

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 627.41

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-318-333

Комплекс конструкций и сооружений для защиты берегов рек и каналов от эрозии

Александр Михайлович Анохин¹, Александр Юрьевич Гарбуз²

¹Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

²Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация

¹anocxin2014@yandex.ru

²A.Y.Garbuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1503-7300>

Аннотация. Цель: обобщение накопленного опыта разработки конструкции ступенчатой шпоры, проверенной прошедшими наводнениями на р. Баффелджаги, Дуйвенхокс и Хекс Западной Капской провинции в ЮАР, и предложение защитной конструкции от карчехода, которая направлена на беспрепятственное движение водного потока и перехват всех дрейфующих деревьев и их частей. **Материалы и методы.** Многочисленные берегозащитные сооружения, построенные на р. Кубани, не выполняют своих защитных функций, а провоцируют размыв берегов, что негативно сказывается на сооружении в целом. Востребованность ступенчатых шпор и дефицит рекомендаций по их проектированию и применению определяют актуальность их разработки и использования в сложных инженерных условиях. Основу научной разработки составили материалы, которые собраны во время наводнений 2000, 2004, 2006 и 2008 гг. на крупных реках Баффелджаги, Дуйвенхокс и Хекс Западной Капской провинции в ЮАР. При разработке комплекса защитных сооружений использовались общепринятые методики научного анализа, синтеза и конструирования гидротехнических сооружений. **Результаты.** При выполнении исследований установлены достоинства компоновочных решений применяемых конструкций шпор, определены достоинства и условия применения конструкций во время наводнений. Выполнены разработки, направленные на усиление достоинств и устранение недостатков конструктивных решений сооружений по обеспечению защиты их от карчехода. Конструкции могут быть выполнены в виде крестообразных балок или Т-образных элементов, смонтированных на продольной балке. **Выводы.** Предложены конструкции, которые позволяют защитить шпоры от повреждения карчеходом, представляют собой единый комплекс защитных сооружений. Сформулированы предложения по компоновочно-конструктивному устройству комплекса сооружений.

Ключевые слова: берегозащитные сооружения, шпоры, размыв берегов, меандрирование рек, скорость потока, наносы, гидрологический режим, эрозия берегов

Для цитирования: Анохин А. М., Гарбуз А. Ю. Комплекс конструкций и сооружений для защиты берегов рек и каналов от эрозии // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 318–333. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-318-333>.

HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

A complex of river bank-and-canal protection structures and facilities from erosion

Alexander M. Anokhin¹, Alexander Yu. Garbuz²

¹Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

²Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹anocxin2014@yandex.ru

²A.Y.Garbuz@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1503-7300>

Abstract. Purpose: to generalize the current experience in the development of a design of a stepped spur, tested by past floods on the rivers Buffeljags, Duiwenhoks and Hex of the Western Cape province in the Republic of South Africa, and to propose a protective structure against debris loading (carchehod), which is aimed at the unhindered water flow movement and the capture of all drifting trees and their parts. **Materials and methods.** Numerous bank protection structures built on the river Kuban, do not fulfill their protective functions, but provoke bank erosion, which affects negatively the structure as a whole. The demand for stepped spurs and the lack of recommendations on their design and use determine the relevance of their development and use in difficult engineering conditions. The basis of scientific development were the data collected during the floods of 2000, 2004, 2006 and 2008 on the large rivers Buffeljags, Duiwenhoks and Hex of the Western Cape province in the Republic of South Africa. When developing a complex of protective structures, the generally accepted methods of scientific analysis, synthesis and design of hydraulic structures were used. **Results.** During the research, the advantages of the layout solutions of the used spur structures were determined, the advantages and conditions for structure usage during floods were found. The developments aimed at strengthening the advantages and eliminating the design flaws of the structures to ensure their protection from carchehod have been carried out. The structures can be made in the form of cruciform beams or T-shaped elements mounted on a longitudinal beam. **Conclusions.** The designs allowing protecting the spurs from damage by a debris loading (carchehod) have been proposed, they represent a single complex of protective structures. Proposals on the layout and design arrangement of the structures complex are formulated.

Keywords: bank protection structures, spurs, bank washout, river meandering, flow rate, sediment, hydrological regime, bank erosion

For citation: Anokhin A. M., Garbuz A. Yu. A complex of river bank-and-canal protection structures and facilities from erosion. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(2):318–333. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-318-333>.

Введение. Меандрирование русел рек подвергает эрозии значительные территории плодородных земель и заставляет принимать меры для искусственного изменения бытового режима рек. Защитные конструкции, методы их проектирования и область применения зависят от большого количества факторов и поставленных задач. Существенное значение имеет

региональный характер участка реки, скорости водного потока, состав и количество наносов, гидрологический режим и ряд других факторов¹.

