13 – треугольные мерные водосливы; 14 – выходной бак-отстойник; 15 – отводящая труба

В качестве прототипа модельного водотока был принят участок малой горной реки III группы с характеристиками, свойственными для предгорных и равнинных участков водотоков данной группы [11].

Масштаб модели $M_l = 25$ был выбран с учетом соблюдения геометрического подобия формы русла и уклона дна водотока на основе имеющихся рекомендаций, данных натуральных исследований и возможностей лабораторной установки [12, 13].

Гидравлические параметры модельного потока устанавливались аналогично соответствующим экспериментальным режимам, исследованным на модели с неразмываемым руслом с учетом пересчета рассматриваемых характеристик для экспериментальной модели меньшего масштаба по общеизвестным зависимостям. Таким образом, нами были исследованы пять гидравлических режимов работы преграды:

$$\begin{aligned}
 P &= P_{cp} = 0,5 \cdot H_0, H_0 = 4,8 \text{ см}, \\
 V_0 &= 15,81 \text{ см/с}, Q=3,04 \text{ л/с}; \\
 P &= P_{cp} = 0,4 \cdot H_0, H_0 = 6 \text{ см}, \\
 V_0 &= 12,65 \text{ см/с}, Q=3,04 \text{ л/с}; \\
 P &= P_{cp} = 0,4 \cdot H_0, H_0 = 6 \text{ см}, \\
 V_0 &= 15,81 \text{ см/с}, Q=3,8 \text{ л/с}; \\
 P &= P_{cp} = 0,4 \cdot H_0, H_0 = 6 \text{ см}, \\
 V_0 &= 19 \text{ см/с}, Q=4,55 \text{ л/с}; \\
 P &= P_{cp} = 0,3 \cdot H_0, H_0 = 8 \text{ см}, \\
 V_0 &= 15,81 \text{ см/с}, Q=5,06 \text{ л/с}.
 \end{aligned}$$

Скоростной режим модельного потока позволял обеспечивать подвижность донных наносов во всем диапазоне изменения гидравлических режимов водотока. Числа Фруда находились в пределах 0,027...0,061. Минимальное значение числа Рейнольдса на модели, характерное для 1 и 2 экспериментальных режимов и найденное для 2-го режима, превышало значение критического числа Рейнольдса для открытых русел $Re_{гр} = 580$, т. е. изучаемые явления протекали в квадратичной области сопротивлений:

$$Re_{min}^m = \frac{V_{0,2}^m \cdot H_{0,2}^m}{\nu} = \frac{0,1265 \cdot 0,06}{0,0115 \cdot 10^{-4}} = 6600,$$

где ν – кинематическая вязкость, m^2/c , при температуре воды $t_w = 15...16 \text{ }^\circ C$.

В качестве основного критерия подобия подвижности донных наносов в данной работе, как и в других исследованиях, было принято соотношение средней скорости потока V_0 и неразмывающей скорости V_n . Подвижка и последующее перемещение потоком донных наносов наблюдались при значениях $V_0/V_n > 1$; выполнение данного условия обеспечивалось на всех этапах экспериментов. Также на модели в пределах натуральных значений поддерживался показатель ω/V_0 подвижности донных наносов, где ω – гидравлическая крупность наносов материала.

Равномерная подача специально подобранной смеси наносного материала по всей ширине лотка позволяла поддерживать концентрацию наносов на модели в пределах натуральных значений. Характеристики механического состава лабораторного грунта, используемого для моделирования русловых наносов, были определены в соответствии с методикой, изложенной в работах [12, 14].

Шероховатость дна и берегов была воспроизведена на модели с учетом расчетного диаметра русловой отстойки, определенного в соответствии с рекомендациями [12].

Коэффициент водозабора α в условиях эксперимента принимал значения 0,10; 0,15; 0,20. Каждой величине коэффициента водозабора соответствовала определенная ширина захвата донных линий токов. Имеющиеся в научной литературе зависимости для определения величины b_d , предложенные В. А. Шаумяном и А. С. Образовским, дают различные результаты. Так ширина захвата донных линий токов по В. А. Шаумяну определится как:

$$b_d = 1,17 \cdot (k + 0,4) \cdot b, \quad (1)$$

где $k = q_k/q_p$ – отношение удельных расходов в отводимом и основном потоках; b – ширина поперечного сечения потока в отводящем русле.

