

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-63-70>

УДК 627.838



КРЕПЛЕНИЕ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ШАХТНО-БАШЕННОГО ВОДОСБРОСА ГИДРОУЗЛА «16 ТИШРИН»

Е.С. Алсадек

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

Аннотация. Исследования проводились с целью определения условий работы крепления нижнего бьефа за расширяющимся водобойным колодцем шахтно-башенного водосброса гидроузла «16 Тишрин» в Сирийской Арабской Республике. Выполнены расчеты допустимых скоростей, не вызывающих размывов, исходя из средних диаметров частиц грунта нижнего бьефа и фактических скоростей, измеренных в лаборатории на фрагментарной модели устройства крепления выходного участка трехочкового закрытого водосброса с шахтным входным оголовком при максимальном эксплуатационном расходе и работе сооружения всем фронтом. Проблема деформаций и размывов в нижнем бьефе гидроузла «16 Тишрин» существует уже много лет, и до сих пор не найдено никакого практического решения, кроме того, что каждые 2-3 года яма размыва засыпается грунтом с неизученными размерами фракции. Также в процессе экспериментов оценена работа водобойного колодца при разных схемах маневрирования затворами. Лабораторное подтверждение пути предлагаемого практического решения этой проблемы, обеспечивающего надежную и безопасную работу водосбросного сооружения и всей плотины в целом, подчеркивает актуальность решения этой задачи для водного хозяйства северо-западной части Сирии.

Ключевые слова: гидроузел «16 Тишрин», нижний бьеф, деформация русла, допустимая скорость, крепление

Формат цитирования: Алсадек Е.С. Крепление в нижнем бьефе шахтно-башенного водосброса гидроузла «16 Тишрин» // Природообустройство. 2024. № 3. С. 63-70. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-63-70>

Original article

FASTENING IN THE DOWNSTREAM OF THE SHAFT-TOWER SPILLWAY OF THE “16 TISHRIN” HYDROELECTRIC COMPLEX

E.S. Alsadek

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49, Russia

Abstract. The research was carried out to determine the operating conditions of the downstream fastenings behind the expanding stilling basin of the mine-tower spillway of the «16 Tishrin» hydroelectric complex in the Syrian Arab Republic. Calculations were made of permissible velocities that do not cause erosion, based on the average diameters of downstream soil particles and actual velocities measured in the laboratory on a fragmentary model of the fastening unit for the outlet section of a three-point closed spillway with a shaft inlet head at maximum operating flow and operation of the structure along the entire front. The problem of deformations and erosion in the downstream of the 16 Tishrin hydroelectric complex has already existed for many years, and no practical solution has yet been found, except that every two – three years the erosion pit is filled with soil with unstudied fraction sizes. Also, during the experiments, the operation of the stilling basin was assessed under different gate maneuvering schemes. Laboratory confirmation of the proposed practical solution to this problem, ensuring reliable and safe operation of the spillway structure and the entire dam as a whole, emphasizes the relevance of solving this problem for the water economy of the northwestern part of Syria.

Keywords: hydraulic complex «16 Tishrin», downstream, channel deformation, permissible velocity, fastening

Format of citation: Alsadek E.S. Fastening in the downstream of the shaft-tower spillway of the “16 Tishrin” hydroelectric complex // Prirodobustrojstvo. 2024. No. 3. P. 63-70. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-3-63-70>

Введение. Гидроузел «16 Тишрин» на реке Ал Кабир Ал Шамали (Северный Кебир), расположенный недалеко от города Латакия на северо-западе Сирийской Арабской Республики (САР), включает в себя (рис. 1а): плотину высотой 52 м, шириной гребня 12 м, длиной 915 м; береговой и шахтный водосбросы и два водозаборных сооружения; водохранилище сезонного регулирования речного стока (полный объем при НПУ = 74,85 м составляет 210 млн м³). Гидроузел носит важное комплексное назначение для САР: орошает не менее половины сельхозгодий области Латакии, снабжает водой более 200 городов и деревень, является интенсивно посещаемой туристической зоной. В процессе строительства (1976-1987 гг.) и последующей эксплуатации сооружений гидроузла были обнаружены недостатки проектирования, которые привели к удорожанию сметной стоимости, необходимости изменения проекта уже в процессе строительства и к дополнительным затратам на ликвидацию дефектов, обнаружившихся после ввода гидроузла в эксплуатацию [1-3].

