

НОВЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТРОЙСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ КОСОНАПРАВЛЕННЫХ ДОННЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПОРОГОВ В СОСТАВЕ БЕСПЛОТИННЫХ ВОДОЗАБОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ НА МАЛЫХ ГОРНЫХ РЕКАХ

А.В. Кловский, инженер, аспирант, Д.В. Козлов, доктор технических наук, профессор

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

В статье изложены обновленные рекомендации по устройству и эксплуатации косонаправленных донных циркуляционных порогов в составе бесплотинных водозаборных гидроузлов на малых горных реках.

In the article stated the updated recommendation on the designing and exploitation of oblique bottom circulation thresholds as part of damless intake hydroshemesat small mountain rivers.

Задачи гарантированного обеспечения водными ресурсами населения и различных отраслей экономики страны относятся к числу приоритетных направлений Водной стратегии Российской Федерации до 2020 года [1], в которой одним из основных критериев оценки качества подаваемой потребителям воды является минимально возможное содержание в ней различных загрязнителей, в том числе завлеченных в магистральные каналы водохозяйственных систем русловых наносов.

Несмотря на обширный научный базис данного вопроса, полностью решить проблему борьбы с наносами при отборе части речного потока на водозаборных гидроузлах 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 устройства и эксплуатации с целью надежной защиты водоприемников от завлечения вредных наносов, приобретает важное научное и инженерно-техническое значение[2].

Проведенный анализ эффективности компоновочных схем бесплотинных водозаборов показал, что на реках с тяжелыми гидрологическими и наносными режимами, к числу которых относятся водотоки горно-предгорной зоны, хорошо себя зарекомендовали косонаправленные донные циркуляционные пороги (донные КЦП) конструкции Г.В. Соболина – И.К. Рудакова [3]. Предложенная этими авторами конструкция донного порога, эффективно перераспределяя удельные расходы по ширине подводящего русла, способствовала возбуждению в потоке искусственной поперечной циркуляции (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.

Необходимо отметить, что существующие рекомендации по проектированию и эксплуатации косонаправленных донных циркуляционных порогов носят весьма противоречивый характер [4]. Принципиальным здесь является вопрос назначения рациональных планово-геометрических характеристик донных преград с точки зрения формирования ими в потоке всех типов защитных течений требуемой интенсивности. Данное обстоятельство относится к выбору оптимального угла установки порога к береговой линии (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 стеснения потока n (согласно рекомендаций В.А. Шаумяна и А.С. Образовского).

С учетом вышесказанного нами в лаборатории кафедры Гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева были проведены модельные гидравлические исследования условий работы косонаправленных донных циркуляционных порогов, в рамках которых:

а) выявлен действительный характер взаимодействия донных КЦП сводным русловым потоком, недеформированным отводом, в зависимости от

планово-геометрических характеристик преграды и экспериментального гидравлического режима ее работы на физической модели с неразрываемым руслом;

б) изучены качественная и количественная картины взаимодействия донных КЦП с водным потоком в ходе лабораторных исследований гидравлических и наносных условий работы противонаносных элементов на размываемой модели водозаборного гидроузла на малой горной реке (III группы) в условиях бесплотинного отбора воды с коэффициентом водозабора $\alpha = 0,1 \dots 0,2$;

Результаты выполненных авторами исследований в широком диапазоне граничных условий подробно изложены в работах [5-10].

Полученные в ходе лабораторных исследований качественная и количественная картины взаимодействия бесплотинного водозаборного гидроузла исследуемой конструкции с модельным потоком позволили 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 относительно ранее рекомендованных углов $\beta = 15^\circ \dots 30^\circ$ [3].

Кроме того, на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований уточнены рекомендации [11] по устройству и эксплуатации косонаправленных донных циркуляционных порогов в составе бесплотинных водозаборных гидроузлов на малых горных реках, позволяющие обосновать надежные и экономически эффективные проектные решения для таких водозаборов.