Одной из проблем, которые вызваны наводнениями, а также интенсивными проливными дождями, является опасность перемещения водным потоком древесного мусора. Данный факт приводит к тому, что при транспортировании крупных древесных включений образуется эрозия в верховьях рек, завалы мостов, перегораживающих сооружений и разрушаются близлежащие дома. Древесный мусор образуется в результате подмыва и смещения поваленных и срубленных деревьев².

Во время наводнения поток смывает с водосборной площади весь крупный и мелкий мусор (деревья, части строений и др.) и транспортирует его до первого препятствия, где и происходит его накопление. Особо опасно накопление крупного мусора и деревьев на железнодорожных мостах и водопропускных сооружениях, что подтверждается наводнениями на реках. Мусоронакопление может неблагоприятно повлиять на движение потока через водопропускную структуру, могут образовываться размывы в его структуре, увеличиваться нагрузки на конструкции и затапливаться территории.

Для защиты объектов инфраструктуры в районах, расположенных выше по течению, необходимо строить различные виды сооружений, предотвращающих опасности, связанные с крупным древесным мусором, например, на водосборной площади щелевая плотина и защитный комплекс для водопропускных сооружений и мостов речных русел. Многие исследования были направлены на определение параметров сооружений и расчетных зависимостей, позволяющих применять различные конструктивно-

¹Маккавеев Н. И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 347 с.

²Алтунин С. Т. Регулирование русел рек при водозаборе. М.: Сельхозгиз, 1950. 248 с.

технические решения и обеспечивать защиту от негативного воздействия карчехода мостов и сооружений³.

В этой связи была определена цель исследований, состоящая в обосновании конструкций защиты от карчехода на территории, подверженной затоплению, которые направлены на беспрепятственное движение водного потока и перехват всех дрейфующих деревьев и их частей.

Материалы и методы. Фактологическую базу разработки составили данные, собранные во время наводнений 2000, 2004, 2006 и 2008 гг. на р. Баффелджаги, Дуйвенхокс и Хекс Западной Капской провинции в ЮАР. Применяемая технология была собрана из опыта, накопленного в течение последних 10–15 лет. Реки, на которых были построены шпоры, – главным образом предгорного типа реки Западного Мыса с каменистым и песчаным дном (рисунок 1) [1–5].



**Рисунок 1 – Шпоры на вогнутом берегу р. Баффелджаги [6]
Figure 1 – Spurs on the concave bank of the Buffeljags River [6]**

Результаты и обсуждение. При проектировании положения шпор для обеспечения защиты берегов рек необходимо определить следующие параметры:

- минимальную ширину реки с учетом уклона водной поверхности и

³Андреев О. В. Проектирование мостовых переходов. М.: Автотранспорт, 1960. 295 с.

данных аэрофотосъемки по стабильности заполнения русла за последние 20 лет;

- проектное русло реки планируется путем объединения прямых и криволинейных участков меандров русла (рисунок 2).

