

9. Кошабо П. В., Евстигнеев С. Г. Экспериментальное изучение сопротивления сдвигу по контакту ячеистого сооружения с грунтовым основанием: Роль молодых ученых в развитии мелиоративной науки: Материалы научно-практ. студ. конф. – М.: ФГОУ ВПО МГУП, 2010. – С. 55–60.

10. Бахтин Б. М., Шарков В. П. Степень зависания грунта-заполнителя ячеек в условиях сдвига: Проблемы развития мелиорации и водного хозяйства и пути их решения: материалы Междунар. научно-практ. конф. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2011. – Ч. 3. Безопасность гидротехнических сооружений. – С. 3–12.

11. Алипов В. В. Исследование давления грунтового заполнителя в железобетонных гидротехнических сооружениях ячеистой конструкции. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1965. – Вып 12. – С. 89–103.

Материал поступил в редакцию 16.06.14.

Бахтин Бронислав Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Гидротехнические сооружения»
Тел. 8 (499) 976-24-60

Шарков Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения»
Тел. 8 (499) 976-24-60

УДК 502/504:627.8:626.22–628.113

А. В. КЛОВСКИЙ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФРОНТАЛЬНЫХ ДОННЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ПОРОГОВ ПОСТОЯННОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ ВЫСОТЫ

Рассмотрены общие вопросы проектирования и эксплуатации донных циркуляционных порогов, отмечены основные противоречия в рекомендациях по их устройству. Изложены элементы лабораторной методики исследований гидравлических условий работы фронтальных донных циркуляционных порогов. Приведены результаты сравнительного анализа эффективности работы фронтальных донных циркуляционных порогов постоянной и переменной высоты.

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

In the article discussed general questions about designing and exploitation of bottom circulation thresholds, marked the fundamental contradictions in the recommendations on their constructing. Stated the elements of the laboratorial method of hydraulic conditions of work of the front bottom circulation thresholds researching. Given the results of the comparative analysis of efficiency of the front bottom circulation thresholds with fixed and variable height.

Damless intake hydroshemes, bed loads, bottom circulation threshold, simulated transverse circulation flow.

В рамках Водной стратегии РФ до 2020 года гарантированное обеспечение водными ресурсами населения и отраслей экономики относится к числу наиболее приоритетных задач, поставленных перед учеными и инженерами водохозяйствен-

ного сектора [1]. В этой связи разработка новых и совершенствование существующих компоновочных схем и отдельных конструктивных элементов водозаборных гидроузлов, гарантирующих отбор расчетных расходов водотока с возможно

меньшим завлечением в отвод вредных руслых наносов, приобретает большое стратегическое значение.

Проблемы защиты водоприемных отверстий от взвешенных и донных наносов особенно остро встают на бесплотинных водозаборных гидроузлах, количество которых в составе водохозяйственных систем нашей страны достаточно велико. Проведенный автором анализ эффективных компоновочных схем бесплотинных водозаборов показал, что на реках с тяжелыми гидрологическими и наносными режимами хорошо себя зарекомендовали донные циркуляционные пороги конструкции Г. В. Соболина–И. К. Рудакова [2]. Предложенная авторами конструкция донного порога, эффективно перераспределяя удельные расходы по ширине подводящего русла, способствовала возбуждению в потоке искусственной поперечной циркуляции (ИПЦ), интенсивность которой оценивалась относительной величиной смещения динамической оси потока $\lambda = f/B$, где f – разница в положении центров масс эпюр удельных расходов в створе порога и на участке, находящемся вне зоны влияния порога, B – ширина подводящего русла. Искусственная поперечная циркуляция с формируемым порогом – обтекаемой потоком затопленной преградой – винтовыми течениями вдоль верховой и низовой граней порога изменяла характер движения руслых наносов в зоне влияния защищаемого водозаборного сооружения в нужном для практики направлении. (Необходимо отметить, что рекомендации по проектированию донных циркуляционных порогов имеют весьма противоречивый характер [3]. Принципиальными здесь являются вопросы целесообразности устройства порогов постоянной и переменной высоты, а также их рациональной плановой ориентации относительно береговой линии).

