

устройств нижнего бьефа.

Разработаны и исследованы различные устройства для гашения энергии потока и уменьшения местных размывов за сооружениями. В то же время актуальной задачей остается разработка новых устройств нижнего бьефа с учетом особенностей конструкций и режимов работы сооружений, а также оптимизация конструктивных решений существующих гасителей энергии.

1. Гидротехнические сооружения:

учебник для вузов / под ред. Н. П. Розанова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 432 с.

2. Мелиорация и водное хозяйство. Сооружения: справочник; под ред. П. А. Полад-заде. – М.: Агропромиздат, 1987. – 464 с.

Материал поступил в редакцию 10.11.14.

Аубакирова Фарида Хабиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Водные ресурсы, землепользование и аграрная техника»

Тел. 8-915-103-73-40

E-mail: faraub1011@mail.r

УДК 502/504:627.427.2

Э. С. БЕГЛЯРОВА, А. В. ДМИТРИЕВА, С. А. СОКОЛОВА

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАИЛЕНИЯ ПОДПЕРТЫХ БЬЕФОВ МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ГОРНО-ПРЕДГОРНЫХ РЕКАХ

Приведены результаты анализа и оценки занесения подпертых бьефов малых водохранилищ на горных и предгорных реках. Даны комплексные решения и предложения по борьбе с наносами для повышения эффективности эксплуатации низконапорных гидроузлов на горных реках. Изучено влияние потока на систему барражей в верхнем бьефе, снижающих скорость занесения верхнего бьефа гидроузла влекомыми наносами. Получены эмпирические зависимости для расчета расстояния между барражами и уклона занесения гряды при наличии донных порогов. Приведены результаты лабораторных исследований при соблюдении натурным условиям динамического, геометрического подобия и неразмывающих скоростей. Установлено, что с уменьшением чисел Фруда, объемы отложений между барражами уменьшаются. Отмечено, что способ возведения барражей более эффективен, чем смыв наносов в нижний бьеф. Перечислены мероприятия комплексного решения проблемы занесения верхнего бьефа гидроузла.

Заиление, верхний бьеф, гидроузел, наносы, барражи, динамическое подобие, геометрическое подобие, скорость потока.

There are given results of the analysis and assessment of alleviation of supported pools of small reservoirs on mountain and submountain rivers. There are given complex solutions and proposals on alleviation control to raise efficiency of operation of low head hydraulic units on mountain rivers. The flow influence on the system of barrages in the upper pool is investigated which reduce the speed of the hydraulic unit upper pool alleviating by drawn drifts. The empiric dependencies are obtained for calculation of the distance between barrages and the inclination of range alleviation at the availability of bottom sills. There are given results of laboratory researches meeting the natural conditions of dynamic, geometric similarity and non-scouring velocities. It is established that with Froude numbers reduction sediments volumes between barrages decrease. It is pointed out that the method of barrages building is more effective than alleviation washing out into the lower pool. There are listed measures of the problem complex solution of the hydraulic unit upper pool alleviation.

Sedimentation, upper pool, hydraulic unit, alluvium, barrages, dynamic similarity, geometric similarity, flow speed.

Горные реки в зависимости от среднегогодового расхода подразделяются на малые при расходе ≤ 30 м³/с, средние – 30...100 м³/с и большие – ≥ 100 м³/с и характеризуются уклонами, достигающими величины 0,1 и более.

Вместе с водой горно-предгорные водотоки несут продукты эрозии горных

пород из бассейна, русла реки и ее притоков.

Размеры влекомых наносов составляют 300...400 мм, а нижние участки малых горных рек транспортируют крупно- и среднезернистые пески. В качестве примера в таблице представлен состав

Гранулометрический состав наносов

Фракции, мм	>20	20...10	10...8	8...4	4...2	2...1	0,5...0,25	0,25...0,05	0,05...0,01	<0,01
% по весу	10,4	14,7	19,8	20,7	21,1	6,6	3,6	2,4	0,6	0,063

донных отложений р. Терек (ст. Терек).

