

Оригинальная статья

УДК 627.83:532.54

DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-85-91



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЗИГЗАГООБРАЗНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОТОКА

Каньяругендо Леонидас, аспирант

kany.l@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

Аннотация. Исследования проводились с целью оценки энергогасящей эффективности зигзагообразных элементов искусственной шероховатости, устанавливаемых на водосливной грани средне- и низконапорных плотин. Характеристики потока оценивались в нижнем бьефе на модели водосливной плотины со свободным входом потока на водослив. Оценка эффективности работы искусственной шероховатости выполнялась путем сравнения контролируемых параметров потока в одном и том же сечении транзитного участка водослива со стороны нижнего бьефа при обеих рассматриваемых конструктивных схемах. В результате экспериментов были выяснены особенности гашения энергии потока на водоскате и на участке сопряжения с нижним бьефом за водосливной плотиной при размещении на водоскате зигзагообразных элементов. Установлено, что устройство искусственной шероховатости в виде двойного зигзага на водосливной грани плотины приводит к уменьшению второй сопряженной глубины потока за сооружениями, позволяет создать дополнительные потери напора, тем самым облегчая мероприятия по гашению избыточной энергии потока в нижнем бьефе, бьефом за водосливной плотиной при размещении на водоскате зигзагообразных элементов. Показано, что установка зигзагообразной шероховатости на водосливной грани средне- и низконапорных плотин изменяет кинематические характеристики выходного потока и в значительной мере уменьшает вторую сопряженную глубину, что благоприятно влияет и на параметры размыва русла за сооружением, уменьшая их.

Ключевые слова: искусственная шероховатость, двойной зигзаг, водосливная плотина, параметры потока, нижний бьеф

Формат цитирования: Каньяругендо Леонидас Оценка влияния зигзагообразной шероховатости на кинематические параметры потока // Природообустройство. 2023.3. С. 85-91. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-85-91.

Original article

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF ZIGZAG ROUGHNESS ON KINEMATIC FLOW PARAMETERS

Kanyarugendo Leonidas, PhD student

kany.l@mail.ru Russian State Agrarian

University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

Annotation. The research was carried out in order to assess the energy dissipation efficiency of zigzag elements of artificial roughness installed on the spillway face of medium- and low-pressure dams. The flow characteristics were evaluated downstream on a spillway dam model with a free flow entry to the spillway. The experiments were carried out in two stages. The first stage was to measure the flow parameters in the downstream with a smooth spillway face of the dam. The second stage provided for the placement of zigzag elements of artificial roughness in the form of a double zigzag on the spillway face of the dam. Evaluation of the effectiveness of the artificial roughness was carried out by comparing the controlled flow parameters in the same section of the transit section of the spillway from the downstream side with both considered design schemes. It has been established that the device of artificial roughness in the form of a double zigzag on the spillway face of the dam leads to a decrease in the second conjugate flow depth

behind the structures and allows creating additional head losses, thereby facilitating measures to dissipate excess flow energy in the downstream. Evaluation of the effectiveness of the artificial roughness was carried out by comparing the controlled flow parameters in the same section of the transit section of the spillway from the downstream side with both considered design schemes. placement of zigzag elements on the water slope. It has been established that the device of artificial roughness in the form of a double zigzag on the spillway face of the dam leads to a decrease in the second conjugate flow depth behind the structures and allows creating a It is shown that the installation of a zigzag roughness on the spillway face of medium- and low-pressure dams changes the kinematic characteristics of the outlet flow and significantly reduces the second conjugate depth, which also favorably affects the parameters of the channel erosion behind the structure, reducing them.

Keywords: artificial roughness, double zigzag, spillway dam, flow parameters, downstream

Format of citation: Kanyarugendo Leonidas. Evaluation of the influence of zigzag roughness on kinematic flow parameters // Prirodoobustrojstvo. 2023. 3. P. 85-91 DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-85-91.