Для косонаправленных донных циркуляционных порогов (по Г. В. Соболину, рекомендуемый угол установки порога к берегу $\beta = 15^\circ \dots 30^\circ$, по В. С. Бондаренко, $\beta = 30^\circ \dots 60^\circ$) исследователями было сформулировано положение о необходимости придания верхней грани порога уклона по направлению течения [2, 4].

Результаты исследований донных

циркуляционных порогов, выполненных В. А. Шаумяном, показали возможность и практическую целесообразность устройства порогов фронтальными ($\beta = 90^\circ$) ввиду образования со стороны верховой грани порога застойной области, обтекаемой руслыми наносами [5]. Данная серия опытов была проведена в сравнительно узком диапазоне гидравлических режимов модельного потока и длин самого донного порога, который в условиях эксперимента имел постоянную высоту. Гидравлические условия работы фронтальных донных циркуляционных порогов переменной высоты В. А. Шаумяном не рассматривались.

Несмотря на принципиальные различия в рекомендациях по устройству донных циркуляционных порогов, все исследователи сошлись во мнении о необходимости придания порогу относительной высоты $P_{отн} = P/H_0 = (0,25 \dots 0,5)$, где P – высота донного порога, H_0 – глубина воды бытового русла. Для порогов переменной высоты $P = P_{cp} = (P_n + P_k)/2$. В этом случае возбуждаемая в потоке поперечная циркуляция распространялась вверх по течению относительно створа порога на $P = P_{cp} = (P_n + P_k)/2$ [2–5]. Данное обстоятельство несколько ограничивает возможность применения порогов с уклоном верхней грани ввиду необходимости придания их концевой части высоты не менее $H_0/4$ во всем диапазоне колебания уровней воды в реке.

На основании вышеизложенного автором было принято решение о необходимости проведения серии лабораторных исследований гидравлических условий работы фронтальных донных циркуляционных порогов постоянной и переменной высоты. Цель исследований – сравнительный анализ эффективности формирования каждым из типов порогов искусственной поперечной циркуляции, а также выявление характера влияния постоянной и переменной высоты порога на скоростной режим защитных винтовых течений вдоль его верховой и низовой граней.

Запроектированная и построенная для проведения лабораторных исследований экспериментальная установка представляла собой гидравлический лоток прямоугольного сечения шириной 1 м и

длиной рабочей части 9 м (рис. 1). Учитывая сложность изучаемых явлений, оценку эффективности работы порогов проводили «в чистом виде» – в условиях недеформированного отводом потока.

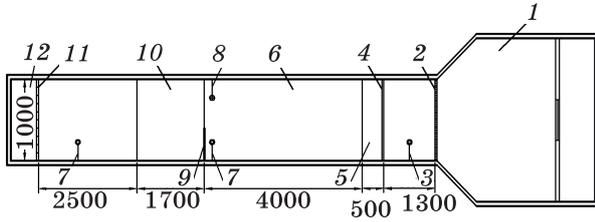


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – водоприемный бак; 2 – успокоительная решетка; 3 – шпигенмасштаб; 4 – мерный водослив; 5 – успокоительная конструкция; 6 – лоток; 7 – подвижные шпигенмасштабы; 8 – микровертушка; 9 – фронтальный донный порог; 10 – область установки порогов; 11 – жалюзный затвор; 12 – сбросной колодец

Ввиду отмеченного диапазона эффективности работы донных циркуляционных порогов, возможностей лабораторной установки и необходимости оценки объективности полученных результатов, в частности путем сопоставления с экспериментальными данными других исследователей, были исследованы пять режимов работы каждого типа порога:

- 1) $P = P_{cp} = 0,5H_0$; $H_0 = 12$ см;
 $v_0 = 25$ см / с = $0,833v_{0,max}$; $Q = 30$ л / с;
- 2) $P = P_{cp} = 0,4H_0$; $H_0 = 15$ см;
 $v_0 = 20$ см / с = $0,667v_{0,max}$; $Q = 30$ л / с;
- 3) $P = P_{cp} = 0,4H_0$; $H_0 = 15$ см;
 $v_0 = 25$ см / с = $0,833v_{0,max}$; $Q = 37,5$ л / с;
- 4) $P = P_{cp} = 0,4H_0$; $H_0 = 15$ см;
 $v_0 = 30$ см / с = $v_{0,max}$; $Q = 45$ л / с;
- 5) $P = P_{cp} = 0,3H_0$; $H_0 = 20$ см;
 $v_0 = 25$ см / с = $0,833v_{0,max}$; $Q = 50$ л / с.

Величина стеснения потока $n = l_n/B$ в условиях проведения эксперимента для обоих типов порога принимала значения 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 (длина порога $l_n = 20; 40; 60; 80$ см соответственно при постоянном значении

ширины лотка $B = 1$ м). Для порогов переменной высоты в зависимости от n менялся и уклон верховой грани порога i_n , находившийся в пределах от 0,025 до 0,1.

Чтобы определить величину смещения динамической оси потока f , скорости измеряли на 11 вертикалях в створе порога с шагом 10 см. По полученным данным были построены эпюры удельных расходов в створе порога, имевшие в каждом случае смещение центра тяжести в сторону не перекрытой порогом части русла. Для каждого расчетного случая определяли относительную величину смещения динамической оси потока $\lambda = f/B$, – один из основных показателей интенсивности возбуждаемой в потоке поперечной циркуляции. Полученные графические зависимости для порогов постоянной и переменной высоты приведены на рисунках 2 и 3.

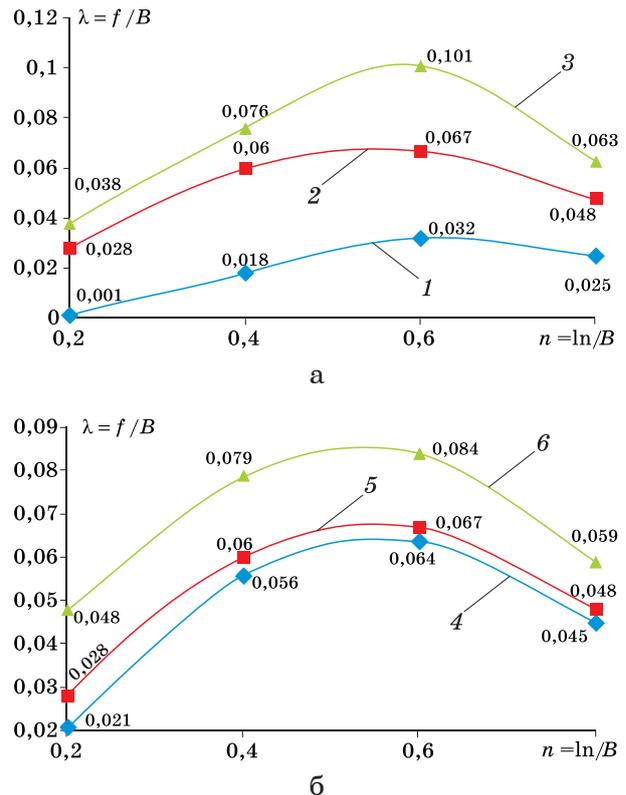


Рис. 2. Фронтальные донные циркуляционные пороги постоянной высоты: а – функциональные зависимости $\lambda = f(n)$ для рассматриваемых значений $P_{отн}$ при $v_{отн} = 0,833 = const$; б – функциональные зависимости $\lambda = f(n)$ для рассматриваемых значений $v_{отн}$ при $P_{отн} = 0,4 = const$; 1 – $P_{отн} = 0,3$; 2 – $P_{отн} = 0,4$; 3 – $v_{отн} = 0,5$; 4 – $v_{отн} = 0,667$; 5 – $v_{отн} = 0,833$; 6 – $v_{отн} = 1$