Из данных таблицы видно, что состав транспортируемых наносов неоднороден, и кроме гравия, гальки, песка присутствуют и глинистые частицы в количестве >3 %.

Заиление подпертых бьефов низконапорных гидроузлов на предгорных реках и вызванное им переформирование русла (как неизбежный закономерный процесс) приводят к ухудшению эксплуатационных характеристик объекта: снижению регулирующей емкости водохранилища, заилению водозаборных оголовков, истиранию рабочих поверхностей турбин наносами, деформированию дна и берегов.

Заиление верхнего бьефа гидроузла происходит постепенно. Сначала бьеф заиляется взвешенными наносами, а донные задерживаются в месте «выклинивания» кривой подпора. Перемещение влекомых гравелисто-галечниковых наносов происходит в форме движущейся гряды, увеличивающейся в размерах и приближающейся к плотине. В связи с чем меняется уклон свободной поверхности, и створ «выклинивания» кривой подпора перемещается вверх к плотине, а отметки подпертого уровня в пределах зоны кривой подпора повышаются. Кривая свободной поверхности в конце заиления становится параллельной уклону дна гряды. С увеличением уклонов в зоне кривой подпора возрастает транспортирующая способность потока и транзит наносов через плотину, а интенсивность их отложений в верхнем бьефе падает.

Деформации русловых форм дна в виде грядовых структур происхо-

дят вследствие размыва верхней части гряды, переноса и отложения грунта в самой гряде. В результате такого процесса гряды, сохраняя свою форму, перемещаются по течению к плотине.

Движущаяся по направлению к плотине и увеличивающаяся в размерах гряда влекомых наносов постепенно снижает площадь живого сечения водохранилища, глубина над грядой увеличивается, а скорость уменьшается. Процесс во времени носит неустановившийся характер. Относительное время процесса можно выразить так:

$$\tau = \frac{t_i}{t_{ост}}$$

где $t_{ост}$ – время от начала движения гряды до ее полной остановки; t_i – время от начала движения гряды до определенного момента.

Непрерывно меняются следующие характеристики движущейся гряды: длина гряды L_r , высота гряды h_r , скорость движения гряды C_r . Скорость движения гряды коррелирует с величинами расхода Q , глубины бьефа H , концентрации наносов ρ .

Фронт гряды движется до определенного расстояния от плотины и зависит от режима ρ , Q и H .

Как показали исследования, чем больше Q и в потоке, тем меньше высота гряды h_r и быстрее поднимается (заиляется) дно бьефа.

Для прогноза заиления верхнего бьефа необходимы следующие гидравлично-морфологические характеристики реки: расход влекомых наносов, динамика руслового рельефа, а также данные о законах изменения рельефа дна.

Известны зависимости по определению расхода наносов И. И. Леви, Б. И.

Студеничникова, скорости движения гряды и ее высоты А. Ш. Барекяна, Ю. А. Ибад-Заде, длины гряды Г. В. Железнякова, В. К. Дебольского и других исследователей [1, 4–7].

Н. С. Знаменская предложила график зависимости $C_r = f(h_r, L_r)$ параметров донных гряд, соотношения их длины, высоты и скорости их перемещения, по которой можно определить параметры крутизны гряды h_r/L_r , а зная высоту гряды h_r можно вычислить L_r [2, 3].

Выполненный анализ научных материалов показал, что существует большое число зависимостей для определения количественных характеристик донных форм, но отсутствует достаточная аргументация для ограничения их применимости.

Идея возведения донных порогов (барражей) из местных материалов с целью регулирования русловых процессов и уровня подпорных бьефов горных рек недостаточно проработана и при отсутствии общей теории может быть апробирована экспериментальным и расчетно-теоретическим путем.

В Лаборатории гидросиловых установок имени Д. Я. Соколова на модели зеркального лотка длиной 10 м и шириной 1,0 м были проведены исследования по изучению процесса заиления подпертого бьефа влекомыми наносами.