Введение. Конструкция нижнего бьефа любого гидротехнического сооружения (ГТС) представляет собой ответственную часть, в связи с чем стоимость ее составляет существенную долю стоимости всего ГТС. Поэтому риск размыва в нижних бьефах ГТС за водосбросами всегда вызывал озабоченность у инженеров и исследователей. Размыв не только вызывает нестабильность работы конструкций и боковых стенок, но и может нарушать функции ГТС по причине переформирования как потока, так и грунта основания, изменения очертания русла водотока [1].

Несмотря на большое количество работ, посвященных оценке размыва за водопропускными ГТС, до сих пор в гидротехнической практике проводятся исследования с целью разработки новых решений или усовершенствования существующих методов прогноза и борьбы с размывом нижнего бьефагидроузла [2-8].

Материалы и методы исследований. С учетом размеров гидравлического стенда и параметров плотин (в частности, высоты), относительно которых проводились исследования, а также с целью повышения точности получаемых результатов масштаб геометрического подобия был принят как $\lambda_L = 25$.

Эксперименты проводились в 2 этапа. Первый этап заключался в измерении параметров потока в нижнем бьефе при гладкой водосливной грани плотины. Второй этап предусматривал размещение на водосливной грани плотины зигзагообразных элементов искусственной шероховатости в виде двойного зигзага.

Физическое моделирование выполнялось по числу Фруда при автомодельности по числу Рейнольдса. В экспериментах высота плотины составляла $H_{пл} = 70$ см, ширина водосливного пролета – 20,8 см. Для создания подпора со стороны нижнего бьефа в концевой части лотка было установлено затворное устройство.

Искусственная шероховатость выполнялась из ребристых деталей квадратного сечения высотой и шириной 1 см в виде двойного зигзага с двумя прямоугольными изломами против течения (рис. 1). Шаг 8 см был принят с учетом известных рекомендаций по проектированию быстротоков с различным типом шероховатости [6, 7, 9, 10]. Элементы шероховатости были установлены лишь на водосливной грани плотины.

Для оценки характеристик потока после обтекания гасящих устройств участок нижнего бьефа за водосливной плотиной был разбит на 4 поперечных измерительных створа (А, В, С, D), расположенных соответственно на расстоянии 10, 50, 90, 140 см от места сопряжения наклонной и горизонтальной частей модели ГТС. Продольные створы располагались неравномерно с учетом влияния боковых стенок на параметры потока: а и b – соответственно на расстоянии 12 и 40 мм от левой по течению боковой стенки лотка; с – на расстоянии 104 мм от боковых

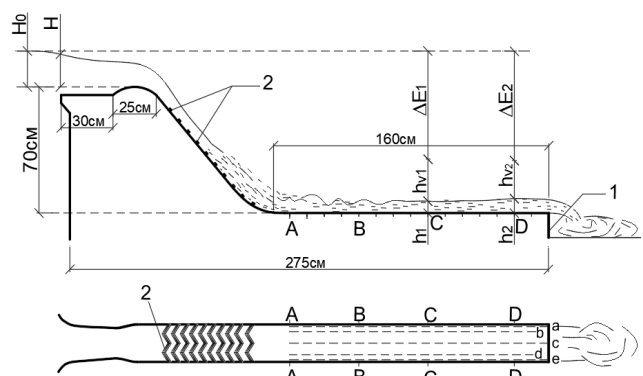


Рис. 1. Принципиальная схема модели водосливной плотины:

- 1 – месторасположение затворного устройства;
- 2 – искусственная шероховатость

Fig. 1. Schematic diagram of the spillway dam model:
1 – location of the locking device; 2 – artificial roughness

стенок (в центре лотка); d и e – на расстоянии 40 и 12 мм от правой боковой стенки лотка.