В соответствии с рекомендациями [11] угол отвода потока φ выбирается исходя из конкретных условий существования проектируемого узла. Такугол отвода следует назначать больше 90° ($\varphi > 90^\circ$), если сооружение длительные периоды будет работать в режиме водообмена, а минимальные уровни реки при

этом надежно гарантируют расчетные заборы; при необходимости получения минимальных потерь на входе угол отвода должен быть меньше 90° .

В общем случае угол отвода потока принимается равным 90° ($\varphi = 90^\circ$), так как при таком взаимном расположении водотока и отвода режим работы водозаборного сооружения может плавно меняться в зависимости от изменения уровней воды в реке, что обеспечивает его безнапорную эксплуатацию в тяжелых гидравлических и наносных условиях. Вместе с тем устройство отвода под углом $\varphi = 90^\circ$ к водотоку несколько удешевляет строительство ввиду сокращения затрат на подготовительные и строительно-монтажные работы.

По рекомендациям [9] необходимая ширина водоприемного фронта b определяется подбором из формулы расхода через подтопленный водослив с широким порогом

$$Q_b = \varepsilon \cdot \varphi \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot z} \quad (1)$$

где Q_b – величина забираемого из реки расхода; ε – коэффициент бокового сжатия; φ – коэффициент скорости; b – ширина водоприемного фронта (водоприемника); h – глубина воды в реке ниже отвода; z – потери напора на входе в отвод; g – ускорение свободного падения.

Значения ε и φ зависят от формы входного отверстия водоприемника и определяются в соответствии с рекомендациями [12]. Потери напора на входе в отвод могут быть оценены по зависимости В. С. Бондаренко [9]:

$$z = (1,21 - 0,21 \cdot \cos \varphi) \cdot V_k^2 / 2 \cdot g, \quad (2)$$

где V_k – скорость потока в отводящем русле; наиболее точные результаты формула дает при $V_k \approx V_0$.

Ширина водоприемника и ширина отводящего канала в большинстве случаев принимаются равными. Поэтому при определении ширины водоприемника b необходимо учитывать также гидрогеологические условия местности, тип и форму отводящего канала и пр. В первом приближении зависимость (2) позволяет достаточно точно определять значения b , необходимые для дальнейших расчетов.

Участки водотока выше и ниже по течению относительно корня циркуляционного порога на длину не менее $20 \cdot H_0$ рекомендуется устраивать зарегулированными с постоянной шириной B и вертикальными бортами или трапецеидальными с шириной B по дну. В этом случае стабилизируется гидравлическая и кинематическая структура потока в зоне влияния водозаборного сооружения, искусственная поперечная циркуляция и защитные винтовые течения вдоль верховой и низовой грани проектируемого донного циркуляционного порога получают достаточное развитие, значительно облегчается определение требуемой величины стеснения потока.

Требуемый коэффициент водозабора α , зависящий от соотношения отбираемого расхода Q_v и расхода водотока Q_p , определяется из условия гарантированного обеспечения потребителей водными ресурсами. Для бесплотинных водозаборных гидроузлов коэффициент водозабора не должен превышать 20%

$$\alpha = Q_v / Q_p \leq 0,20. \quad (3)$$

По известному коэффициенту водозабора α , ширину водоприемного фронта b и ширину зарегулированного участка русла B можно определить требуемую величину стеснения (перекрытия) русла n наносозащитным порогом. Величину n рекомендуется находить по формуле А. С. Образовского

$$n = b_d / B = 1,17 \cdot \alpha + 0,468 \cdot b / B. \quad (4)$$

Анализ полученных нами экспериментальных данных показал, что использование зависимости (4) позволяет с достаточной для практических целей точностью определять величину стеснения потока исходя из условий обеспечения надежной защиты водоприемника от завлечения русловых наносов.