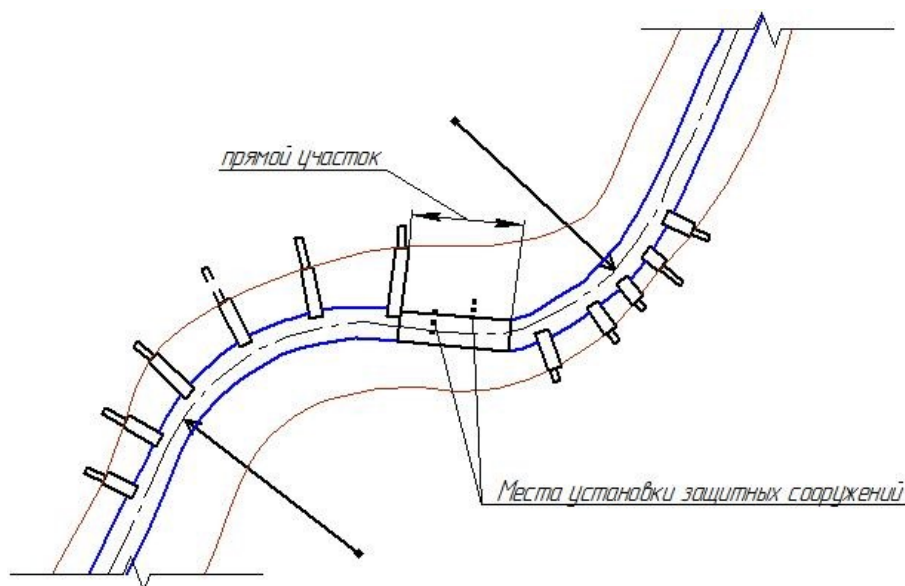
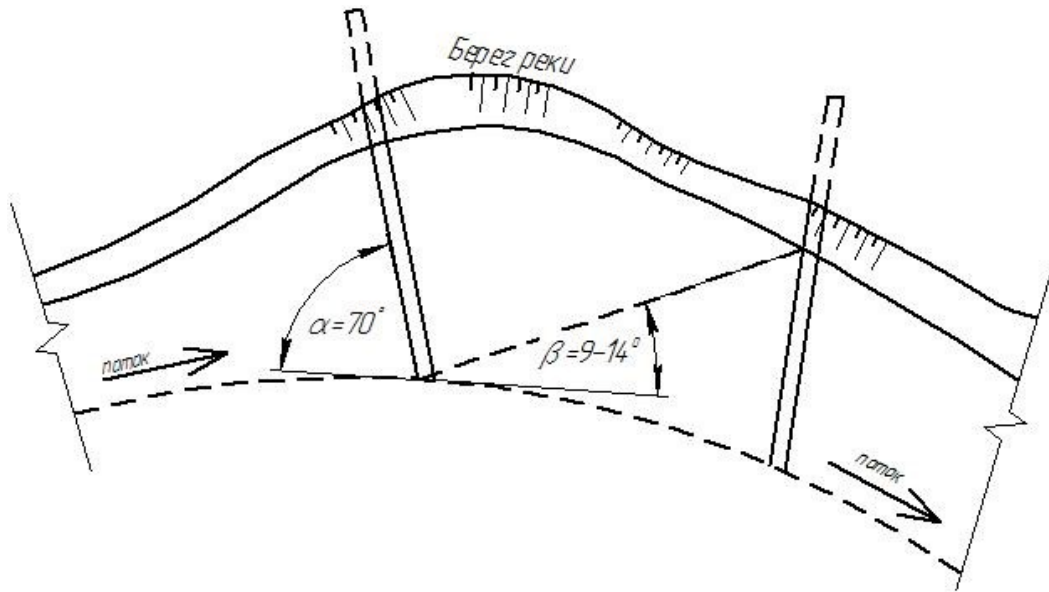


Рисунок 2 – Комплекс шпор и мусорозащитных конструкций, совмещенных с геометрией реки
Figure 2 – A complex of spurs and waste protection structures combined with the river geometry

Расположение шпор выполнялось в соответствии с условиями проектирования защитных сооружений на повороте русла:

- на повороте шпоры размещены только на внешнем берегу;
- ось сооружения находится под прямым углом к запланированному направлению потока реки;
- нос каждого сооружения находится на внешнем крае планируемой ширины реки [7, 8].

Графически расстояние между сооружениями определялось по параметрам реки и из предположения, что вторая шпора ниже по потоку не должна быть расположена далее места, где луч, отклоняющийся на $9\text{--}14^\circ$ от касательной к намеченной оси реки, построенной в начале первого волнолома, пересекается с берегом (рисунок 3).



α – угол луча первого волнолома, градусы;
 β – угол касательной к намеченной оси реки от начала волнолома, градусы
 α – the beam angle of the first breakwater, degrees; β – the angle of the tangent to the intended river axis from the beginning of the breakwater, degrees

**Рисунок 3 – Графическое определение
максимального расстояния между шпорами**

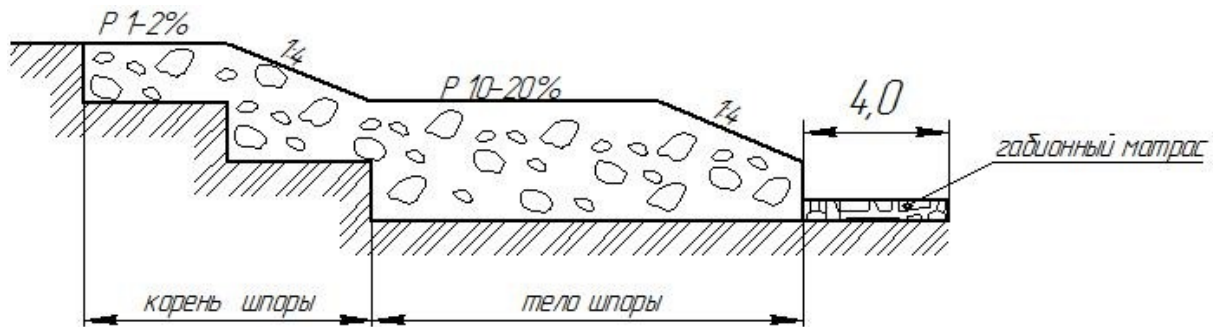
**Figure 3 – Graphical determination
of the maximum distance between spurs**

Профиль шпоры состоит из горизонтальных секций и наклонных участков в соотношении 1:4. Было определено, что вертикальные стороны на длинной секции вызывают вихри, которые стимулируют осаждение наносов или размыв дна и являются причиной уменьшения скорости в реке.