Ввиду высокой турбулентности и аэрации потока над ребрами шероховатости на участке сопряжения с нижним бьефом влияние гасящих устройств на параметры потока определялось в поперечных створах С и D с наиболее спокойным потоком. Эффективность рассматриваемых гасителей избыточной энергии потока оценивалась с помощью закона сохранения энергии и нахождения второй сопряженной глубины h_2 [8]:

$$E_0 = H_{\text{пл}} + H_0 = E_1 = (h_{v1} + h_1) + \Delta E_1 = \left(\frac{\alpha V_1^2}{2g} + h_1 \right) + \Delta E_1; \quad (1)$$

$$E_0 = E_2 = (h_{v2} + h_2) + \Delta E_2 = \left(\frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_2 \right) + \Delta E_2. \quad (2)$$

В общем виде имеем обобщенную формулу (3), по которой можно определить погашенную энергию в заданном сечении:

$$E_0 = E_1 = E_2 = \dots E_n = (h_{vn} + h_n) + \Delta E_n = \left(\frac{\alpha V_n^2}{2g} + h_n \right) + \Delta E_n, \quad (3)$$

где E_n – энергия потока воды в поперечном створе n ; $\frac{\alpha V_n^2}{2g}$ – скоростной напор в поперечном створе n ; h_n – средняя глубина потока воды в поперечном створе n ; h_{vn} – скоростной напор в поперечном створе n ; ΔE_n – суммарные потери напора по всему участку до поперечного створа n ; α – коэффициент кинетической энергии, $\alpha = 1$.

Расход воды измерялся ультразвуковым методом с помощью расходомера «Днепр-7». Его датчики были установлены на подающей трубе, через которую вода поступала на экспериментальную модель. Погрешность измерения (ошибка) по определению расхода Q и коэффициента расхода m не превышала 1...2%. Значения напора на модели и расхода по расходомеру позволили определить коэффициент расхода. При обработке данных было допущено, что полный напор составляет $H_0 = H + \alpha V^2 / 2g \approx H$ (H – геометрический напор в верхнем бьефе водослива), а коэффициент расхода был определен исходя из формулы расхода водослива:

$$Q = \sigma_i \cdot \varepsilon \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}. \quad (4)$$

Отсюда получаем, что

$$m = \frac{Q}{\sigma_i \cdot \varepsilon \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}}, \quad (5)$$

где m – коэффициент расхода, ширина водосливного пролета $b = 20,8$ см; σ_i – коэффициент подтопления, равный 1, так как водослив не подтоплен; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ε – коэффициент бокового сжатия, определяемый по формуле Е.А. Замарина:

$$\varepsilon = 1 - a \cdot \frac{H_0}{H_0 + b}, \quad (6)$$

где a – коэффициент формы быков и устоев, для эллиптического очертания быков, принятого на данной модели, $a = 0,06$ [10].

К основным измеренным параметрам в ходе исследования относятся расход, уровни, глубина и скорость потока. Соответствующими измерительными приборами являлись ультразвуковой расходомер Днепр-7, шпигтенмасштаб, трубка Пито и нивелир. При проведении модельных лабораторных исследований местная скорость потока по выбранным сечениям была измерена трубкой Пито, привязанной к шпигтенмасштабу, что позволило сравнить эпюры скоростей в нижнем бьефе при гладкой и шероховатой водосливной грани.

Отметка свободной поверхности потока определялась отдельным шпигтенмасштабом с точностью измерения до 0,1...0,3 мм в зависимости от силы колебания свободной поверхности на участке измерения. Из технических характеристик расходомера Днепр-7 пределы приведенной погрешности при преобразовании объемного расхода жидкости в выходной токовый сигнал составляют $\pm 1,5\%$. Уровень воды в верхнем бьефе определялся по пьезометру с точностью 0,5 мм. Привязка отметки порога к шкале пьезометра производилась нивелиром с точностью 0,1 мм, что приводит точность определения уровня верхнего бьефа на модели к 0,6 мм, в натуре соответственно: $\Delta H_n = \lambda_L \Delta H_m = 25 \cdot 0,6 = 15$ мм, где ΔH_n и ΔH_m – точность измерения уровня в натуре и на модели.