В водохранилище по мере уменьшения скорости течения воды и с ростом глубины наносы, транспортируемые потоком, начинают осаждаться на дне, располагаясь в направлении напорного фронта гидроузла с убыванием фракций по крупности [4-7]. Гидроузел вносит существенное изменение в режим течения воды в реке на участках до сооружений и после них. В верхнем бьефе идет процесс аккумуляции наносов. Концентрация и отложение наносов у водопропускных сооружений приводят к некоторому увеличению пропускаемых расходов через гидроузел по сравнению

с бытовыми значениями, изменению плановой структуры потока. Осветление воды в водохранилище в свою очередь значительно повышает размывающую способность потока, поступающего в нижний бьеф, интенсифицирует там русловые процессы, ведет к переформированию русла и образованию ям размыва сразу за концевым креплением глубиной, достигающей 3 м [8].

Цель исследований: определение условий работы крепления нижнего бьефа за расширяющимся водобойным колодцем шахтно-башенного водосброса гидроузла «16 Тишрин» в Сирийской Арабской Республике.

Материалы и методы исследований. Исследуемый объект – нижний бьеф за концевым сечением трехочкового водопроводящего транзитного трубчатого участка шахтно-башенного водосброса гидроузла «16 Тишрин» на реке Северный Кебир (Ал Кабир Ал Шамали) (рис. 1б).

Эксплуатационный расход шахтного водосброса: $Q = 300 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{\text{НБ}} = 3.1 \text{ м}$) при работе одной водоотводящей трубы водосброса; $Q = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{\text{НБ}} = 4.3 \text{ м}$) при работе двух труб; $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ ($h_{\text{НБ}} = 4.9 \text{ м}$) при работе трех труб. Размер водобойного колодца шахтного водосброса был определен в проекте по условию гашения энергии потока с расходом $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$. Он запроектирован плавно расширяющимся в плане с углом раструбности $\theta = 9.45^\circ$ и шириной, изменяющейся от 15 до 30 м. Длина водобойного колодца составляет 45 м, глубина – 9 м. Рисберма за водобойным колодцем тоже плавно расширяется в плане (угол расширения $\alpha = 22.4^\circ$) на длине 40 м, имея в начале ширину 30, а в конце – 63 м. За рисбермой находится



а



б

Рис. 1. Основные гидротехнические сооружения гидроузла «16 Тишрин»:

а – план, полученный средствами Google Earth Pro

(1 – грунтовая плотина; 2 – регулируемый водосброс; 3 – нерегулируемый шахтно-башенный водосброс; 4 – левобережный ирригационный водовыпуск; 5 – ирригационный правобережный туннель);

б – входной оголовок исследуемого шахтного водосброса

Fig. 1. The main hydraulic structures of the 16 Tishreen hydroelectric complex:

а – plan obtained by Google Earth Pro means:

1 – soil dam; 2 – regulated spillway; 3 – unregulated mine-tower spillway;

4 – left-bank irrigation water outlet; 5 – right-bank irrigation tunnel;

б – inlet head of the shaft spillway under study

концевое устройство в виде ковша глубиной 3 м, заполненного крупным камнем диаметром от 0,2 до 0,5 м (рис. 2). Длина ковша составляет 28 м, а ширина нижнего бьефа за ним – 106,4 м [1, 9, 10].

Масштаб геометрического подобия фрагментарной модели $a_l = 70$ выбирался в соответствии с обеспечением максимальными расходами моделируемого водосбросного участка насосами, имеющимися в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений ИМВХиС имени А.Н. Костякова, и с учетом размеров экспериментальной площадки для соблюдения оптимальной конструктивной ширины в нижнем бьефе гидроузла «16 Тишрин»:

$$a_l = \frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{м}}}, \quad (1)$$

где a_l – линейный масштаб модели; L – длина; индексы «м» и «н» означают «модель» и «натура», то есть $L_{\text{м}} a_l = L_{\text{н}}$.

Для пересчета параметров потока с модели на натуру использовались известные соотношения [4, 11].

Определяющей силой, действующей на поток при сопряжении бьефов на неразмываемом русле и установившихся во времени режимах движения, являются гравитационные силы тяжести. Силы вязкости при этом имеют меньшее значение. Поэтому моделирование проводилось по закону гравитационного подобия, и основным критерием подобия в рассматриваемой задаче являлось число Фруда $Fr = \text{idem}$) при автомодельности гидравлических явлений по числу

Рейнольдса ($Re > Re_{\text{сп}}$). Поскольку минимальное значение числа Рейнольдса на модели $= 5,3 \cdot 10^3$, максимальное $= 1,99 \cdot 10^4$ при граничном значении числа Рейнольдса $Re_{\text{сп}} = 247,12$, то условие автомодельности для данной модели соблюдается. Это не только подтверждает правильность принятия масштаба моделирования 1:70, но и возможность его укрупнения. В соответствии с этим масштабом на модели ($a_l = 70$) максимальные эксплуатационные расходы шахтного водосброса составили во время эксперимента: $Q_{\text{м}} = 7,31, 14,63, 21,95$ л/с, а соответствующие им глубины воды в нижнем бьефе – $h_{\text{НБ м}} = 4,4, 6,14$ и 7,0 см.