Отметим, что величина k при неизменных значениях ширины основного и отводящего русел для соответствующих коэффициентов водозабора α является постоянной:

$$k = \frac{q_k}{q_p} = \frac{Q_k}{Q_p} \cdot \frac{B}{b} = \alpha \cdot \frac{B}{b}.$$

После преобразований зависимость (1) имеет вид:

$$b_d = 1,17 \cdot \alpha \cdot B + 0,468 \cdot b,$$

откуда требуемая величина стеснения потока n определится так:

$$n = b_d/B = 1,17 \cdot \alpha + 0,468 \cdot b/B.$$

Для рассматриваемых условий при неизменном соотношении $b/B = 0,3$ величина n будет принимать значения 0,2574; 0,3159; 0,3744 для коэффициента водозабора 0,1; 0,15 и 0,2 соответственно.

По А. С. Образовскому относительная ширина захвата отводом донных линий токов b_d/B (требуемая величина стеснения потока n) для земляных русел определится так:

$$n = b_d/B = 2,14 \cdot \alpha + 0,07. \quad (2)$$

Для рассматриваемых условий величина n будет принимать значения 0,284; 0,391; 0,498 для коэффициента

водозабора 0,1; 0,15 и 0,2 соответственно.

Анализ полученных по формулам (1) и (2) значений n показал, что разница между расчетными величинами колеблется в пределах 10...40 % для минимального и максимального значений коэффициента водозабора соответственно из рассматриваемого диапазона. В этой связи для каждого из расчетных значений n во всем диапазоне изменения угла установки порога β к береговой линии была определена требуемая длина донного циркуляционного порога по зависимости $l_n = n \cdot B/\sin\beta$ с учетом обеспечения неизменной величины стеснения потока n для данного угла β .

Лабораторные исследования гидравлических и наносных условий работы донных циркуляционных порогов выполнялись в определенной степени унифицировано. Началу каждого опыта предшествовал подготовительный этап, на котором происходило формирование естественного бытового русла модельного водотока. Это достигалось путем непрерывной подачи на модель расчетных расходов воды и наносной смеси требуемой концентрации для каждого экспериментального гидравлического режима. По рекомендациям [12, 13] после 30...40 минут работы модели проверялось соблюдение граничных условий – баланс между пущенными и уловленными в концевой части основного русла наносами. Затем затвор в начальной части основного русла медленно закрывался, и расчетный расход воды сбрасывался по обводному каналу. Рабочая часть лотка закрывалась водонепроницаемой пленкой для предотвращения деформаций сформированного бытового русла, после чего вода вновь подавалась на рабочую часть модели. Далее полностью открывалось отверстие водоприемника; величины отбираемых расходов регулировались плоским затвором в концевой части отводящего русла. После установления требуемого режима работы водозаборного сооружения защитная пленка аккуратно убиралась, и начинался непосредственно эксперимент.

В условиях постоянной подачи расчетных расходов воды и наносной смеси требуемой концентрации при заданном коэффициенте водозабора изучался характер взаимодействия незащищенного отвода с модельным потоком, а также исследовались защитные функции донных циркуляционных порогов с различными

планово-геометрическими характеристиками. В качестве критерия оценки эффективности работы донных порогов был принят процент захвата водоприемником поданных на модель наносов $K_{\%}$ – чем меньше наносов при водоотделении завлекается в отвод, тем эффективнее работает донная циркуляционная преграда.

Для определения процента завлеченных в отвод наносов в успокоительных резервуарах, расположенных за участком нижнего бьефа основного русла и отводящим каналом, предусматривались наносоулавливающие контейнеры. После 0,9...1,4 часов работы модели (время переформирования бытового русла в зоне влияния защищаемого водозаборного сооружения) медленно закрывался затвор в начале рабочей части модели, уловленные

в контейнеры наносы извлекались и высушивались для дальнейшего взвешивания и определения величины $K_{\%}$ весовым соотношением завлеченных в отвод и далее транспортируемых по основному руслу в нижний бьеф гидроузла наносов.

В соответствии с принятой методикой для каждого гидравлического режима работы донной преграды был оценен процент завлеченных в водоприемник русловых наносов (величина $K_{\%}$), характеризующий эффективность работы донных циркуляционных порогов, устроенных в соответствии с рекомендациями В. А. Шаумяна (формула 1) и А. С. Образовского (формула 2). Также были оценены значения $K_{\%}$ для незащищенного порогом отвода. Полученные данные в графической форме представлены на рисунках 2–4.