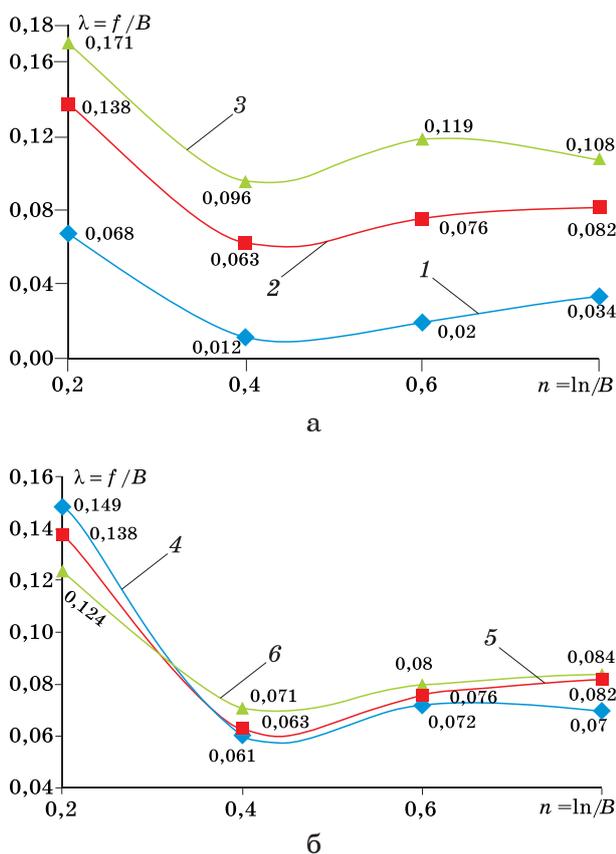


Рис. 3. Фронтальные донные циркуляционные пороги переменной высоты: а – функциональные зависимости $\lambda = f(n)$ для рассматриваемых значений $P_{отн}$ при $v_{отн} = 0,833 = \text{const}$; б – функциональные зависимости $\lambda = f(n)$ для рассматриваемых значений $v_{отн}$ при $P_{отн} = 0,4 = \text{const}$; 1 – $P_{отн} = 0,3$; 2 – $P_{отн} = 0,4$; 3 – $v_{отн} = 0,5$; 4 – $v_{отн} = 0,667$; 5 – $v_{отн} = 0,833$; 6 – $v_{отн} = 1$

Анализ полученных зависимостей показал, что в общем случае интенсивность искусственной поперечной циркуляции, возбуждаемой фронтальными донными циркуляционными порогами переменной высоты, выше, чем порогами постоянной высоты. Это положение справедливо как для фронтальных донных циркуляционных порогов [6], так и для косонаправленных донных циркуляционных порогов [2, 4]. Необходимо отметить, что придание порогу переменной высоты не снижает интенсивности защитных винтовых течений, что также подтверждает целесообразность придания верхней грани порога уклона в направлении не перекрытой части русла [7]. Для выявления степени влияния исследуемых параметров на характер гидравлических условий работы фронтальных донных порогов автором был проведен множественный

регрессионный анализ, результаты которого изложены ниже.

Полученные в результате лабораторных исследований массивы экспериментальных данных позволили достоверно оценить влияние геометрических характеристик фронтальных донных циркуляционных порогов на интенсивность возбуждаемой искусственной поперечной циркуляции во всем диапазоне изменения гидравлических режимов их работы.

