

П.О. БАЛДЖЯН, А.В. БАЛАЯН

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОТЛОЖЕНИЯ ДОННЫХ
НАНОСОВ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ И ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОЕ
ПРИМЕНЕНИЕ**

Водохранилища играют важную роль в деле развития каждой страны и обеспечения ее экономической безопасности. Однако их сооружение приводит к ряду отрицательных последствий: нарушается веками образованная экосистема реки, а речные наносы, отлагаясь в водохранилище, постепенно уменьшают его регулируемую способность. С указанной проблемой сталкиваются сотни тысяч водохранилищ, построенные в пяти континентах. Исходя из вышеизложенного, задачи количественной оценки отложений наносов и прогноза формы их расположения в водохранилище являются актуальными. Первая из этих задач достаточно хорошо решена, однако вторая задача практически остается открытой. Целью работы является разработка теоретической модели процесса отложений донных наносов и прогнозирование на ее основе координат расположения объема аккумуляции в водохранилище. Предложен критерий, позволяющий вычислить местоположение тех сечений водохранилища, где могут отлагаться донные наносы разного размера. При исходных гидрологических, гранулометрических и геометрических характеристиках потока, наносов и русла выведена зависимость расчета координат отложений наносов вдоль водохранилища. Решена также задача прогнозирования изменения слоя отложений с использованием уравнения баланса наносов. Полученное выражение позволяет в зависимости от времени установить текущий уровень отложений наносов. На основе результатов проведенных разработок с учетом изменений, происходящих в объеме водохранилища в период эксплуатации, периодически уточняется его проектная характеристика.

Ключевые слова: водохранилище, донные наносы, аккумуляция, расход наносов, участок отложений.

Введение. Водохранилище - незаменимое сооружение, регулирующее речной сток. Только для водоснабжения и гидроэнергетики в мире построены сотни тысяч водохранилищ. В Республике Армения эксплуатируется около семи десятков больших и средних сооружений. Однако при эксплуатации водохранилища в речном бассейне возникает ряд негативных явлений [1,2]. В частности, поднятие уровня воды существенно меняет гидрогеологические ус-

ловия окружающей среды. Для населённых пунктов и сельскохозяйственных земель к наиболее нежелательным последствиям можно отнести повышение горизонта подземных вод. Среди отрицательных воздействий водохранилища самое негативное - это разделение речного бассейна на две части. Вследствие этого:

- резко усложняется свободное передвижение животных вдоль реки, нарушается сформированная веками среда их обитания и размножения;
- основная часть наносов, поступающих речным потоком, аккумулируется в водохранилище, нарушая природные условия нижних течений реки;
- разгруженный от наносов водный поток после водохранилища начинает размывать русло реки.

В горных и предгорных зонах стоки рек имеют ярко выраженный сезонный характер. Наиболее неравномерное распределение наблюдается в твёрдом стоке. Основная часть жидких и твёрдых стоков рек проходит во время кратковременных паводков и селевых потоков [3]. Количественное соотношение взвешенных и донных частиц потока, составляющих общий твёрдый расход, обусловлено гранулометрическими и физико-механическими характеристиками несвязанной грунтовой массы речного бассейна. Как показывают натурные исследования, проведенные для Южного Кавказа [4], в общем расходе наносов доля донных частиц составляет не более 50%. При наличии на реке водохранилища эти наносы скапливаются в его передней части. А из общего количества взвешенных наносов в водохранилище, в основном, отлагаются частицы диаметром более 0,05 мм (в крупном водохранилище - диаметром более 0,02 мм). Мелкие, коллоидные частицы проходят выпускаемым из водохранилища потоком. С целью изучения процесса аккумуляции наносов в водохранилище важным условием является наличие достоверных данных о гидрологическом режиме реки [5]. Для многих рек и их притоков подобные данные или отсутствуют, или недостаточно надёжны. Поведение наносного режима, а также изменение уровня воды в водохранилище оказывают существенное влияние на количество, форму распределения и гранулометрический состав отложений наносов.