Различные части шпоры запроектированы на разных уровнях с целью разделения влияния сооружения на поток реки при разных уровнях паводка. Поверхность тела шпоры планируется проектировать на уровне прохождения паводка 10% обеспеченности и год 20% обеспеченности.

Корень шпоры располагают на глубину потока между 2% и 1% обеспеченностью. Корень врезается не менее чем на 8 м в коренной грунт берега до точки, где не будет размыва грунта (рисунок 4).

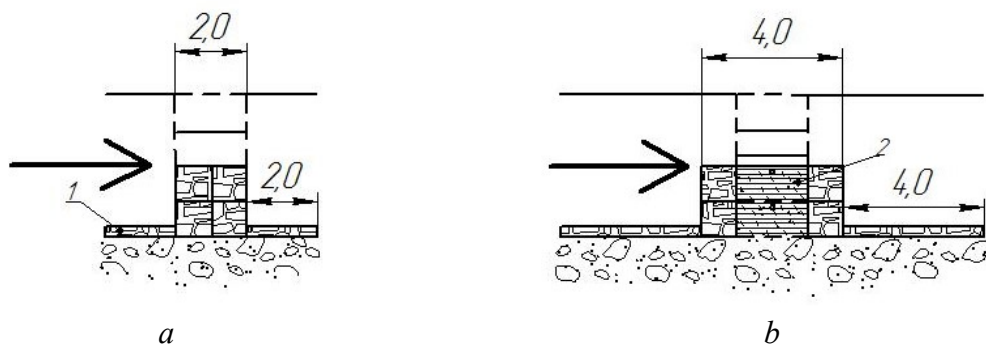
Проектирование более широкого тела шпоры вызвано необходимостью увеличения массы конструкции для защиты от ударов карчей, которые разрушают сооружение.



P – обеспеченность прохождения паводка, %
 P – the flood passing probability, %

Рисунок 4 – Продольный профиль шпоры
Figure 4 – The spur longitudinal profile

Поперечное сечение шпоры показано на рисунке 5.



a – стандартное сечение; b – усиленное сечение;
 1 – габионный матрас; 2 – габионные блоки
 a – standard cross-section; b – reinforced cross-section;
 1 – gabion mattress; 2 – gabion blocks

Рисунок 5 – Поперечное сечение шпоры
Figure 5 – The spur cross section

Размыв дна около концевой части шпоры и ее просадка являются наиболее распространенными формами выхода из строя сооружения [9–11].
 Для защиты от этого:

- не должно быть никаких вертикальных граней на длинной секции конструкции, которые могут вызвать вихри, размывающие дно реки около головы;

- ширина матраса 4 м проектируется по дну вокруг всего сооружения до верхней части берега как защита от эрозии фундамента во время наводнений;

- необходимо защитить тело волнолома, если оно из габионов, от плавающих карчей.

В результате исследований определено, что худшая нагрузка возникает, когда большие пни ударяют сооружение со скоростью 4–6 м/с или карчи застревают в верхней части сооружения и увеличивают эффективную высоту конструкции и сопротивление потоку, тем самым увеличивают силы, сдвигающие части сооружения (рисунок 6) [12].



Рисунок 6 – Повреждение деревьями шпора [6]

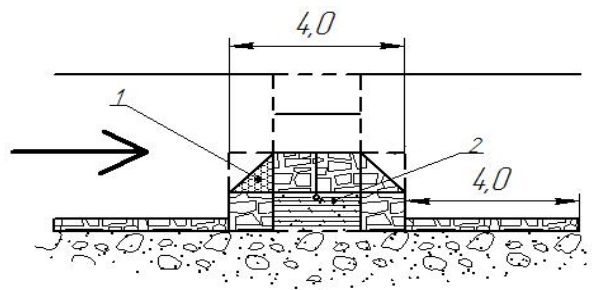
Figure 6 – Damage to the spur by trees [6]

По результатам обследований, после наводнения многие крупные деревья диаметром до 500 мм и длиной более 5,0 м лежали в реке и на шпорах. Например, на р. Баффелджаги был нанесен значительный ущерб сооружениям плавающими деревьями. Выше по потоку стороны некоторых матрасов были сняты и перенесены, особенно на первых шпорах. Возможно, ветви плавающих деревьев, как крючком, поднимали матрас и течением воды запрокидывали на сооружение [12–15]. На рисунке 7 показана шпора с деформированным матрасом.



Рисунок 7 – Матрас, поднятый потоком [6]
Figure 7 – Mattress raised by the flow [6]

Анализируя последствия наводнений, решили изменить поперечное сечение шпор. Поперечное сечение шпоры трансформировано путем проектирования наклонных граней, как показано на рисунке 8. Цель добавления верхней по течению наклонной грани – защита от карчехода, нижней по течению – ослабление образования турбулентных вихрей за сооружением.