Эксперименты проводились при пропуске эксплуатационных расходов тремя трубами шахтного водосброса при разных схемах их открытия с измерением фактических скоростей в нижнем бьефе за рисбермой, в ковше и русловой части нижнего бьефа в створах по длине I...XI и поперечных створах 1...7, расположенных на модели с одинаковым шагом, равным 20 см, образуя сетку, удобную для изображения поля скоростей в нижнем бьефе водосброса (рис. 3).

К основным измеренным параметрам в ходе исследований относились расход, уровни, глубина и скорость потока. Датчики ультразвукового расходомера Днепр-7 были установлены на подающей трубе, через которую вода поступала на экспериментальную установку. При проведении модельных лабораторных исследований местная скорость потока по выбранным сечениям измерялась трубкой Пито, привязанной

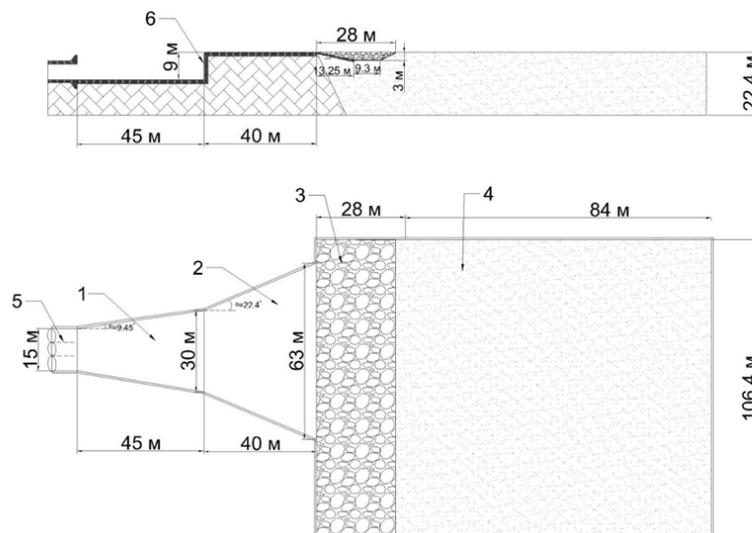


Рис. 2. Фрагмент продольного разреза и план исследуемого участка нижнего бьефа с натурными размерами:

- 1 – водобойный колодец; 2 – рисберма; 3 – ковш; 4 – русло;
5 – трубы водосброса; 6 – порог водобойного колодца

Fig. 2. Fragment of the longitudinal section and plan of the studied section of the downstream with full-scale dimensions:

- 1 – stilling basin; 2 – apron; 3 – bucket; 4 – channel; 5 – spillway pipes; 6 – threshold of the stilling basin

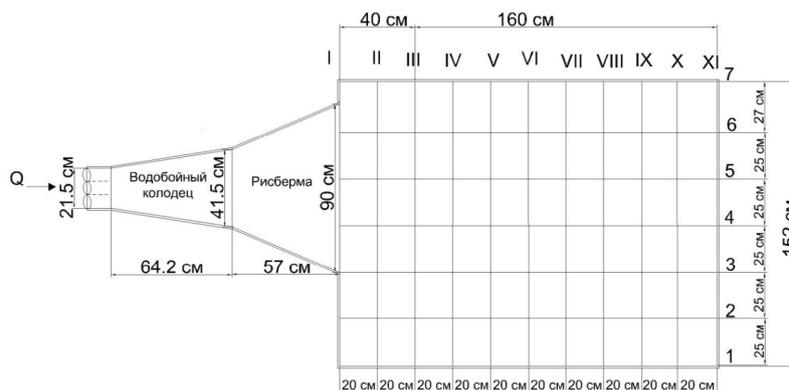


Рис. 3. Схема замера скоростей на модели по продольным и поперечным створам: 1...7 – номера продольных створов; I...XI – номера поперечных створов. М1:70

Fig. 3. Scheme of velocities measurement on the model by longitudinal and transverse alignments: 1...7 – numbers of longitudinal alignment; I... XI – numbers of transverse alignments. M1:70

к шпигтенмасштабу. Отметка свободной поверхности потока определялась отдельным шпигтенмасштабом с точностью измерения до 0,1...0,3 мм в зависимости от величины колебания свободной поверхности на участке измерения [12-14]. На рисунке 3 представлена схема расположения точек измерения скоростей и глубин потока на модели.