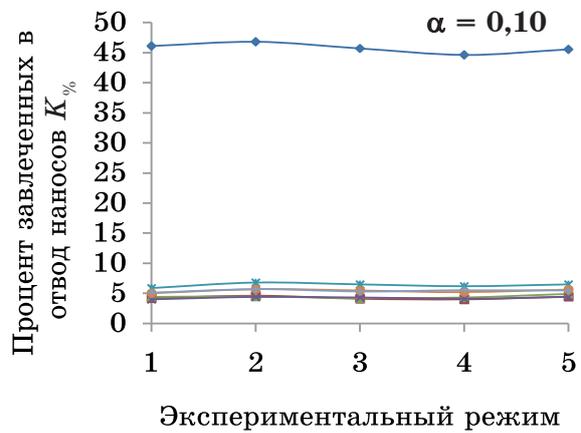
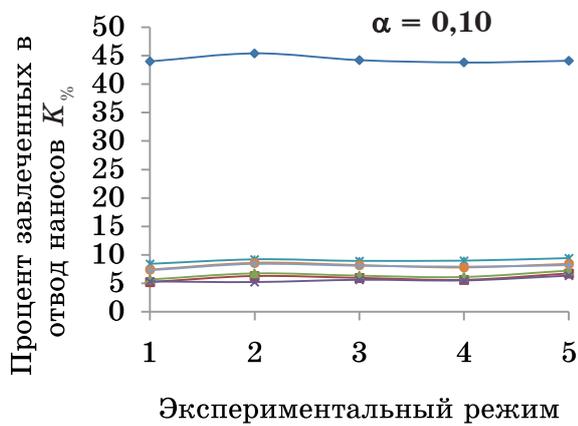


Рис. 2. Анализ эффективности работы донных циркуляционных порогов, устроенных в соответствии с рекомендациями: а – В. А. Шаумяна; б – А. С. Образовского; ♦ – без порога; ■ – $\beta = 15^\circ$; ▲ – 30° ; × – 45° ; * – 60° ; ● – 75° ; + – 90°

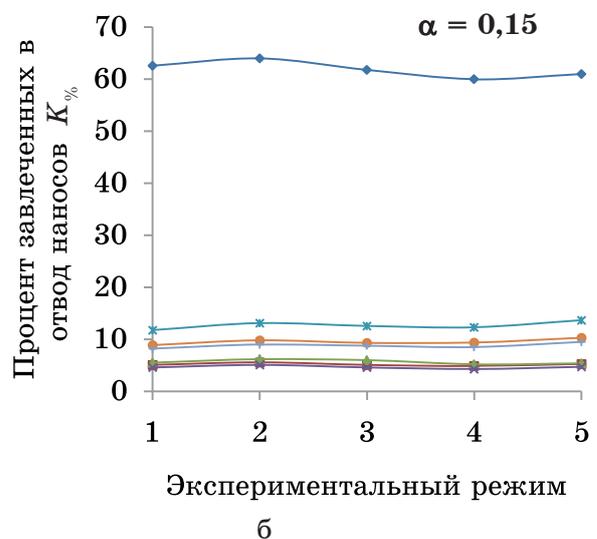
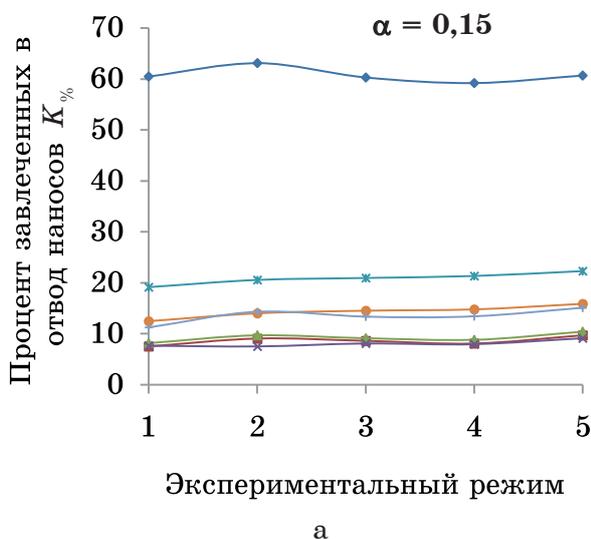