Был запроектирован узкий верхний бьеф гидроузла в масштабах моделей М 1 : 20 и М 1 : 40, состоящий из перегородивающей плотины в виде вертикальной стенки высотой 0,5 м и водозабора в виде конического насадка с диаметром входа 0,3 м и диаметром выхода 0,18 м с дисковым регулирующим затвором. Русло горной реки выполнено в виде лотка с продольным уклоном 0,1 и треугольной формы сечения с заложением откосов 0,6. Опыты проводили с предварительно отсортированным гравием со средним размером 2,5...3,5 мм.

При моделировании соблюдалось:

1. Динамическое подобие $Fr = idem$, $Re_m > Re_{cr}$, где Fr – число Фруда; Re_{cr} – критическое число Рейнольдса, соответствующее границе автомодельной области явлений; Re_m – число Рейнольдса на модели.

2. Геометрическое подобие $l = idem$, $h/d = idem$, где h – глубина потока; d – крупность наносов; l –

3. Условия подобия подвижности частиц $V/V_n = idem$, $\omega/V = idem$, где V – средняя скорость потока; V_n – неразрывающаяся скорость потока; ω – гидравлическая крупность наносов.

4. Условия подобия весового содержания наносов $\rho = idem$ при $D_{ц.н.} = idem$, где $D_{ц.н.}$ –

Исследуемый на модели процесс соответствовал натурному вследствие соблюдения динамического и геометрического подобия, неразрывающихся скоростей и достаточной крупности наносов в натуральных условиях. Авторы статьи разделяют мнение исследователей, что соблюдение одинаковой для модели и натуральных условий формы транспорта донных наносов (форм гряд) предпочтительнее идентичности всех критериев подобия сразу [3].

По законам моделирования и по условию динамического подобия $Fr = idem$ приняты следующие масштабные коэффициенты m для пересчета основных характеристик модели на натурные условия:

$m_v = \sqrt{m_L}$ – для пересчета диапазона скоростей 40...100 см/с натуральных условий в диапазон скоростей $V_n = 1,78...4,45$ м/с (модель, М 1 : 20) и $V'_n = 2,53...6,33$ м/с (модель, М 1 : 40);

$m_Q = m_L^{5/2}$ – для пересчета диапазона расхода 9...21 л/с модели в диапазон расхода натуральных условий $Q_n = 16,09...37,55$ м³/с (модель, М 1 : 20) и $Q'_n = 91,15...212,7$ м³/с (модель, М 1 : 40);

$m_t = \sqrt{m_L}$ – для пересчета диапазона времени 180...480 мин. заиления верхнего бьефа натуральных условий в диапазон времени $\tau_n = 805...2145$ мин. (модель, М 1 : 20) и $\tau'_n = 1138...3040$ мин. (модель, М 1 : 40).

Выполненные авторами статьи лабораторные исследования и натурные изыскания ряда ученых позволили сделать следующие основные выводы:

1. Уменьшение транспортирующей способности потока по длине подпертого бьефа приводит: к сортировке в области «выклинивания» кривой подпора наиболее крупных фракций отложений и более мелких вблизи плотины; к

перемещению донных наносов крупных фракций к плотине в виде движущейся гряды, которая создает на вышележащем участке дополнительный напор вследствие разности уклонов свободной поверхности незанесенного участка верхнего бьефа и уклона грани верховой гряды;

2. Уменьшается водный сток реки, более мелкие фракции наносов откладываются на дне, уменьшая скорости и увеличивая распространение кривой подпора в верхнем бьефе.

3. К завершению процесса заиления скорость перемещения гряды уменьшается, а кривая свободной поверхности становится параллельной уклону дна гряды. Уклоны дна реки и свободной поверхности становятся равными или близкими к первоначальным, существовавшим до возведения подпорных сооружений.

4. При уклоне естественного русла

0,002 верхний бьеф практически не заиляется, но происходит накопление донных наносов.

Для предупреждения заиления бьефов горных водохранилищ с большими уклонами дна ($i > 0,1$) предложено размещение до створа плотины порогов-барражей из местных материалов для аккумуляции твердых частиц между ними.

При правильном выборе створов порогов-барражей в водохранилище задерживается большой объем донных наносов и не попадает в водозаборы.