Для дальнейшего анализа фактических скоростей были определены допускаемые скорости. Для определения величины допускаемой скорости использовалась формула Ц.Е. Мирцхулавы [15-17]:

$$[V] = \left(\lg \frac{8.8h}{d} \right) \cdot \sqrt{\frac{2mgd}{0.44n}} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\rho_{\text{во}}}{\rho_{\text{гр}}} \right)} \quad (2)$$

где h – глубина потока; d – средний диаметр частиц, слагающих русло реки; $\rho_{\text{гр}} = 2650 \text{ кг/м}^3$ – плотность частиц грунта; $\rho_{\text{во}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды; $m = 1.4$ – коэффициент, учитывающий мутность воды; n – коэффициент, учитывающий пульсацию донной скорости

$$n = 1 + \frac{1}{0.3 + \sqrt[3]{\frac{v^2}{g} \cdot \frac{1}{d}}} = 4.32 \quad (3)$$

$v = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – коэффициент кинематической вязкости воды; $g = 9.81 \text{ м}^2/\text{с}$ – ускорение свободного падения.

С учетом этого для частиц грунта крупнее 1 мм по формуле (3) получаем $n = 4.32$:

$$[V] = 4.88 \cdot \left(\lg \frac{8.8h}{d} \right) \cdot \sqrt{d} \quad (4)$$

При нахождении среднего диаметра частиц грунта использовались данные по гранулометрическому составу грунта ложа русла реки Северный Кебир в створе сооружений гидроузла «16 Тишрин», приведенные в таблице 1 [1, 16, 17].

На основании данных таблицы 1 был рассчитан средний диаметр грунта $d_{\text{ср}}$, слагающего русловую часть нижнего бьефа за расширяющимся

водобойным колодцем шахтного водосброса как для первого, так и для второго слоев ложа русла, и получено, что $d_{\text{ср1}} = 0.039 \text{ м}$, $d_{\text{ср2}} = 0.045 \text{ м}$.

С помощью программы, составленной в Excel, был построен график, который показывает связь допустимых скоростей в районе ковша и русла в зависимости от глубины воды в нижнем бьефе и в зависимости от среднего диаметра грунта русла реки для первого и второго слоев грунта (рис. 4).

Результаты и их обсуждение. Результаты измерения скоростей потока в нижнем бьефе при различных режимах работы водосброса представлены в таблице 2.

Анализ результатов лабораторных измерений скорости показал, что скорости, образующиеся в нижнем бьефе, имеют наибольшую величину при прохождении максимального эксплуатационного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальное значение скорости потока в зоне ковша приходится на конечное сечение схода воды с рисбермы и при максимальном эксплуатационном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$, фактическая скорость достигает 2.870 м/с. Максимальное значение скорости на участке русла по оси потока приходится на конечную точку истечения воды из ковша, на расстоянии от рисбермы 28 м, и при максимальном эксплуатационном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ значение фактической скорости здесь может достигнуть 2.015 м/с.

Фактические скорости имеют важное значение для прогноза размывов в начале участка ковша и начале участка неукрепленного русла, в створе номер I и III, соответственно на расстоянии от рисбермы, с 0 до 28 м. Сравнение фактических и допускаемых скоростей при разных режимах работы водосброса представлено в таблице 3, где допустимые скорости рассчитывались по формуле Ц.Е. Мирцхулавы (4), исходя из глубины воды в нижнем бьефе и среднего диаметра грунта $d_{\text{ср}}$.

Таблица 1. Гранулометрический состав грунта в створе гидроузла на реке Северный Кабир
Table 1. Granulometric composition of the soil in the alignment of the hydroelectric complex on the Northern Kabir River

Номер слоя Layer number	Глубина слоя отбора проб, м Depth of the sampling layer, m	Процентное содержание частиц крупностью, мм Percentage of particles with coarse size, mm									
		100-50	50-20	20-10	10-5	5-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.1	0.1
1	0-0.5	41.2	20.7	3.5	3.2	4	3.2	4.3	11.2	7.4	1.3
2	0.5-2.5	42.2	35.8	4.8	1.1	2.5	6.9	3	2.9	0.2	0.6
3	2.5-3.0	1.5	2.5	5	10.1	17.6	29.6	13.9	15.5	3.9	0.4
4	3.0-5.0	31.3	21.7	22.9	10.4	7.8	3.5	0.7	0.8	0.7	0.2
5	5.0-6.0	49.6	8	10.3	4.5	8	9	4	5.3	1.1	0.2