Рис. 3. Анализ эффективности работы донных циркуляционных порогов, устроенных в соответствии с рекомендациями: а – В. А. Шаумяна; б – А. С. Образовского; ♦ – без порога; ■ – $\beta = 15^\circ$; ▲ – 30° ; × – 45° ; * – 60° ; ● – 75° ; + – 90°

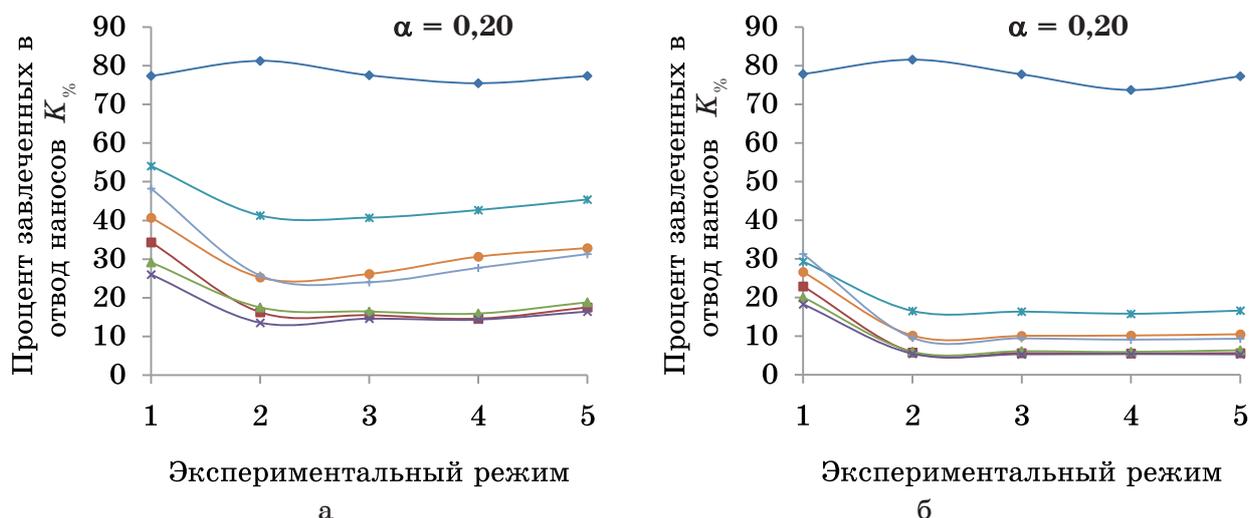


Рис. 4. Анализ эффективности работы донных циркуляционных порогов, устроенных в соответствии с рекомендациями при $\alpha = 0,20$: а – В. А. Шаумяна; б – А. С. Образовского; \diamond – без порога; \blacksquare – $\beta = 15^\circ$; \blacktriangle – 30° ; \times – 45° ; $*$ – 60° ; \bullet – 75° ; $+$ – 90°

На основании анализа полученных экспериментальных данных была дана следующая оценка работы донных циркуляционных порогов:

1. Предложенная В. А. Шаумяном зависимость (1) для определения величины b_d на основе анализа результатов лабораторных исследований гидравлических и наносных условий работы донных циркуляционных порогов постоянной высоты на модели с гладким призматическим руслом в условиях решаемой задачи дает заниженные значения ширины захвата отводом донных линий токов. Об этом свидетельствует достаточно высокий процент завлечения в отвод русловых наносов при значениях коэффициента водозабора $\alpha \geq 0,15$. Данное положение объясняется значительной инерционностью частиц жидкости в придонном слое и, соответственно, меньшим их отклонением от начальной траектории под действием отвода при движении потока в гладком русле. В условиях же достоверно воспроизведенной шероховатости дна и берегов модельного водотока действительная величина b_d принимает при прочих равных условиях большие значения, что обуславливает необходимость устройства порогов большей длины. Для малых коэффициентов водозабора ($\alpha \leq 0,10$) зависимость В. А. Шаумяна позволяет получать приемлемые для практических целей значения b_d и n . Отметим, что наиболее эффективно в сложных гидравлических и наносных условиях работают пороги с углами установки $\beta = 15^\circ \dots 45^\circ$. Для порогов с геометрическими характеристиками, определенными с использованием рекомендаций В. А. Шаумяна, на величину $K_{\%}$ определяющее влияние оказывают вели-

чины отбираемых расходов. Так для порогов с $\beta = 45^\circ$ осредненный процент завлеченных в отвод наносов $K_{\%,\text{ср}}$ по всем экспериментальным режимам работы преграды составляет: $K_{\%,\text{ср}} = 5,6\%$ при $\alpha = 0,10$; $K_{\%,\text{ср}} = 8,1\%$ при $\alpha = 0,15$; $K_{\%,\text{ср}} = 14,7\%$ при $\alpha = 0,20$.