1 – наклонная грань на входе сооружения; *2* – габионные блоки
1 – inclined face at the entrance of the structure; *2* – gabion blocks

Рисунок 8 – Предлагаемая новая конструкция сечения
Figure 8 – Proposed new section design

Плавающие карчи и деревья, как показали наводнения 2000, 2004, 2006 и 2008 гг., являются серьезной угрозой для защитных сооружений,

особенно габионной конструкции. Одним из важных параметров транспортирования мусора является траектория его движения по реке. Если рассмотреть гидравлическую структуру реки, где могут быть прямые и изогнутые участки (меандры), и принять размеры мусора намного меньше ширины реки, то его движение будет происходить по тальвегу, в зоне максимальных скоростей (рисунок 9) [12].

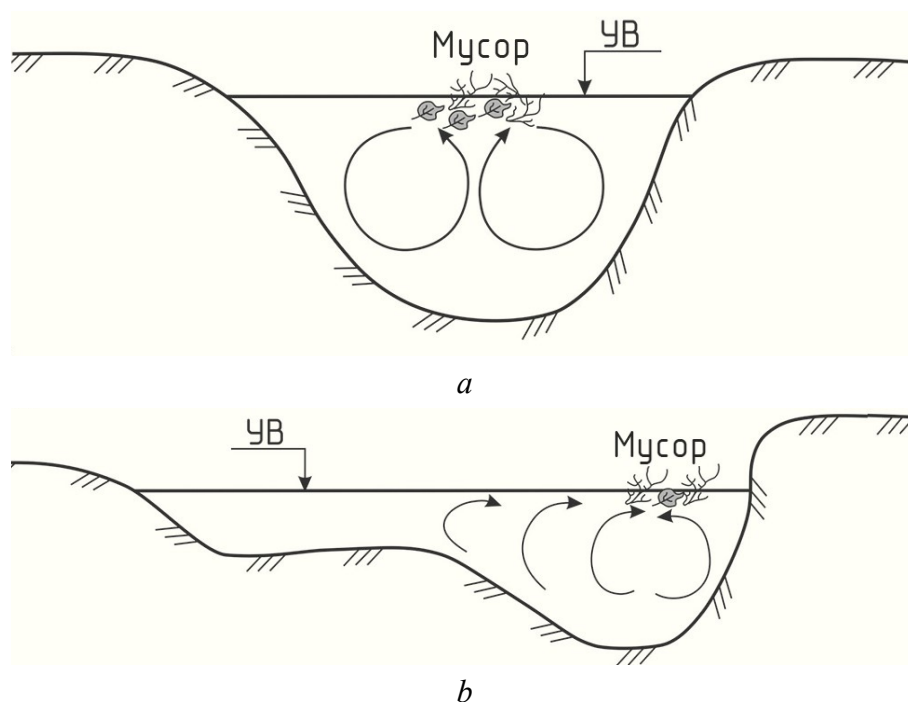


Рисунок 9 – Схема движения мусора на прямом (а) и изогнутом (b) участках реки

Figure 9 – The scheme of movement of garbage on the straight (a) and curved (b) sections of the river

Многие исследователи отмечают влияние морфологии русла на движение и распределение дрейфа, поэтому классификация русел с дрейфующими деревьями поможет обосновать количественную характеристику мусора [13]. В связи с этим выделим следующие параметры русла, влияющие на движение мусора:

- ширина и извилистость русла;
- средний диаметр, длина и объем массы мусора увеличиваются с ростом ширины русла, расхода потока.

Многоводные реки транспортируют большую часть мусора, в то время как маловодные потоки перемещают скопления обломков деревьев; расход водного потока, ширина, уклон и глубина пропорционально связаны с диаметром и длиной переносимого материала.

Мусор и деревья, накопленные на островах или на отмелях, мало влияют на загруженность русла, кроме периодов высоких половодий; части деревьев, длина которых меньше, чем ширина русла, и диаметр меньше, чем глубина, будут транспортированы в нисходящем направлении до препятствия [16].

В этой связи предлагается выделить категории участков реки по влиянию на движение мусора поймы, русла и их морфологии [16, 17].

Категория участка реки определяется условиями продвижения мусора и задержки его на берегах и пойме реки, возможностью его остановки специальными сооружениями или морфологическими элементами русла и позволяет оценить опасность объема мусора.

Для беспойменных участков реки I категории характерны значительные по величине глубина, ширина и скорость, что приводит к беспрепятственному движению мусора по фарватеру глубин. На таких участках наблюдается частичное скопление крупных деревьев на берегах или на изгибах русла за пределами меандров.