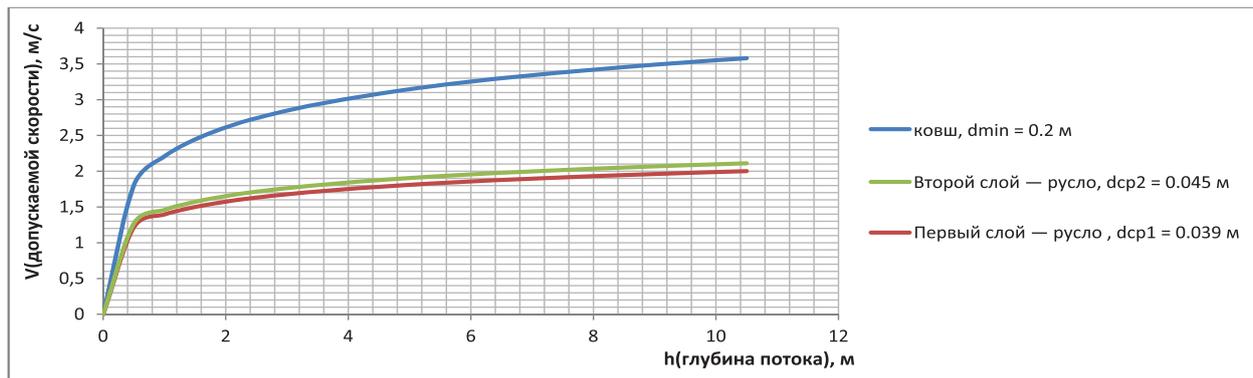


Рис. 4. Кривые зависимости неразмывающих скоростей потока в зависимости от его глубины $[V] = f(h)$ при $d_{50\%}$

Fig. 4. Curves of dependence of non-erosion flow velocities as a function of its depth $[V]=f(h)$ at $d_{50\%}$

Таблица 2. Максимальные скорости в нижнем бьефе за рисбермой
Table 2. Maximum downstream velocities behind the apron

	$V_{\text{Нmax}}, \text{ м/с}$				
	номер поперечных створов number of transverse alignments	расстояние от рисбермы в натуре, м distance from the apron in nature, m	$Q_{\text{H}}=300 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{H}}=600 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{\text{H}}=900 \text{ м}^3/\text{с}$
Ковш Bucket	I	0	2.020	2.703	2.870
	II	14	1.626	2.234	2.414
	III	28	1.175	1.821	2.015
Русло Channel	IV	42	1.125	1.621	1.822
	V	56	0.925	1.425	1.742
	VI	70	0.923	1.368	1.735
	VII	84	0.912	1.364	1.725
	VIII	98	0.909	1.365	1.725
	IX	112	0.902	1.365	1.725
	X	126	0.912	1.365	1.724
	XI	140	0.901	1.365	1.722

Результаты анализа сопоставления фактических и расчетных скоростей показывают, что скорости, создаваемые над зоной ковша в нижнем бьефе, находятся в пределах допустимого диапазона ввиду принятия заполнения ковша камнем с диаметром (0.2...0.5) м, соответствующим допустимым скоростям в нем.

Результаты анализа распределения максимальных скоростей в начале участка русла после

ковша показывают, что их значения превышают допустимые скорости при расходе $600 \text{ м}^3/\text{с}$. В этом месте нижнего бьефа значения скоростей достигают максимальных величин (1.821 м/с), хотя допустимая скорость здесь не должна превышать 1.771 м/с. Это свидетельствует о том, что в нижнем бьефе здесь будут происходить деформации, что требует поиска инженерных решений по более эффективному гашению энергии потока.

Согласно результатам анализа измерений в сечениях за ковшем скорость 2.015 м/с, образующаяся при максимальном эксплуатационном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$, превышает допустимую скорость для первого и второго слоев грунта, после зоны ковша. Это указывает на возможность деформации и размыва, достигающего глубины порядка 2.5 м.