2. Зависимость (2) А. С. Образовского для определения величины b_d , разработанная автором для земляных русел, в условиях решаемой задачи позволяет достоверно определять требуемую величину стеснения потока n , и, соответственно, длину донных циркуляционных порогов, необходимую для надежной защиты водоприемника от завлечения русловых наносов во всем диапазоне рассматриваемых значений коэффициента водозабора α . Наилучшими эксплуатационными показателями здесь также обладают донные циркуляционные пороги с углами установки $\beta = 15^\circ \dots 45^\circ$. Необходимо отметить, что для порогов с геометрическими характеристиками, определенными с использованием рекомендаций А. С. Образовского, величина $K_{\%}$ практически не зависит от значений коэффициента водозабора α и составляет в среднем $4,8\%$ для всех рассматриваемых режимов работы водозаборного сооружения.

3. При значении $\alpha = 0,20$ для 1 экспериментального режима характерно образование за порогом надвинутого прыжка, т. е. наносорегулирующее устройство в этом случае работало как подтопленная преграда. Данный гидравлический режим работы характеризовался повышенным процентом завлечения в отвод русловых наносов вследствие неустойчивой кинематической структуры потока за порогом и в условиях эксперимента не зависел от планово-

геометрических характеристик преграды. Подробно данный гидравлический режим работы преграды нами не рассматривался.

Выводы

В ходе проведения лабораторных гидравлических исследований условий работы донных циркуляционных порогов уточнены имеющиеся рекомендации по определению требуемой величины стеснения потока n . В условиях достоверно воспроизведенной шероховатости дна и берегов моделируемого водотока для определения величины n следует использовать зависимость (2) А. С. Образовского.

Полученная в ходе лабораторных исследований количественная картина взаимодействия бесплотинного водозаборного гидроузла исследуемой конструкции с модельным потоком позволила определить оптимальный диапазон углов установки донных циркуляционных порогов к береговой линии ($\beta = 15^\circ \dots 45^\circ$). Эксперименты показали, что устройство донных циркуляционных порогов с $\beta = 45^\circ$ позволяет без снижения наносозащитных функций преграды добиться значительного уменьшения длины порога: в 1,42 раза в сравнении с порогами при $\beta = 30^\circ$ и 2,73 раза в сравнении с порогами при $\beta = 15^\circ$.

В этой связи донные циркуляционные пороги с углом установки $\beta = 45^\circ$ к береговой линии могут быть рекомендованы к широкому применению в составе компоновочных схем бесплотинных водозаборных гидроузлов на предгорных и долинных участках малых горных рек III группы.

1. Козлов Д. В. Приоритетные направления развития научно-исследовательской деятельности в области водного хозяйства // Инновационные технологии в мелиорации: материалы международной научно-практической конференции. – М.: Изд. ВНИИА. – 2011. – С. 8–13.

2. Соболин Г. В. Борьба с наносами при водозаборе в каналы оросительных систем горно-предгорной зоны: дис. ... д-ра техн. наук. – М., МГМИ, 1987. – 425 с.

3. Кловский А. В., Румянцев И. С. Сравнительный анализ эффективности работы косонаправленных донных циркуляционных порогов переменной высоты // Вестник МОАЭБП. – 2014. – № 18 (25). – С. 21–27.

4. Румянцев И. С., Кловский А. В. Научный обзор изученности вопросов проектирования и безнаосной эксплуатации

бесплотинных водозаборных гидроузлов // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 2. – С. 101–106.

5. Кловский А. В. Результаты исследований гидравлических условий работы фронтальных донных циркуляционных порогов // Международный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 77–83.

6. Румянцев И. С., Кловский А. В. Результаты исследований скоростного режима защитных винтовых течений в створе фронтальных донных порогов // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 2. – С. 96–100.

7. Кловский А. В. Сравнительный анализ эффективности работы фронтальных донных циркуляционных порогов постоянной и переменной высоты // Природообустройство. – 2014. – № 4. – С. 37–42.