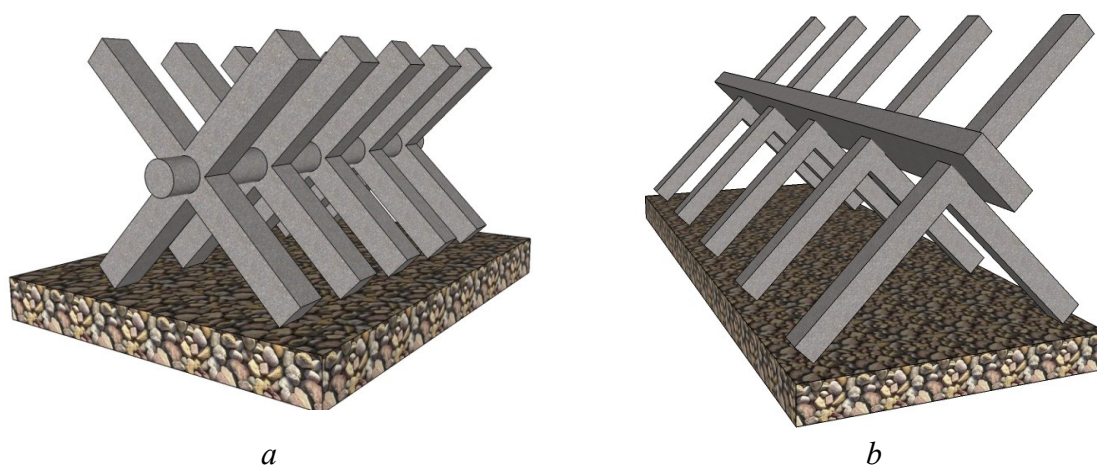
Участки II категории с широкой незаросшей поймой характеризуются наличием вторичных течений, извилистостью потока, образованием заводей и небольшими глубинами. На таких участках возможно контролировать движение мусора, применяя мусорозащитные сооружения, а при спаде уровня воды здесь происходит остановка и скопление деревьев до следующего паводка на островах, выпуклых берегах меандров. Ширина русла и его извилистость являются основными факторами управления дрейфующим материалом и его распределения [16].

Траектория крупного мусора подчиняется законам гидравлики рус-

ловых процессов реки. На меандрах карчи и крупные деревья обязательно будут контактировать с защитными сооружениями, и эти контакты будут не в пользу последних. На повороте шпоры размещены только на внешнем берегу и карчи будут потоком сноситься к этому берегу, поэтому необходимо предусмотреть защиту этого берега от плавающего крупного мусора.

Предлагаемые конструкции после заполнения дрейфующим мусором превращаются в препятствия, регулирующие русловой поток, и правильная их установка может направлять дрейф в старицы, острова, где он может складироваться, или для прохода под мостом. Количество сооружений будет зависеть от количества карчехода, его размеров, морфологических элементов русла и расположения мест естественной задержки деревьев и их частей.

На рисунке 10 приведены участки реки, где возможно установить разработанные защитные конструкции от карчехода [17].



a – крестообразные элементы; *b* – Т-образные элементы
a – cruceiform elements; *b* – T-shaped elements

Рисунок 10 – Конструкции защитных сооружений
Figure 10 – Constructions of protective structures

Конструкции перехватят движущийся поток деревьев и как направляющие сооружения будут направлять их к середине реки. Конструкции состоят из элементов, которые монтируются на общей оси, длина ее зависит от количества элементов и расстояния между ними. Конструкции могут

быть выполнены в виде крестообразных балок или Т-образных элементов, смонтированных на продольной балке (см. рисунок 10). Компоновка сооружений на территории, подверженной затоплению, должна обеспечить перехват всех дрейфующих деревьев и их частей и создать условия для беспрепятственного движения потока.

Количество сооружений будет зависеть от количества карчехода, его размеров, морфологических элементов русла и расположения мест естественной задержки деревьев и их частей [16, 17].

Выводы. Разработанные и проверенные в натуральных условиях конструкции ступенчатых шпор выдержали наводнения в 2000, 2004, 2006 и 2008 гг. на р. Баффелджаги, Дуйвенхокс и Хекс Западной Капской провинции в ЮАР без существенных деформаций тела и корней сооружения. Деформаций береговой линии при обследованиях не отмечено, что доказывает работоспособность сооружений и их параметров.

Проектирование защитных сооружений для обеспечения стабильности берегов рек требует разработки и усовершенствования комплекса сооружений, состоящих из элементов, изменяющих бытовой режим рек, например шпор, и защищающих их от повреждений карчеходом русловых многофункциональных сооружений.