Наносозащитный порог рекомендуется устанавливать под углом $\beta = 45^\circ$ к береговой линии. При данном расположении преграды получают достаточное развитие защитные функции формируемой в потоке искусственной поперечной циркуляции и винтовых течений вдоль верховой грани порога; кинематическая структура потока за порогом также способствует уменьшению процента

завлеченных в отвод наносов. Необходимо отметить, что устройство наносозащитных порогов с $\beta = 45^\circ$ позволяет без снижения защитных функций преграды добиться значительного уменьшения длины порога в сравнении с ранее рекомендованными [8] углами установки порога $\beta = 15^\circ \dots 30^\circ$.

Зная требуемую величину стеснения русла n , ширину зарегулированного участка русла B и угол установки порога к береговой линии β , можно определить требуемую длину наносозащитного порога l_n

$$l_n = n \cdot B / \sin \beta. \quad (5)$$

В соответствии с результатами наших исследований косонаправленные донные циркуляционные пороги следует устраивать с уклоном верхней грани по течению $i_n > 0$ и относительной высотой в средней части преграды $P_{отн} = P_{cp} / H_o = 0,35 \dots 0,5$ во всем диапазоне колебания уровней воды в реке. Здесь $P_{cp} = (P_n + P_k) / 2$ – высота донного циркуляционного порога в его средней части, равная полусумме высот порога в его начальной и концевой частях, H_o – средняя глубина бытового русла. При соблюдении данных рекомендаций порог работает как затопленная преграда, и защитные функции ИПЦ и винтовых течений в створе порога получают наибольшее развитие.

По известным максимальному и минимальному уровням воды в реке $H_{o,max}$ и $H_{o,min}$, можно определить требуемую высоту донного циркуляционного порога в его средней части P_{cp}

$$0,35 \cdot H_{o,max} \leq P_{cp} \leq 0,5 \cdot H_{o,min}. \quad (6)$$

Условие (6) соблюдается в том случае, если соотношение между максимальным и минимальным уровнями не превышает 1,428 во всем диапазоне колебания горизонтов воды в реке. На реках с резко переменными уровнями воды низовой борт водоприемного отверстия рекомендуется выполнять в виде вертикальной стенки, параллельной донному порогу [9].

Высота порога в его концевой части P_k в соответствии с рекомендациями [9] не должна быть меньше $H_o / 6$. Анализ полученных нами экспериментальных данных свидетельствует о том, что винтовое течение вдоль верховой грани

порога начинает разрушаться на участке порога с высотой $P_x \leq 0,25$. Поэтому рекомендуется устраивать пороги с $P_k \geq 0,25 \cdot H_{0,\max}$.

Зная длину донного наносорегулирующего порога l_n , высоту преграды в ее средней и концевой частях (P_{cp} и P_k соответственно), высоту порога в его начальной части P_n можно определить как

$$P_n = 2 \cdot P_{cp} - P_k. \quad (7)$$

Уклон верхней грани порога определяется как

$$i_n = (P_n - P_k) / l_n. \quad (8)$$

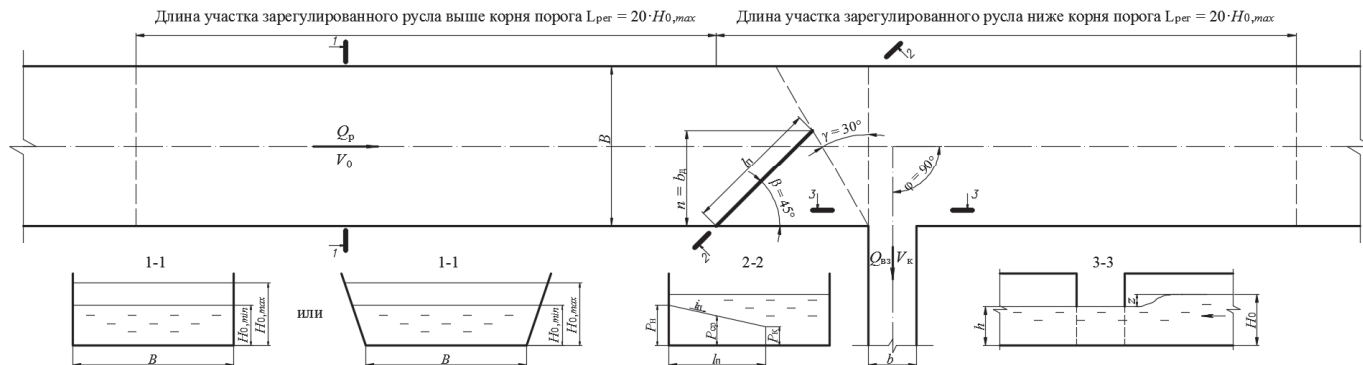
Концевой участок косонаправленных донных циркуляционных порогов рекомендуется располагать на луче, проведенном под углом $\gamma = 30^\circ$ к верховому ребру водоприемника. Начальный участок порога (его корень) сопрягается непосредственно с берегом, от которого осуществляется забор воды.