Глубина потока находилась как разница отчетов по шпигтенмасштабу, снятых у свободной поверхности потока и у дна. Точность отсчета по шпигтенмасштабу с учетом волнующейся свободной поверхности потока на участке сопряжения составляла 0,2...0,3 мм.

«Место нуля» шкалы шпигтенмасштаба определялось нивелиром с точностью отсчета 0,1 мм. Суммарная точность измерения глубины потока в нижнем бьефе составляет 0,3...0,4 мм, что при линейном масштабе $\lambda_L = 25$ соответствует точности 7,5...10 мм в натуре. Поскольку при больших расходах возрастали и колебания уровней воды, возрастала и абсолютная ошибка. Но измеряемые глубины тоже увеличивались, а с учетом того, что одинаковые отметки измерялись многократно (до 7...10 раз) и принималось среднее значение, относительная ошибка не увеличивалась по сравнению с ошибкой, подсчитанной для малых расходов и глубин. Минимальная

глубина, измеренная шпигтенмасштабом, в экспериментах составляла 16 мм. Минимальная относительная ошибка при этом составляла $\frac{0,1}{16} \cdot 100 = 0,63\%$, а минимальная – 1,88%. Скорости течения измерялись трубкой Пито с точностью до 2...3%.

Поскольку при проведении экспериментальных исследований возможны грубые и систематические ошибки [11-13], то для их исключения регистрация уровней свободной поверхности потока или показаний пьезометров выполнялась многократно, и в журнал измерений заносились средние значения.

Результаты и их обсуждение. Анализ полученного графика зависимости коэффициента расхода от напора, приведенного на рисунке 2, показал, что значение коэффициента расхода плавно уменьшается от 0,509 до 0,416 при увеличении напора на модели от 6 до 28 см. Можно констатировать, что полученные значения коэффициента расхода соответствуют водосливам практического профиля.

При течении на гладкой поверхности доски не наблюдается никаких необычных явлений по всей длине проточной части модели. При движении же потока через ребра шероховатости в виде двойного зигзага, установленных против течения, наблюдается стремление потока скапливаться по центру и у боковых стенок. Это вызывает неравномерное поперечное распределение потока с последующей аэрацией в местах, где глубина воды становится недостаточной для обтекания ребра шероховатости без отрыва струи. Расстояние от гребня до места начала аэрации увеличивается с напором на ГТС. В нижнем бьефе наблюдается поток, насыщенный пузырьками, особенно в начале водобоя. Однако следует отметить, что после обтекания всех сопротивлений поток перераспределяется в нижнем бьефе

более равномерно, а концентрация пузырей воздуха начинает постепенно уменьшаться.

Результаты сравнения параметров потока при гладкой и шероховатой грани по закону сохранения энергии (формула 3) представлены в таблице и на рисунке 3. Коэффициент расхода был определен согласно данным рисунка 2, расход – по формуле 4, а средняя глубина – по лабораторным опытам исходя из значений глубин, полученных в точках пересечения продольных створов с рассматриваемыми поперечными створами.

Избыточная энергия потока, погашенная за счет применения искусственной шероховатости, определяется разницей между удельной энергией сечения при данной шероховатости и удельной энергией сечения при гладкой поверхности.

На рисунке 3 представлены кривые изменения удельной энергии в поперечных створах С и D.

Эпюры скоростей потока экстра полировались до дна методом Н.П. Шапова, а до свободной поверхности – прямым продолжением кривой между двумя ближайшими к ней точками [14]. Горизонтальные линии на эпюрах, за исключением свободной поверхности, проведены на глубинах, на которых проводились замеры скоростей. При анализе на эпюрах скоростей (рис. 4) видим, как глубина и скорость потока изменяются в центре поперечного створа D при усилении шероховатости водосливной грани с помощью зигзагообразных ребер, что свидетельствует о потере энергии потока. Уменьшение скорости потока за счет применения искусственной шероховатости сопровождается увеличением глубины потока h в отводящем канале.

Влияние искусственной шероховатости определялось также путем создания подпора в нижнем бьефе с помощью затворного устройства. В разных режимах была определена необходимая глубина воды в нижнем бьефе для образования гидравлического прыжка в предельном положении (рис. 5).