С целью оценки степени влияния относительной величины средней скорости потока $v_{отн}$, относительной высоты порога $P_{отн}$, величины стеснения русла n и уклона верхней грани порога $i_{п}$ на интенсивность возбуждаемой порогами поперечной циркуляции (величину λ) автором были составлены уравнения множественной регрессии для исследованного диапазона значений рассматриваемых факторов (по методике из [8]):

для порогов постоянной высоты

$$\lambda = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3, \quad (1)$$

для порогов переменной высоты

$$\lambda = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4, \quad (2)$$

где независимые кодированные переменные x_1 – относительная величина средней скорости потока $v_{отн}$; x_2 – относительная высота порога $P_{отн}$; x_3 – величина стеснения русла n ; x_4 – величина уклона верхней грани порога $i_{п}$.

В результате проведенного регрессионного анализа для порогов постоянной высоты было получено следующее уравнение:

$$\lambda = 0,0507 + 0,0002x_1 + 0,0253x_2 + 0,0111x_3. \quad (3)$$

Качество уравнения регрессии определяли коэффициентом множественной корреляции $R = 0,7343$ и коэффициентом детерминации $R^2 = 0,5392$. Скорректированный коэффициент детерминации $\bar{R}^2 = 0,4528$. Значимость полученного уравнения по критерию Фишера $F = 6,2406 > 3,2389$ ($p < 0,05$). Корреляция между независимыми переменными отсутствует. Анализ статистической значимости параметров регрессионного уравнения с использованием t -статистики показал, что коэффициенты перед переменными x_1 и x_2 статистически не значимы ($p = 0,9753$ и $0,0649$ соответственно, что больше $p = 0,05$). Данное обстоятельство свидетельствует о фактическом отсутствии влияния средней скорости потока и величины стеснения русла на интенсивность искусственной поперечной

циркуляции, формируемой фронтальными донными порогами постоянной высоты.

Для порогов переменной высоты уравнение множественной регрессии имеет следующий вид:

$$\lambda = 0,0927 + 0,0014x_1 + 0,045x_2 + 0,0305x_4. \quad (4)$$

Исследуемый фактор x_3 исключен из уравнения регрессии ввиду мультиколлинеарности переменных x_3 и x_4 (это свидетельствует о взаимной зависимости между величинами стеснения русла n и уклона верхней грани порога i_n); при этом в первоначальном уравнении регрессии, включавшем все факторы, коэффициент перед x_4 статистически более значим по сравнению с коэффициентом перед x_3 .

Полученное уравнение имеет следующие статистические оценки:

$$R = 0,9429; R^2 = 0,8554; \bar{R}^2 = 0,8283;$$

$$F = 31,5542 > 3,2389 \quad (p < 0,05).$$

Как и для порогов постоянной высоты, коэффициент перед x_1 оказался статистически незначимым ($p = 0,7934$), что свидетельствует об отсутствии влияния средней скорости потока на интенсивность искусственной поперечной циркуляции и для порогов переменной высоты. Статистически значимыми оказались коэффициенты перед переменными x_2 и x_4 ($p < 0,0001$), связь прямая. Отсюда следует, что придание уклона верхней грани порога положительно сказывается на перераспределении удельных расходов по ширине русла и, как следствие, на интенсивности возбуждаемой поперечной циркуляции.

С учетом более тесной корреляционной взаимосвязи между λ и x_4 для порогов переменной высоты, при отсутствии влияния параметра x_3 на характер протекания исследуемых процессов для порогов постоянной высоты, а также с учетом выявленной статистической незначимости коэффициента перед x_1 в уравнениях (3) и (4) автором для порогов постоянной и переменной высоты была составлена обобщенная регрессионная модель:

$$\lambda = 0,0698 + 0,0351x_2 + 0,021x_4. \quad (5)$$

В данном случае i_n для порогов постоянной высоты всегда принимает нулевые значения. В кодированном виде при $i_n = 0 = \text{const}$ $x_4 = (-1)$.