Отложение наносов в верхних участках водохранилища приводит к продолжительному уменьшению объёма регулирования. Десятки тысяч водохранилищ, построенных во всём мире, продолжительно наполняются огромной массой грунта [6, 7]. Ряд водохранилищ, построенных на водотоках с большой мутностью, вышли из эксплуатации достаточно раньше предназначенного срока службы (рис.1, 2). Таким образом, исследование проблемы аккумуляции наносов в водохранилище имеет важное значение как с экологической, так и с эко-

номической точек зрения. В числе задач, входящих в проблему, наиболее приоритетными являются оценка объема отложений наносов и прогноз формы их распределения для эксплуатируемых и тем более проектируемых водохранилищ. В настоящее время определение количества отложений наносов и формы их распределения для немногих эксплуатируемых водохранилищ осуществлено методом геодезических измерений [1,8].

Наряду с этим существуют достаточно надёжные теоретические предложения по количественной оценке отложений. В большинстве случаев используется принцип баланса поступающих в водохранилище и выходящих из него наносов [9,10]. Однако эти решения не дают возможности установить как форму распределения наносов вдоль водохранилища, так и рост аккумулирующего слоя по высоте.



Рис. 1. Водохранилище Понья на р. Колорадо. За 50 лет эксплуатации 85% водовыпускной башни высотой 21 м было затоплено отложениями наносов



Рис. 2. Заполненное наносами водохранилище в Швейцарских Альпах

Эти прогнозы очень важны для выяснения того, как уменьшаются мёртвые и полезные объёмы водохранилища в ходе его эксплуатации. Теоретические решения этих задач в литературе практически отсутствуют. Необходимо отметить, что процесс аккумуляции наносов характеризуется разнообразием задач, что обусловлено существенной разницей физических картин и математических моделей процесса отложения донных и взвешенных частиц.

Целью работы является разработка теоретической модели процесса отложений донных наносов и прогнозирование на ее основе координат расположения объёма аккумуляции в водохранилище.

Постановка задачи и обоснование методики. Изучаются физическая картина движения донных наносов и их дальнейшая аккумуляция в водохранилище, приводящая к изменению его объёмной характеристики. Причиной протекающего гидродинамического процесса является постепенное уменьшение скорости потока по длине водохранилища. Параллельно с этим начинается аккумуляция частиц наносов. По отношению к мелким частицам скорость сохранения движения крупных частиц сравнительно больше. Поэтому в ходе уменьшения скорости потока в водохранилище в первую очередь отлагаются крупные частицы. Это происходит на начальной части участка аккумуляции. В конце участка отлагаются мелкие частицы. Со временем границы участка аккумуляции будут изменяться из-за роста слоя аккумуляции, что может привести к уменьшению глубины потока, а следовательно, к увеличению его скорости. В ходе эксплуатации данный процесс ускоряется при понижении уровня воды в водохранилище. При разработке математической модели указанного физического процесса учтено изменение скорости потока вдоль водохранилища и использованы предложения по оценке минимальных скоростей, удерживающих донные частицы в движении. При оценке приращения слоя аккумуляции использовано уравнение баланса наносов для элементарного периода. В результате обработок получены формулы для расчета геометрических параметров отложений наносов в водохранилище в зависимости от времени.

Результаты исследования. Гидродинамический процесс аккумуляции наносов происходит при взаимодействии русла, наносов и потока. Основными параметрами, характеризующими эти факторы, являются:

- расход жидкости и наносов (Q , Q_s);
- средний диаметр наносов (d_s);
- геометрические параметры водохранилища по длине: глубина (h), ширина русла (B), площадь живого сечения (A).

Эти величины, являющиеся исходными для поставленной задачи, устанавливаются предварительными исследованиями речного бассейна.

Частица наносов, находящаяся в донном слое потока до остановки, движется с минимальной скоростью, ниже которой она отлагается. Достаточно хорошо изучены задачи определения размывающих и неразмывающих скоростей несвязанных частиц [11,12]. Для взвешенных наносов предложены надежные решения незаиляющих скоростей каналов [13]. Наряду с этим задача определения минимальной скорости потока, при которой частица еще находится в движении, изучена недостаточно [14]. Можно отметить несколько приближенных оценок этой скорости [15], которые были использованы в работе. С учетом физической картины изучаемого процесса условие аккумуляции наносов, поступающих в водохранилище, представляется следующим неравенством:

$$V_S \geq \beta V_m, \quad (1)$$

где V_S - минимальная скорость, при которой частица диаметром d находится в движении; V_m - средняя скорость потока; β – переходный коэффициент от средней скорости потока к скорости придонного слоя.