Список источников

1. Волосухин В. А., Шурский О. М. Наводнение на Кубани. Проблемы и задачи // Гидротехника. 2012. № 4(29). С. 6–9.
2. Водоподпорные и водопропускные гидротехнические сооружения: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1 / А. А. Ткачев [и др.]. Новочеркасск, 2023. 273 с.
3. Беркович К. М., Злотина Л. В. К оценке опасности горизонтальных деформаций русла // Закономерности проявления эрозионных и русловых процессов в различных природных условиях: материалы V Всерос. науч. конф. с междунар. участием, объедин. с XXXIV пленар. совещ. Межвуз. науч.-координац. совета по проблеме эроз., русловых и устьевых процессов. М.: Ленанд, 2019. С. 111–112.
4. Breusers H. N. C., Raudkivi A. J. Scouring. Hydraulic Structures Design Manual Series. Vol. 2, 1991. 152 p. DOI: 10.1201/9781003079477.
5. Knight S. S., Locke M. A., Smith S. Effects of agricultural conservation practices on oxbow lake watersheds in the Mississippi River alluvial plain // Soil and Water Research. 2013. 8(3). P. 113–123. DOI: 10.17221/45/2012-SWR.

6. King H. The use of groynes for riverbank erosion protection // Conference: River Hydraulics, Stormwater & Flood management / University of Stellenbosch. 2009. 20 p.

7. Considerations for assessments of wadable drainage systems in the agriculturally dominated deltas of Arkansas and Mississippi / W. W. Stephens, M. T. Moore, J. L. Farris, J. L. Bouldin, C. M. Cooper // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2008. 55(3). P. 432–441. DOI: 10.1007/s00244-008-9136-3.

8. Overcoming challenges for implementing nature-based solutions in deltaic environments: Insights from the Ganges-Brahmaputra delta in Bangladesh / A. K. Gain, M. M. Rahman, M. S. Sadik, K. G. Rogers, J. M. van Loon-Steensma // Environmental Research Letters. 2022. 17(6). 064052.

9. Effect of an extreme flood event on solute transport and resilience of a mine water treatment system in a mineralised catchment / W. M. Mayes, M. T. Perks, A. R. G. Large, P. A. H. Orme, A. P. Jarvis // Science of the Total Environment. 2021. 750. 141693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141693>.

10. Sing E. F. Flow diversion in a steep, coarse-bed stream // Proceedings National Conference on Hydraulic Engineering. 1993. Pt. 2. P. 2389–2394.

11. The land–river interface: a conceptual framework of environmental process interactions to support sustainable development / R. C. Grabowski, K. Vercruyse, I. Holman, A. Azhoni, B. Bala, V. Shankar, J. Beale, S. Mukate, A. Poddar, J. Peng, J. Meersmans // Sustainability Science. 2022. 17(4). P. 1677–1693. <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01150-x>.

12. Vercruyse K., Grabowski R. C. Human impact on river planform within the context of multi-timescale river channel dynamics in a Himalayan river system // Geomorphology. 2021. 381. 107659. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107659>.

13. Developing spatial prioritization criteria for integrated urban flood management based on a source-to-impact flood analysis / K. Vercruyse, D. A. Dawson, V. Glenis, N. Wright, C. Kilsby // Journal of Hydrology. 2019. 578. 124038. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124038>.

14. Large variations in global irrigation withdrawals caused by uncertain irrigation efficiencies / A. Puy, B. Lankford, J. Meier, S. van der Kooij, A. Saltelli // Environmental Research Letters. 2022. 17(4). 044014. DOI: 10.1088/1748-9326/ac5768.

15. Parola A. C., Apelt C. J., Jempson M. A. Debris forces on highway bridges. Washington D. C.: National Academy Press, 2000. No. 445. 78 p.

16. Анохин А. М., Воронин Н. С., Залавский В. Н. Защита искусственных сооружений от дрейфующего мусора // Путь и путевое хозяйство. 2017. № 9. С. 2–5.

17. Пат. 2533912 Российская Федерация, МПК⁶ Е 02 В 3/02. Способ очистки русел рек вблизи мостов / Анохин А. М.; патентообладатель Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. № 2013118901/13; заявл. 23.04.13; опубл. 27.11.14, Бюл. № 33. 5 с.

References

1. Volosuhin V.A., Shurskij O.M., 2012. *Navodnenie na Kubani. Problemy i zadachi* [Floods in Kuban. Problems and tasks]. *Gidrotehnika* [Hydraulic Engineering], no. 4(29), pp. 6-9. (In Russian).

2. Tkachev A.A. [et al.], 2023. *Vodopodpornye i vodopropusknye gidrotehnicheskie sooruzhenija: uchebnoe posobie* [Water-Retaining and Culvert Hydraulic Structures: textbook]. In 2 parts, pt. 1, Novocherkassk, 273 p. (In Russian).