На основании предыдущих результатов можно назначить необходимую длину ковша, а также определить диаметры камней, которые

Таблица 3. Сравнение максимальной фактической скорости и допустимой скорости в нижнем бьефе для первого и второго слоев грунта русла

Table 3. Comparison of the maximum actual velocity and the permissible downstream velocity for the first and second layers of the channel soil

	$Q_H = 300 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_H = 600 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_H = 900 \text{ м}^3/\text{с}$
Ковш / Bucket			
$V_{\text{факт}}$, м/с	2.020	2.703	2.870
$V_{\text{доп}}$, м/с	2.867	3.033	3.134
Русло / Channel			
$V_{\text{факт}}$, м/с	1.175	1.821	2.015
$V_{\text{доп1}}$, м/с	1.687	1.771	1.805
$V_{\text{доп2}}$, м/с	1.773	1.863	1.90

следует положить за рисбермой, обеспечивающих отсутствие размыва на дне нижнего бьефа закрепленной частью данного водосброса. Для определения этого допустимые скорости необходимо сравнить с максимальными фактическими скоростями, возникающими при прохождении максимального эксплуатационного расхода $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ на различных участках нижнего бьефа (табл. 4).

Можно констатировать, что для первого слоя грунта, слагающего русло реки в нижнем бьефе гидроузла до глубины 0.5 м, фактические скорости при работе водосброса всеми тремя трубами и максимальном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ превышают допустимые по всей длине участка после ковша на расстоянии 28...56 м от рисбермы. На этом расстоянии происходят деформация и эрозия грунта дна водотока, поэтому длину ковша, представляющего собой практически гибкую часть рисбермы, необходимо продлить на расстояние не менее 56 м с толщиной более 0,5 м. В сечениях после ковша на расстоянии 28 м скорость воды в начале русла превышает допустимое значение и для второго слоя грунта нижнего бьефа. Это указывает на то, что во втором слое также могут возникать размывы на расстоянии от 28 м до 42 м, причем размыв может достигать глубины 2.5 м.

Необходимые средние диаметры грунта, устойчивого против размыва, рассчитывались

Таблица 4. Максимальные фактические и допустимые скорости по исследуемой части нижнего бьефа при максимальном эксплуатационном расходе $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ шахтного водосброса

Table 4. Maximum actual and permissible velocities for the studied part of the downstream at the maximum operating flow $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ of the shaft spillway

	Максимальная фактическая скорость при максимальном расходе водосброса $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ <i>Maximum actual velocity at maximum spillway discharge $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$</i>			Допустимая скорость при максимальном расходе водосброса $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ для грунта первого и второго слоев русла реки в нижнем бьефе (формула 4) <i>Permissible velocities at the maximum operating flow $Q = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ for the soil of the first and second layers of the river channel in the downstream (formula 4)</i>	
	номер поперечных створов <i>number of transverse alignments</i>	расстояние от рисбермы в натуре, м <i>distance from the apron in nature, m</i>	$V_{\text{факт}}$, м/с	$V_{\text{доп1}}$, м/с	$V_{\text{доп2}}$, м/с
Ковш <i>Bucket</i>	I	0	2.870	3.134	
	II	14	2.414		
	III	28	2.015		
Русло <i>Channel</i>	IV	42	1.822	1.805	1.90
	V	56	1.742		
	VI	70	1.735		
	VII	84	1.725		
	VIII	98	1.725		
	IX	112	1.725		
	X	126	1.724		
	XI	140	1.722		

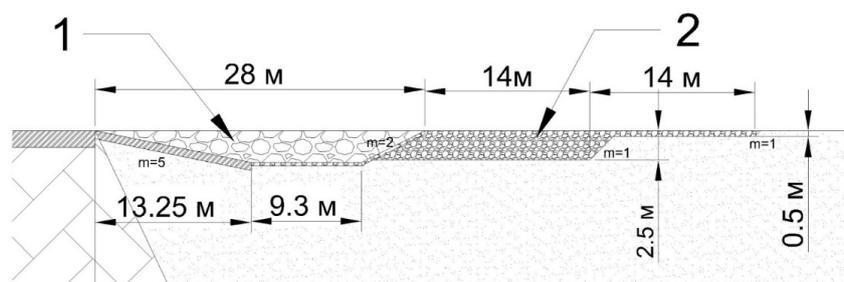


Рис. 5. Продольный разрез исследуемой части крепления в нижнем бьефе после внесения модификаций:

- 1 – существовавшая ранее часть крепления с диаметром камня ($d = 0.2...0.5$) м;
2 – предлагаемая часть крепления с диаметром камня $d_{ср\ доп} > 6$ см

Fig. 5. Longitudinal cross-section of the studied part of the downstream fastening after introduction of modification:

- 1 – the pre-existing part of the fastening with the diameter of the stone ($d = 0.2...0.5$) м;
2 – the proposed part of the fastening with the diameter of the stone $d_{ср\ доп} > 6$ см