Использование искусственной шероховатости на водосливной грани приводит к уменьшению второй сопряженной глубины гидравлического прыжка. Это означает изменение характера гидравлического прыжка, который может измениться с отогнанного на надвинутый при одной и той же глубине воды в отводящем канале [15].

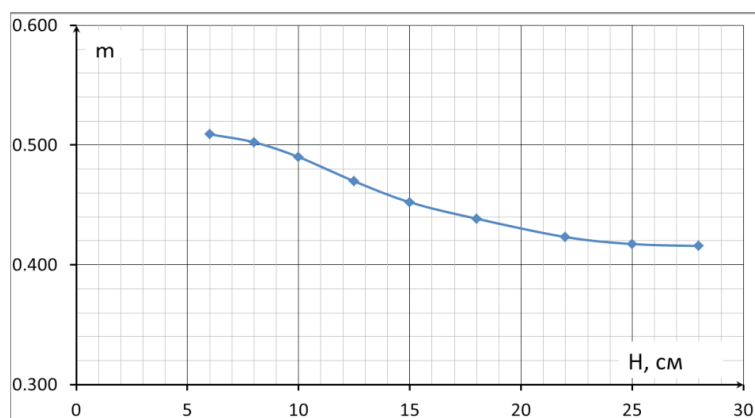


Рис. 2. Зависимость коэффициента расхода от напора

Fig. 2. Dependence of the flow coefficient on the head

Таблица. Сравнение параметров потока при гладкой и шероховатой гранях водосливной плотины

Table. Comparison of flow parameters with smooth and rough faces of a spillway dam

H, см	E ₀ , см	e	m	Q, л/с	h _{ср.} , см	v _{ср.} , см/с	h _{в1} , см	ΔE, см	Удельная энергия сечения (E ₀ - ΔE), см Specific cross-sectional energy (E ₀ - ΔE), cm
Створ С – Гладкая грань / Site C – Smooth face									
7.5	77.5	0.942	0.504	8.98	1.52	284.06	41.13	34.85	42.65
10	80	0.941	0.49	13.44	2.01	321.40	52.65	25.34	54.66
15	85	0.941	0.452	22.76	3.15	347.39	61.51	20.34	64.66
20	90	0.941	0.43	33.33	4.20	381.53	74.19	11.61	78.39
25	95	0.940	0.417	45.17	5.40	402.12	82.42	7.18	87.82
Створ С – Двойной зигзаг / Site C – Double zigzag									
7.5	77.5	0.942	0.504	8.98	2.43	177.68	16.09	58.98	18.52
10	80	0.941	0.49	13.44	3.30	195.76	19.53	57.17	22.83
15	85	0.941	0.452	22.76	5.50	198.96	20.18	59.32	25.68
20	90	0.941	0.43	33.33	7.40	216.54	23.90	58.70	31.30
25	95	0.940	0.417	45.17	9.08	239.15	29.15	56.77	38.23
Показано что установка зигзагообразной шероховатости на водосливной грани средне- и низконапорных плотин изменяет кинематические характеристики выходного потока и в значительной мере уменьшает вторую сопряжённую глубину, что благоприятно влияет на параметры размыва русла за сооружением, уменьшая их. <i>It is shown that the installation of zigzag roughness on the spillway face of medium and low-pressure dams changes the kinematic characteristics of the outlet flow and significantly reduces the second conjugate depth, which has a positive effect on the parameters of erosion of the channel behind the structure, reducing them.</i>									
Д – Гладкая грань / D – Smooth face									
7.5	77.5	0.942	0.504	8.98	1.69	255.48	33.27	42.54	34.96
10	80	0.941	0.49	13.44	2.20	293.64	43.95	33.85	46.15
15	85	0.941	0.452	22.76	3.40	321.85	52.80	28.80	56.20
20	90	0.941	0.43	33.33	4.49	356.89	64.92	20.59	69.41
25	95	0.940	0.417	45.17	5.70	380.96	73.97	15.33	79.67
Створ Д – Двойной зигзаг / Site D – Double zigzag									
7.5	77.5	0.942	0.504	8.98	2.52	171.34	14.96	60.02	17.48
10	80	0.941	0.49	13.44	3.38	191.13	18.62	58.00	22.00
15	85	0.941	0.452	22.76	5.59	195.76	19.53	59.88	25.12
20	90	0.941	0.43	33.33	7.53	212.80	23.08	59.39	30.61
25	95	0.940	0.417	45.17	9.20	236.03	28.39	57.41	37.59