Исследования влияния оптимальных размеров барражей и конструктивных решений по их размещению на характер заиления наносами водохранилища и их скорости позволили установить, что с уменьшением чисел Фруда, объемы отложений между барражами уменьшаются (рис. 1).

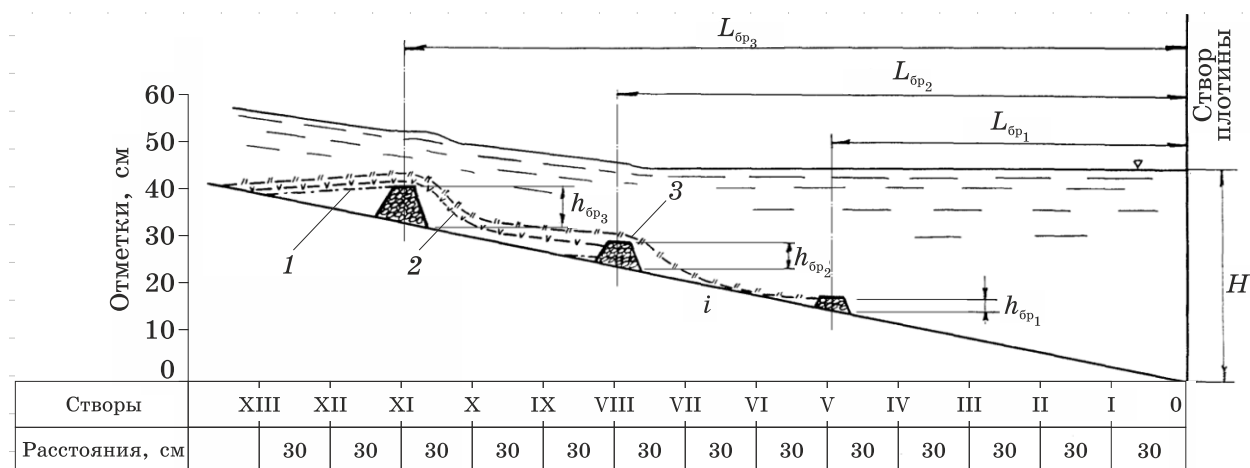


Рис. 1. Хронограммы очертаний гряды в случае возведения трех барражей при $Q = 19$ л/с, $\rho = 0,1$ г/л и $H = 0,447$ м: 1 – $\tau = 0,27$; 2 – $\tau = 0,63$; 3 – $\tau = 1,0$; $h_{гр1}/H = 0,06$; $h_{гр2}/H = 0,11$; $h_{гр3}/H = 0,17$; $L_{гр1}/H = 3,3$; $h_{гр2}/H = 5,4$; $L_{гр3}/H = 7,4$

На рис. 1 показан эффективный вариант размещения трех барражей различной их высот, которая уменьшается вниз по течению. К моменту завершения процесса заиления $\tau = 1,0$ оказалось, что донных отложений здесь меньше, чем у профиля гряды занесения с одинаковой высотой трех барражей.

Чем выше барраж, тем больший подпор он создает и тем больше отложений он задерживает. Ниже по течению отсутствует необходимость сооружения высоких барражей, так как подпор плотины влияет на гряду. Расположение

барражей в зоне «выклинивания» кривой подпора ограничивает формирование высокой гряды, которая как бы разлагается по длине, оставляя зону подпора у плотины без отложений. Последнее обстоятельство немаловажно при эксплуатации малых ГЭС и плотинных водозаборов.

Как показали исследования и исследования авторов статьи и ряда ученых, высота гряды $h_{гр}$ между барражами на всем интервале заиления является функцией подпора от плотины и барражей, их высоты, размещения и количества (рис. 2) [7–9].