В конструктивном отношении наносозащитный порог рекомендуется устраивать монолитным железобетонным с геометрическими характеристиками, определенными в соответствии с выше указанными рекомендациями.

При резко переменных уровнях воды в реке предпочтительно осуществлять водозабор переливом через шандоры, что должно дополнительно уменьшить процент завлеченных в отвод русловых наносов.

Обновленные рекомендации по проектированию и эксплуатации косонаправленных донных циркуляционных порогов в составе бесплотинных водозаборов на малых горных реках в графической форме представлены на рисунке 1.

Рисунок 1. Принципиальная компоновочная схема бесплотинного водозаборного гидроузла с донным КЦП на малой горной реке



Условные обозначения: Q_p – расход реки, $Q_{вз}$ – величина отбираемого расхода, B – ширина подводящего русла по дну, b – ширина отвода, b_d – ширина захвата отводом донных линий токов, n – величина стеснения потока, l_n – длина донного циркуляционного порога, P_n – высота донного порога у берега, с которого осуществляется забор воды, P_{cp} и P_k – высоты донного порога в средней и концевой частях соответственно, i_n – уклон верхней грани порога, V_k – средняя скорость потока в отводе, V_0 – средняя скорость реки, H_0 – средняя глубина воды в реке, $H_{0,max}$ и $H_{0,min}$ – средняя максимальная и средняя минимальная глубина воды в реке соответственно, β – угол установки порога к береговой линии, γ – угол между лучами, проведенными от верхового ребра водоприемника к концевой части порога и противоположному берегу, ϕ – угол отвода потока, z – потери напора на входе в отвод, h – глубина воды в реке ниже отвода.

$$\phi = 90^\circ, \beta = 45^\circ, \gamma = 30^\circ$$

$$n = b_d/B = 1,17 \cdot \alpha + 0,468 \cdot b/B P_{cp} = (P_n + P_k)/2$$

$$\alpha = Q_{вз}/Q_p \leq 0,20 l_n = n \cdot B/\sin \beta$$

$$P_k \geq 0,25 \cdot H_{0,max}$$

$$Q_v = \varepsilon \cdot \phi \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot z} \rightarrow b, h 0,35 \cdot H_{0,max} \leq P_{cp} \leq 0,5 \cdot H_{0,min} P_n = 2 \cdot P_{cp} - P_k$$

$$z = (1,21 - 0,21 \cdot \cos \phi) \cdot V_0^2 / 2 \cdot g H_{0,max} / H_{0,min} \leq 1,428$$

$$i_n = (P_n - P_k)/l_n$$

ε – коэффициент бокового сжатия, ϕ – коэффициент скорости, зависящие от входной формы входного отверстия водоприемника и определяемые в соответствии с рекомендациями [12]. Для предлагаемой компоновочной схемы водозаборного гидроузла значения ε и ϕ с приемлемой для практических расчетов точностью могут быть приняты равными 0,8 и 0,9, соответственно.