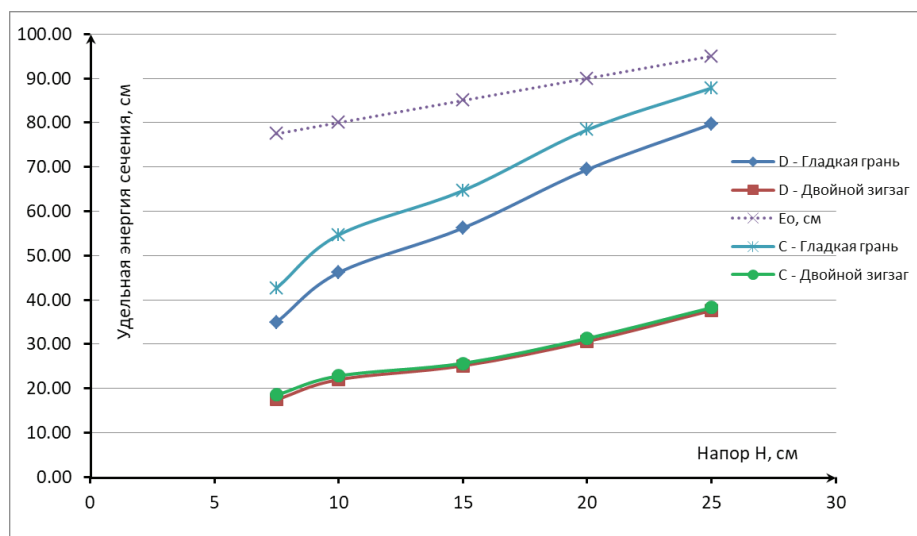


Рис. 3. Кривые изменения удельной энергии в поперечных створах С и Д

Fig. 3. Curves of changes in specific energy in transverse sites C and D

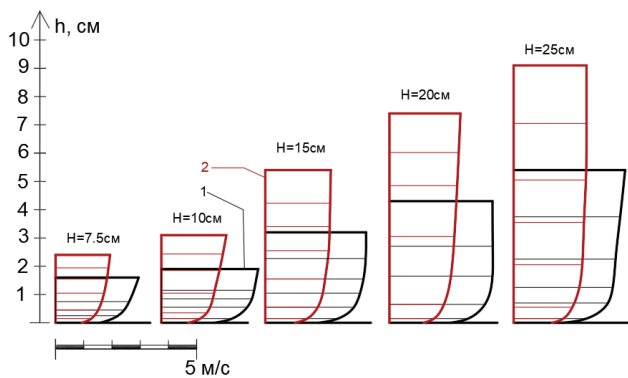


Рис. 4. Эпюры скорости в центральном продольном створе «С» и поперечном створе «Д»:

1 – при гладкой грани;
2 – для грани при установке двойного зигзага

Fig. 4. Velocity diagrams in the central longitudinal site «C» and the transverse site «D»:

1 – with a smooth face;
2 – for the face with double zigzag

Выводы

1. В результате исследований установлено, что устройство искусственной шероховатости в виде двойного зигзага, устанавливаемой на водосливной грани средне- и низконапорных плотин, приводит к уменьшению второй сопряженной глубины потока на участке сопряжения в нижнем бьефе ГТС.