Полученное уравнение имеет следующие статистические оценки:

$$R = 0,8681; R^2 = 0,7536; \bar{R}^2 = 0,7403;$$

$$F = 56,5726 > 3,2519 \quad (p < 0,05).$$

Коэффициенты перед переменными

x_2 и x_4 являются статистически значимыми ($p < 0,0001$), причем определяющим фактором здесь является x_4 . Данное обстоятельство еще раз подтверждает целесообразность устройства порогов переменной высоты.

Выводы

Уклон верхней грани донных циркуляционных порогов наряду с относительной высотой порога оказывает определяющее воздействие на характер протекания изучаемых явлений. Принимая во внимание выявленную в ходе экспериментальных исследований устойчивость защитных винтовых течений вдоль верховой и нижней граней порогов переменной высоты, пороги данной конструкции можно рекомендовать к широкому применению.

Скоростной режим потока не влияет на характер перераспределения удельных расходов по ширине русла, что свидетельствует о возможности использования порогов исследуемой конструкции на равнинных и горных реках.

Полученные графические и аналитические зависимости значимы при составлении рекомендаций по проектированию донных циркуляционных порогов в составе бесплотинных водозаборных гидроузлов.

1. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. – Распоряжение Правительства РФ от 27 августа 2009 г. N 1235-р (с изменениями на 28 декабря 2010 г.) [Электронный ресурс]. – URL: <http://voda.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=2759>. (Дата обращения 01.04.14).

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. Румянцев И. С., Кловский А. В. Научный обзор изученности вопросов проектирования и безнаносной эксплуатации бесплотинных водозаборных гидроузлов // Международный технико-экономический журнал. – 2014. – № 2. – С. 101–106.

4. 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.

5. Шаумян В. А. Научные основы орошения и оросительных сооружений. – М.: ОГИЗ – Сельхозгиз, 1948. – 753 с.

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

7. 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.

8. Снежко В. Л. Гидродинамическое регулирование расхода низконапорных водопропускных гидротехнических сооружений: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2012. – 365 с.

Материал поступил в редакцию 02.06.14.

Кловский Алексей Викторович, аспирант

Тел. 8-903-541-07-85

E-mail: Alexey.Klovskiy@yandex.ru

УДК 502/504:627.5:532.57

И. С. РУМЯНЦЕВ, ЖАН КЛОД МВУЙЕКУРЕ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАСИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ ЗА КОНЦЕВЫМИ ЧАСТЯМИ ТРУБЧАТЫХ ВОДОВЫПУСКОВ

Рассмотрены задачи применения гасителей энергии ударного действия в нижнем бьефе за концевыми частями трубчатых водовыпусков, а также приведены результаты лабораторных исследований гидравлических условий работы гасителей данного типа.

Гасители энергии ударного действия, трубчатые водовыпуски, местный размыв.

Problems of application of shock-action energy absorbers in the downstream tubular outlets are considered, and also results of laboratory hydraulic researches of this type.

Shock-action energy absorbers, tubular outlets, local erosion.

В практике современного гидротехнического строительства для крепления нижнего бьефа и обеспечения безопасного и надежного в эксплуатационном отношении отвода сбрасываемого потока в канал или в русло реки применяют различные гасители энергии. Наиболее распространены из них следующие: водобойный колодец, образованный уступом за счет углубления дна флютбета; водобойный колодец, созданный водобойной стенкой; комбинированный водобойный колодец; водобойная плита, оборудованная гасителями, зубчатыми и прорезными порогами, растекателями; гасители ударного действия.

Применение гасителей последнего

типа является одним из наиболее эффективных и надежных методов в борьбе с образованием местных размывов грунта за сооружениями в тех случаях, когда в нижнем бьефе имеет место дефицит глубин для обеспечения гашения избыточной энергии. Подобные устройства нижнего бьефа еще недостаточно изучены, их конструкции продолжают совершенствоваться [1]. Они получили широкое распространение на гидроузлах США и Канады. Конструкция такого крепления с системой гасителей ударного действия была разработана в свое время Бюро мелиорации США. При создании этой конструкции был обобщен большой экспериментальный и натурный