исходя из максимальных значений фактических скоростей $V = 2.015$ м/с при максимальном расходе $Q = 900$ м³/с. Используя формулу Ц.Е. Мирцхулавы, с помощью программы Excel по формуле (4) получили, что при $Q = 900$ м³/с и $h_{нб} = 4.9$ м для защиты от размыва необходим минимальный диаметр каменного крепления более $d_{ср} = 0.0532$ м ≈ 6 см.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для обеспечения устойчивой и безопасной для других сооружений гидроузла работы нижнего бьефа целесообразно за концевым сечением существующего и заполненного крупным камнем ковша устроить крепление из отсыпки камня диаметром не менее 6 см глубиной до 2,5 м на длину 14 м, а затем еще на длину 14 м устроить крепление с таким же $d_{ср}$ на глубину 0,5 м (рис. 5). Иными словами, можно создать при реконструкции или капитальном ремонте за бетонным участком рисбермы гибкую рисберму из каменной наброски суммарной длиной 56 м, которую можно даже закончить зубом из бетона, камня или габионных структур глубиной не более 1 м.

Выводы

Основные выводы по результатам проведенных исследований можно кратко сформулировать следующим образом.

Список использованных источников

1. ТЭО гидроузла «Северный Кебир в САР». М.: «Союзгипроводхоз». Арх. № 13246-Г. 1977.
2. Алали Х., Перминов А.В. Испарение воды из водохранилища 16 Тишрин в Сирии: измерение объема и оценка экономических последствий // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 3. С. 314-331.
3. Алали Х., Перминов А.В., Редников С.Н., Аلسадек Е.С. Морфометрический анализ бассейн реки Ал Кабир Ал Шамали в Сирии с использованием изображения ASTER (цифровая модель рельефа) на основе ГИС-технологии // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2024. Т. 10, № 1. С. 46-58.

Существующие натурные наблюдения и проведенные аналитические и экспериментальные модельные исследования выходного участка за шахтным водобросом гидроузла «16 Тишрин» на реке Ал Кабир Ал Шамали (Северный Кебир) показали, что скорости, возникающие при максимальных эксплуатационных расходах, вызывают размыв дна нижнего бьефа за рисбермой, несмотря на наличие запроектированного и выполненного в соответствии с проектом ковша. Это угрожает безопасности водобросного сооружения и плотины в целом.

На основе результатов лабораторных исследований предложен вариант решения проблемы повышения надежности работы всего гидроузла удлинением крепления горизонтальной рисбермы после концевой участка в виде ковша на оптимальное расстояние с крупностью камня и толщиной крепления, обеспечивающих отсутствие размыва нижнего бьефа. Это можно считать наиболее экономичным и достаточно практичным решением благодаря своей дешевизне по сравнению с вариантом добавления энергогасителей на водобое или рисберме, а также ввиду простоты возможности его реализации.

References

1. Feasibility study of the North Kebir hydroelectric complex in the SAR. M.: "Soyuzgiprovodkhoz". Arch. No. 13246-G. 1977.
2. Alali H., Perminov A.V. Evaporation of water from the 16 Tishrin reservoir in Syria: measurement of volume and assessment of economic consequences // Melioration and hydraulic engineering. 2023. t. 13, no. 3. P. 314-331.
3. Alali Kh., Morphometric analysis of the Al Kabir Al Shamali river basin in Syria using ASTER images (digital elevation model) based on GIS technology / Perminov A.V., Rednikov S.N., Alsaadek E.S. // Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia. 2024. V. 10. No. 1. P. 46-58.

4. **Козырь И.Е., Пикалова И.Ф., Ханов Н.В.** Практикум по гидравлике: учебно-методическое пособие. СПб.: Лань, 2016. 176 с.

5. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / Под ред. Д.Д. Лаппо. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.

6. **Гунько Ф.Г., Попова К.С., Климова М.М.** Местные размывы русел в нижних бьефах водосбросов. М.: Энергия, 1974. 61 с.

7. **Рассказов Л.Н. и др.** Гидротехнические сооружения: учебник: В 2 ч. / Под ред. Л.Н. Рассказова. М.: Изд-во АСВ, 2011.

8. **Comolet R.** Mécanique expérimentale des fluides – Tome 1 // Edité par masson. Paris, France, 1990. 242 p.

9. **Алсадек Е.С.** Недостатки конструкции водобойного колодца гидроузла Тишрин в САР и предложения по их исправлению / Гурьев А.П., Ханов Н.В., Козлов Д.В. // Гидротехническое строительство. 2023. № 9. С. 27-33.

10. **Alsadek E.S.** Proposals for correcting the deficiencies in the design of the stilling basin of the Tishrin dam in the SAR / Guryev A.P., Khanov N.V., Kozlov D.V. // Power Technology and Engineering. 2024. Vol. 57, № 6. Pp. 831-836. DOI: 10.1007/s10749-024-01744-8.