2. Результаты моделирования показали, что искусственная шероховатость позволяет создать дополнительные потери напора, тем самым облегчая мероприятия по гашению избыточной энергии потока в нижнем бьефе. Показано, что

Список использованных источников

1. Арефьев Н.В., Михалев М.А., Скворцова О.С. Общий размыв и понижение уровня воды в нижнем бьефе водохранилищных гидроузлов // Природообустройство. 2008. № 1. С. 83-87.
2. Аубакирова Ф.Х. Гашение избыточной энергии потока в водосбросных сооружениях при различных режимах сопряжения бьефов // Природообустройство. 2015. № 1. С. 37-41.
3. Ханов Н.В., Журавлёва А.Г., Мвуйекуре Жан Клод. Рекомендации по проектированию и строительству креплений нижнего бьефа трубчатых водовыпусков с гасителями ударного действия // Природообустройство. 2017. № 4. С. 27-34.
4. RICHARD S., CHORDA J., LARINIER M. Ecoulements au-dessus de macro-rugosités artificielles constituées de plots. Bull. Fr. Pêche Piscic. 1999. 353/354. Pp. 279-294.
5. Mashau Samson Mashau. Flow resistance in open channels with intermediate scale roughness. Johannesburg, 2006. P. 66.
6. Пикулин А.В. Применение искусственной шероховатости в высоконапорных водосбросах: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1986. 254 с.
7. Ткачев А.А., Гурин К.Г. Определение формы движения потока в лотке быстротока Новотроицкого

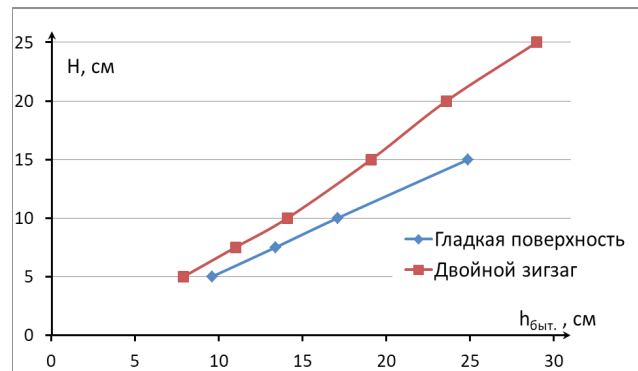


Рис. 5. Зависимость бытовой глубины в отводящем канале от напора на водосливе при условии начала прыжка в предельном положении

Fig. 5. Dependence of the household depth in the discharge channel on the pressure on the spillway, provided that the jump starts in the limiting position

установка зигзагообразной шероховатости на водосливной грани средне- и низконапорных плотин изменяет кинематические характеристики выходного потока, и это благоприятно влияет на параметры размыва русла за сооружением, уменьшая их.

3. При анализе полученных данных было установлено, что в результате стремления потока скапливаться в центре пролета водосливной грани и у боковых стенок при обтекании ребер искусственной шероховатости в виде двойного зигзага, которое больше всего заметно над шероховатостью на сливной грани, исчезает приповерхностная аэрация, не передаваясь в нижний бьеф.

References

1. Arefiev N.V., Mikhalev M.A., Skvortsova O.S. General erosion and lowering of the water level in the downstream of reservoir waterworks. 2008. No. 1. P. 83-87
2. Aubakirova F.Kh. Extinguishing of excess flow energy in spillway structures under different modes of pools conjugation. 2015. No. 1. P. 37-41.
3. Khanov N.V., Zhuravleva A.G., Mvuyekure Jean-Claude. Recommendations for the design and construction of fastenings for the downstream of tubular water outlets with shock absorbers. 2017.No. 4. P. 27-34.
4. RICHARD S., CHORDA J. et LARINIER M. Ecoulements au-dessus de macro-rugosités artificielles constituées de plots. Bull.Fr. Pêche Piscic. (1999) 353/354: 279-294
5. Mashau Samson Mashau. Flow resistance in open channels with intermediate scale roughness. Johannesburg, 2006. pp. 66
6. Pikulin A.V. The use of artificial roughness in high-pressure spillways: dissertation of a candidate of technical sciences. M., 1986. 254 p.
7. Tkachev A.A., Gurin K.G. Determination of the form of flow movement in the fast-flow flume of the Novotroitsk reservoir at a minimum flow // Ecology and water management. 2022. V. 4. No. 3. P. 128-142.