8. Кловский А. В., Румянцев И. С. Результаты исследований гидравлических условий работы косонаправленных ($\beta = 75^\circ$) донных циркуляционных порогов переменной высоты // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 36–42.

9. Кловский А. В. Результаты исследований гидравлических условий работы косонаправленных ($\beta = 60^\circ$) донных циркуляционных порогов переменной высоты // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2014. – № 2. – С. 44–48.

10. Кловский А. В., Румянцев И. С. Результаты исследований гидравлических условий работы косонаправленных ($\beta = 30^\circ$) донных циркуляционных порогов переменной высоты // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки– 2014. – № 6 [Электронный ресурс]. – URL: <http://apriori-journal.ru/seria2/6-2014/Klovskij-Rumyancev.pdf> (дата обращения 27.06.15).

11. Филончиков А. В. Водозаборные гидроузлы. – Фрунзе: Кыргызстан, 1990. – 371 с.

12. Абидов М. М. Регулирование наносного режима при водозаборе на горно-предгорных участках рек: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2006. – 199 с.

13. Кромер Р. К. Исследование процессов занесения и промыва подпорных бьефов низконапорных гидроузлов на реках горно-предгорной зоны: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1979. – 228 с.

14. Бондаренко В. С. Разработка и исследование бесплотинного водозабора для рек

с тяжелым наносным и гидрологическим режимами: дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск, НИМИ, 1975. – 184 с.

Материал поступил в редакцию 12.05.2015.

Кловский Алексей Викторович, аспирант,

E-mail: Alexey.Klovskiy@yandex.ru

Тел. 8 (903) 541-07-85

Румянцев Игорь Семенович, доктор тех-

нических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, почетный член РААСН

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, проректор по инновационному развитию

E-mail: kozlovdv@mail.ru

Тел. 8 (499) 976-29-62

УДК 502/504:627.8:532.5

В. А. ФАРТУКОВ

ЗАО «Бюро сервиса и эксплуатации» BSM, г. Москва

М. В. ЗЕМЛЯННИКОВА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

СТАЦИОНАРНЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ КОЛЕБАНИЯ НИЖНЕГО БЬЕФА

В статье рассмотрен случай нелинейных колебаний, возникающих в нижнем бьефе при установившемся режиме течения открытого водного потока. Приводится нелинейное уравнение, в котором энергия водного потока диссипирует при больших амплитудах колебания водной поверхности и генерируется при малых значениях амплитуд колебания. Эта система обладает предельными циклами, колеблющихся около состояния, при котором приток и диссипация энергии сбалансированы и определено наличие бифуркаций векторных полей течения воды. Установлено, что в рассмотренной колебательной системе незатухающие колебания практически могут существовать при наличии некоторого источника энергии, который компенсирует расход энергии, возникший за счет присутствия диссипативных сил. Получено нелинейное уравнение для описания протекающего колебательного процесса в открытом водном потоке нижнего бьефа гидротехнического сооружения при сопряжении бьефов в виде гидравлического прыжка. Уравнение позволяет определять параметры нелинейных колебаний (амплитуда волны, частота колебаний, длина волны) возникающих в нижнем бьефе при установившемся режиме течения потока. Результаты вычислений позволяют осуществить коррекцию размеров гасителей энергии водного потока при решении многих практических задач гидротехнических сооружений.

Структура потока, установившийся режим, диссипация энергии, бифуркация, автоколебательный процесс.

The article considers a case of non-linear vibrations arising downstream under a stable regime of open water flow. There is given a non-linear equation in which the energy of water flow dissipates at high amplitudes of water surface vibrations and generates at small values of vibration amplitudes. This system possesses limit cycles vibrating near the state under which the inflow and energy dissipation are balanced and availability of bifurcations of vector fields of water flow is determined. It is established that in the considered vibration system undamped vibrations can practically exist at the availability of some source of energy which compensates power consumption arising due to present dissipative forces. The non-linear equation is obtained for describing a flowing process in the open water current of the lower pond of the hydraulic structure at ponds conjugation in the way of hydraulic jump. The equation allows determining parameters of non-linear vibrations (wave amplitude, frequency of vibrations, wave length) arising downstream under the stable regime of flow current. The results of calculations make it possible to carry out correction of sizes of energy dissipaters of the water flow when deciding many practical tasks of hydraulic structures.

Flow structure, steady regime, energy dissipation, bifurcation, a stable process.