3. Berkovich K.M., Zlotina L.V., 2019. *K otsenke opasnosti gorizontal'nykh deformatsiy rusla* [On assessment of the channel horizontal deformations danger]. *Zakonomernosti proyavleniya erozionnykh i ruslovykh protsessov v razlichnykh prirodnykh usloviyakh: materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, ob"ed. s XXXIV plenarnym soveshchaniem Mezhvuzovskogo nauchno-koordinatsionnogo soveta po probleme erozii, ruslovykh i ust'evykh protsessov* [The Manifestation Patterns of Erosion and

Fluvial Processes under Various Environmental Conditions: The Proceedings of the V All-Russian Scientific Conference with International Participation and the XXXIV Plenary Meeting of the Interuniversity Research Coordination Problem Council on Soil Erosion and Fluvial Processes]. Moscow, Lenand Publ., pp. 111-112. (In Russian).

4. Breusers H.N.C., Raudkivi A.J., 1991. Scouring. Hydraulic Structures Design Manual Series, vol. 2, 152 p., DOI: 10.1201/9781003079477.

5. Knight S.S., Locke M.A., Smith S., 2013. Effects of agricultural conservation practices on oxbow lake watersheds in the Mississippi River alluvial plain. Soil and Water Research, no. 8(3), pp. 113-123, DOI: 10.17221/45/2012-SWR.

6. King H., 2009. The use of groynes for riverbank erosion protection. Conference: River Hydraulics, Stormwater & Flood Management. University of Stellenbosch, 20 p.

7. Stephens W.W., Moore M.T., Farris J.L., Bouldin J.L., Cooper C.M., 2008. Considerations for assessments of wadable drainage systems in the agriculturally dominated deltas of Arkansas and Mississippi. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, no. 55(3), pp. 432-441, DOI: 10.1007/s00244-008-9136-3.

8. Gain A.K., Rahman M.M., Sadik M.S., Rogers K.G., van Loon-Steensma J.M., 2022. Overcoming challenges for implementing nature-based solutions in deltaic environments: Insights from the Ganges-Brahmaputra delta in Bangladesh. Environmental Research Letters, 17(6), 064052.

9. Mayes W.M., Perks M.T., Large A.R.G., Orme P.A.H., Jarvis A.P., 2021. Effect of an extreme flood event on solute transport and resilience of a mine water treatment system in a mineralised catchment. Science of the Total Environment, 750, 141693, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141693>.

10. Sing E.F., 1993. Flow diversion in a steep, coarse-bed stream. Proceedings National Conference on Hydraulic Engineering, pt. 2, pp. 2389-2394.

11. Grabowski R.C., Vercruyse K., Holman I., Azhoni A., Bala B., Shankar V., Beale J., Mukate S., Poddar A., Peng J., Meersmans J., 2022. The land–river interface: a conceptual framework of environmental process interactions to support sustainable development. Sustainability Science, no. 17(4), pp. 1677-1693, <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01150-x>.

12. Vercruyse K., Grabowski R.C., 2021. Human impact on river planform within the context of multi-timescale river channel dynamics in a Himalayan river system. Geomorphology, 381, 107659, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107659>.

13. Vercruyse K., Dawson D.A., Glenis V., Wright N., Kilsby C., 2019. Developing spatial prioritization criteria for integrated urban flood management based on a source-to-impact flood analysis. Journal of Hydrology, no. 578, 124038, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124038>.

14. Puy A., Lankford B., Meier J., van der Kooij S., Saltelli A., 2022. Large variations in global irrigation withdrawals caused by uncertain irrigation efficiencies. Environmental Research Letters, 17(4), 044014, DOI: 10.1088/1748-9326/ac5768.

15. Parola A.C., Apelt C.J., Jempson M.A., 2000. Debris forces on highway bridges. Washington D. C., National Academy Press, no. 445, 78 p.

16. Anokhin A.M., Voronin N.S., Zalavsky V.N., 2017. *Zashchita iskusstvennykh sooruzheniy ot dreyfuyushchego musora* [Protection of Artificial Structures from Drifting Debris]. *Put i putevoe khozyaystvo* [Railway Track and Facilities], no. 9, pp. 2-5. (In Russian).

17. Anokhin A.M., 2014. *Sposob ochistki rusel rek vblizi mostov* [The Method of Cleaning the Riverbeds near Bridges]. Patent RF, no. 2533912. (In Russian).

Информация об авторах

А. М. Анохин – профессор кафедры гидротехнического строительства, кандидат технических наук;

А. Ю. Гарбуз – научный сотрудник, кандидат технических наук.

Information about the authors

A. M. Anokhin – Professor of the Department of Hydraulic Engineering, Candidate of Technical Sciences;

A. Yu. Garbuz – Researcher, Candidate of Technical Sciences.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 04.05.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 06.04.2023; approved after reviewing 04.05.2023; accepted for publication 11.05.2023.