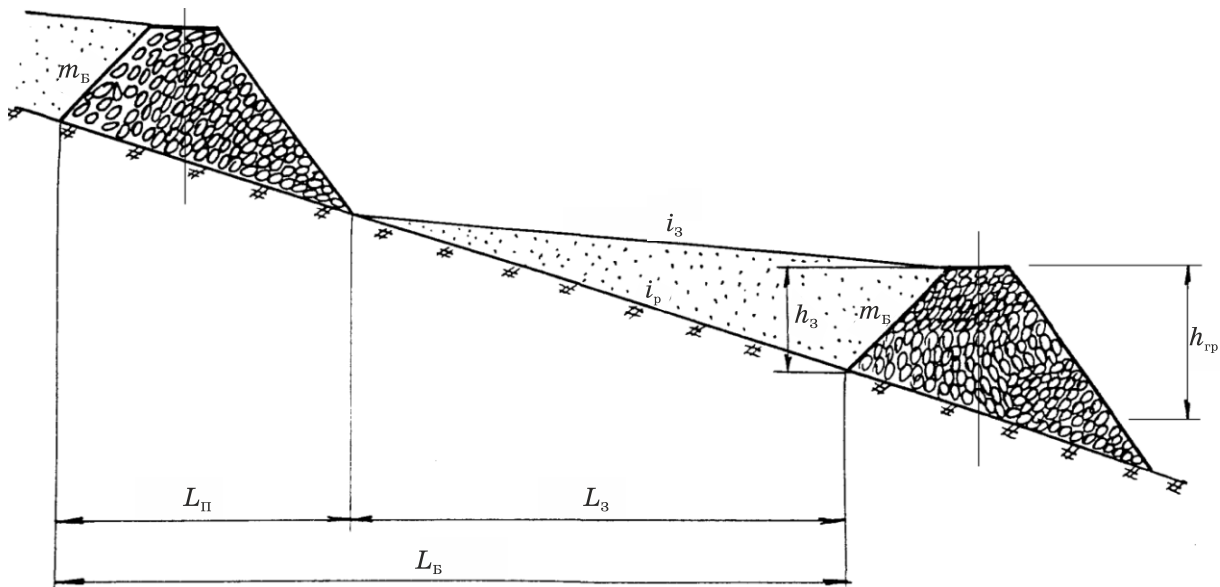


Рис. 2. Расчетная схема призмы отложений наносов перед барражом

Расстояние между барражами можно определить так:

$$L_{\text{б}} = L_3 + L_{\Pi}, \quad (1)$$

где L_3 – прогнозируемая длина призмы отложений; L_{Π} – длина подошвы барража, определяется известным способом и зависит от откоса барража $m_{\text{б}}$ и ширины его по гребню.

Длину призмы отложений наносов рассчитывают по следующей формуле:

$$L_3 = \frac{h_3(1 + i_3 \cdot m)}{i_p - i_3},$$

где h_3 – высота призмы отложений; i_3 – уклон линии занесения; $m_{\text{б}}$ – верховой откос барража; i_p – уклон дна реки.

В результате обработки представленных экспериментальных данных и анализа имеющихся формул В. Н. Гончарова и Я. И. Каганова [10] была получена эмпирическая зависимость для расчета уклона заиления гряды i_3 при наличии донных порогов:

$$i_3 = 0,2 \cdot i_p + 0,1 \cdot i^{0,8}. \quad (2)$$

На рисунке 3 представлен график влияния схем размещения барражей на скорость движения гряды.

Метод барражей-порогов прост и экономичен. В качестве материала для отсыпки порогов можно использовать габионы или крупные камни.

Насыпные пороги-барражи бывают крупные с объемом $>200 \text{ м}^3$, малые – по несколько десятков м^3 и размещаются на определенной длине бьефа в зависимости от рельефа дна водохранилища.