11. **Снежко В.Л.** Современные способы обработки данных гидравлического эксперимента: монография. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2015. 141 с.

12. **Штеренлихт Д.В.** Гидравлика: учебник. 5-е изд. СПб.: Лань, 2015. 656 с.

13. **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.

14. Справочник по гидравлическим расчетам / П.Г. Киселёв, А.Д. Альтшуль, Н.В. Данильченко и др. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 312 с.

15. **Мирицхулава Ц.Е.** Размыв русл и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967.

16. **Алсадек Е.С., Гурьев А.П., Ханов Н.В.** Теоретическое обоснование методики прогноза формирования русла реки Северный Кебир (САР) с использованием морфометрических зависимостей и гидравлических закономерностей движения воды // Гидротехническое строительство. 2022. № 10. С. 45-51.

17. **Alsadek E.S., Guryev A.P., Khanov N.V.** Theoretical Substantiation of the Method for Predicting the Formation of the Northern Kebir River (Syrian Arab Republic) Using Morphometric Dependencies and Hydraulic Patterns of Water Movement // Power Technology and Engineering. 2023. Vol. 56, № 6. Pp. 866-871. DOI: 10.1007/s10749-023-01602-z. EDN: UMQOLI.

Об авторе

Елиас Садек Алсадек, аспирант; eliasalsadek@gmail.com

Критерии авторства / Criteria of authorship

Алсадек Е.С. Выполнял практические и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 12.02.2024

Поступила после рецензирования / Received after peer review 14.05.2024

Принята к публикации / Accepted for publication 14.05.2024

4. **Kozyr I.E., Pikalova I.F., Khanov N.V.** Practicum on hydraulics. Educational and methodological manual. St. Petersburg, "Lan", 2016. 176 p.

5. Hydraulic calculations of spillway hydraulic structures: reference manual / ed. D.D. Lappo. M.: Energoatomizdat, 1988. 624 p.

6. **Gunko F.G.** Local erosion of channels in the lower reaches of spillways / F.G. Gunko, K.S. Popova, M.M. Klimova. M.: Energy, 1974. 61 p.

7. Hydraulic structures. A textbook in 2 parts / L.N. Rasskazov and others; edited by L.N. Rasskazov. M.: Publishing House ASV, 2011

8. **Comolet R.** Mécanique expérimentale des fluides – Tome 1 / R. Comolet // Edité par masson. Paris, France. 1990. 242 p.

9. **Alsadek E.S.** Disadvantages of the design of the stilling basin of the Tishrin dam in the SAR and proposals for their correction / Guryev A.P., Khanov N.V., Kozlov D.V. // Hydrotechnical construction. 2023. No. 9. P. 27-33.

10. **Alsadek E.S.** Proposals for correcting the deficiencies in the design of the stilling basin of the Tishrin dam in the SAR / E.C. Alsadek, A.P. Guryev, N.V. Khanov, D.V. Kozlov // Power Technology and Engineering. 2024. Vol. 57, No. 6. P. 831-836. DOI 10.1007/s10749-024-01744-8.

11. **Snezhko V.L.** Modern methods of processing hydraulic experiment data: Monograph / V.L. Snezhko. M.: Publishing house RGAU-MSHA, 2015. 141 p.

12. **Shterenlikht D.V.** Hydraulics: textbook / D.V. Shterenlikht. – 5th ed. – St. Petersburg: Lan, 2015. – 656 p.

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

14. Handbook of hydraulic calculations / P.G. Kiselev, A.D. Altshul, N.V. Danilchenko [et al.] – M.: EKOLIT, 2011. – 312 p.

15. **Mirtsikhulava T.E.** Erosion of riverbeds and methods for assessing their stability. "Ear". 1967.

16. **Alsadek E.S.** Theoretical substantiation of the method for predicting the formation of the northern Kebir river (Syrian Arab Republic) using morphometric dependencies and hydraulic patterns of water movement / Guryev A.P., Khanov N.V. // Hydrotechnical construction. 2022. No. 10. P. 45-51.

17. **Alsadek E.S.** Theoretical substantiation of the method for predicting the formation of the northern Kebir river (Syrian Arab Republic) using morphometric dependencies and hydraulic patterns of water movement / E.S. Alsadek, A.P. Guryev, N.V. Khanov // Power Technology and Engineering. – 2023. Vol. 56, No. 6. P. 866-871. – DOI 10.1007/s10749-023-01602-z. – EDN UMQOLI.

Information about authors

Elias S. Alsadek, post graduate student; eliasalsadek@gmail.com

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