водохранилища при минимальном расходе // Экология и водное хозяйство. 2022. Т. 4, № 3. С. 128-142.

8. **Нань Фэн.** Совершенствование конструкций и методов расчетного обоснования бетонных водосбросов со ступенями на низовой грани: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 211 с.

9. **Богославчик П.М., Круглов Г.Г.** Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений: Учебное пособие. Минск: «Вышэйшая школа», 2018. 366 с.

10. **Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И.** Гидравлика: учебник. Изд. 4. Москва-Ленинград: «Энергия», 1964. 352 с.

11. **Волков В.И., Алтуний В.И., Черных О.Н.** Лабораторные исследования открытых водосбросов. М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 213. 150 с.

12. **Черных О.Н., Ханов Н.В.** Методика совершенствования учебного процесса в лабораторном комплексе кафедры гидротехнических сооружений // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2017. № 10. С. 44-52.

13. **Черных О.Н., Бурлаченко А.В.** Экспериментальные и имитационные методы исследования режимов сопряжения потока в нижнем бьефе природоохранных водосбросных и сопрягающих сооружений АПК // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2021. № 21. Рр. 72-80.

14. **Щапов Н.М.** Гидрометрия гидротехнических сооружений и гидромашин. Л.: «Госэнергоиздат», 1957. 237 с.

15. **Willi H. Hager, Anton J. Schleiss, Robert M. Boes, Michael Pfister.** Hydraulic Engineering of Dams. Taylor & Francis Group, London, UK. 2021. P. 1054. DOI: 10.1201/9780203771433.

Критерии авторства

Каньяругендо Леонидас выполнил практические и теоретические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Каньяругендо Леонидас имеет на статью авторское право и несет ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 16.04.2023

Одобрена после рецензирования 24.05.2023

Принята к публикации 24.05.2023

8. **Nan Feng.** Improvement of structures and methods of calculation substantiation of concrete spillways with steps on the downstream side: Ph.D. thesis. M., 2015. 211 p.

9. **Bogoslavchik P.M., Kuglov G.G.** Design and calculations of hydraulic structures: textbook. allowance. Minsk: Higher School, 2018. 366 p.

10. **Agroskin I.I., Dmitriev G.T., Pikalov F.I.** Hydraulics. Moscow-Leningrad.: «Energy», 1964. Edition 4, 352 p.

11. **Volkov V.I., Altunin V.I., Chernykh O.N.** Laboratory studies of open spillways. M.: FGBOU VPO MGUP, 213. – 150 p.

12. **Chernykh O.N., Khanov N.V.** Methodology for improving the educational process in the laboratory complex of the department of hydraulic structures // Bulletin of the educational and methodological association for education in the field of environmental management and water use, 2017, No. 10, P. 44-52.

13. **Chernykh O.N., Burlachenko A.V.** Experimental and simulation methods for studying flow conjugation modes in the downstream of environmental spillway and conjugating structures of the agro-industrial complex // Bulletin of the educational and methodological association for education in the field of environmental management and water use, 2021, no. 21, P. 72-80.

14. **Shchapov N.M.** Hydrometry of hydraulic structures and hydraulic machines. Leningrad.: «Gosenergoizdat», 1957. 237 p.

15. **Willi H. Hager, Anton J. Schleiss, Robert M. Boes, Michael Pfister.** Hydraulic Engineering of Dams. 2021. Taylor & Francis Group, London, UK. R. 1054. DOI: 10.1201/9780203771433.

Criteria of authorship

Kanyarugendo Leonidas carried out practical and theoretical studies, on the basis of which he generalized and wrote the manuscript. Kanyarugendo Leonidas has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 16.04.2023

Approved after peer review 24.05.2023

Accepted for publication 24.05.2023