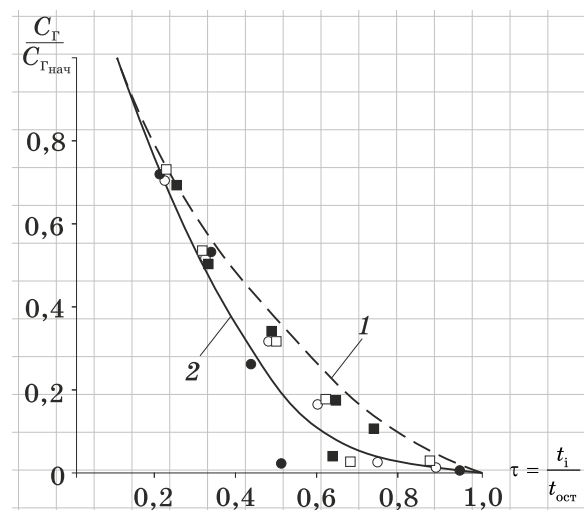


Рис. 3. Зависимость скорости перемещения гряды $C_{\text{г}}$ от ее высоты до ее остановки: 1 – до возведения барража; 2 – после возведения одного барража; • – $h_{\text{бп}}/H = 0,35$ и $L_{\text{бп}}/H = 4,7$; ■ – $h_{\text{бп}}/H = 0,22$ и $L_{\text{бп}}/H = 3,3$; ○ – $h_{\text{бп}}/H = 0,33$ и $L_{\text{бп}}/H = 3,5$; □ – $h_{\text{бп}}/H = 0,44$ и $L_{\text{бп}}/H = 3,3$

Способ возведения барражей более эффективен, чем смыл наносов в нижний бьеф. Комплексное решение проблемы заиления верхнего бьефа гидроузла включает и дополнительные меры:

крепление крутых склонов долин на водосборе;

террасирование крутых склонов; устройство защитных дамб от эрозии берега;

крепление русла реки выше створа плотины регуляционными сооружениями

массивного, сквозного или струенаправляющего типа;

наращивание высоты плотины для возмещения потерянного объема регулирующей призмы водохранилища в результате занесения ее верхнего бьефа.

Совокупность нескольких мер уменьшает ход движения гряды занесения и повышает эффективность эксплуатации низконапорного гидроузла горно-предгорной зоны.

Выводы

Изучено влияние потока на систему барражей в верхнем бьефе, снижающих скорость заиления верхнего бьефа гидроузла влекомыми наносами.

Получены эмпирические зависимости для расчета расстояния между барражами по (1) и уклона занесения гряды при наличии донных порогов по (2).

1. Барекян А. Ш. Расход донных наносов и устойчивость русел рек: сб. трудов ВНИИГиМ имени А. Н. Костякова. – Т. XXXV. – М.: ВНИИГиМ, 1960. – С. 85–99.

2. Знаменская Н. С. Донные наносы и русловые процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 190 с.

3. Знаменская Н. С. Гидравлическое моделирование русловых процессов. – Л.: Гидрометеиздат, 1992. – 239 с.

4. Ибад-Заде Ю. А. Движение наносов в открытых руслах. – М.: Стройиздат, 1974. – 351 с.

5. Мухамедов А. М. Эксплуатация низконапорных гидроузлов на реках, транспортирующих наносы. – Ташкент: ФАН, 1976. – 338 с.

6. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Сниценко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.

7. Кромер Р. К. Исследование процессов занесения и промыва подпорных бьефов низконапорных гидроузлов на реках горно-предгорной зоны: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГМИ, 1979.

8. Румянцев И. С., Атабиев И. Ж., Кромер Р. К., Румянцев А. И. Научные основы совершенствования методов создания и эксплуатации водохранилищ речных гидроузлов: монография. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2011. – 172 с.

9. Абидов М. М. Регулирование наносного режима при водозаборе на горно-предгорных участках рек: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУП, 2006.

10. Гончаров В. Н. Динамика русловых процессов. – Л.: ГИМИЗ, 1962. – 374 с.

Материал поступил в редакцию 11.09.14.

*Беглярова Эвелина Суреновна, кандидат технических наук, профессор кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики
Тел.: 8 (499) 976-21-56*

*Дмитриева Альбина Владимировна, кандидат технических наук, профессор кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики
Тел.: 8 (499) 976-21-56*

*Соколова Светлана Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры комплексного использования водных ресурсов и гидравлики
Тел.: 8 (499) 976-21-56*

E-mail: sokolovasvetlana@mail.ru