Используя условие неразрывности потока:

$$V_m = \frac{Q}{A}, \quad (2)$$

можно написать

$$V_S \geq \beta \frac{Q}{A}, \quad (3)$$

где A - текущая поперечная площадь водохранилища.

Правая сторона неравенства представляет собой скорость придонного слоя потока в водохранилище, при которой по мере крупности отлагаются частицы наносов. В частности, в первую очередь отлагаются частицы с максимальным диаметром $d_{\max}$, а в последнюю – с диаметром $d_{\min}$. Т.е. отложение наносов происходит на участке между этими сечениями (длина участка обозначена L).

Согласно работе [15], имеем

$$V_S = \gamma V_n, \quad (4)$$

где V_n - неразмывающая скорость руслоформирующего грунта; γ - переходный коэффициент между скоростями V_n и V_S , среднее значение которого принимается $3/4$.

Согласно работе [11], имеем

$$V_n = \sqrt[4]{g^2 d h}, \quad (5)$$

где h - глубина потока; d - диаметр частицы.

С учётом выражений (3), (4) и (5) получается

$$A \geq \frac{\beta}{\gamma} \frac{Q}{\sqrt[4]{g^2 d h}}. \quad (6)$$

Полученное неравенство даёт возможность установить местоположение сечения, где отлагается частица с произвольным размером d . Для проведения расчетов на расстояниях $X_1=\Delta X$; $X_2=X_1+\Delta X$; ...; $X_n=X_{n-1}+\Delta X$ (начиная с плотины) выбирается n - е количество сечений. (Выбор величины шага ΔX обусловлен длиной водохранилища: чем больше водохранилище, тем больше можно увеличить длину шага). На основе известных геометрических характеристик водохранилища устанавливаются площади выбранных сечений ($A_1, A_2, \dots, A_n$).

Для самых крупных и мелких частиц ($d_{\max}, d_{\min}$) донных наносов вычисляются величины знаменателя выражения (6), а именно - максимальная и минимальная скорости ($V_s^{\max}$ и $V_s^{\min}$), при которых сохраняется движение частиц. Используя значения расхода Q , скорости $V_s^{\max}$, коэффициентов β и γ , рассчитывается правая часть неравенства (6). Из числа площадей $A_1, A_2, \dots, A_n$ выбирается то минимальное значение, которое удовлетворяет условию (6). Это сечение является началом зоны аккумуляции донных наносов. Для установления места конечного сечения отложений аналогичные расчёты выполняются при значении скорости $V_s^{\min}$. Отложение остальных частиц наносов в водохранилище происходит на участке длиной L между этими двумя сечениями.

Со временем объём отложений наносов увеличивается не только по длине водохранилища, но и по его высоте. Этот рост оценен на основе баланса наносов. Масса наносов, поступающих в водохранилище за промежуток времени dt , приводит к следующему изменению в аккумулирующем объёме:

$$Q_s dt = \rho_s B_m L dh_s, \quad (7)$$

где ρ_s - плотность отложений; dh_s - средний рост слоя отложений; B_m - средняя ширина русла на участке отложений.

Используя известные значения расхода и плотности наносов, длины участка L и средней ширины B , уравнение (7) интегрируется в пределах, соответствующих данному периоду:

$$\int dh_s = \frac{1}{\rho} \int \frac{Q_s}{BL} dt. \quad (8)$$

В результате получается закономерность приращения аккумулирующего слоя донных наносов в зависимости от времени. Предполагая, что форма сечений прямоугольная, за промежуток времени $(t_2 - t_1)$ рост поверхности отложений $\Delta h = h_2 - h_1$ будет

$$\Delta h = \frac{Q_s}{\rho BL} (t_2 - t_1). \quad (9)$$

Решения, полученные для оценки процесса аккумуляции наносов в водохранилище, применимы как при постоянных, так и при переменных по времени значениях исходных параметров. Теоретические обоснования и полученные решения процесса отложений наносов могут обеспечить надёжные результаты при условии наличия достоверных данных по расходам воды и наносов, гранулометрическим характеристикам наносов, а также геометрическим параметрам водохранилища [15].

Заключение. Предложенные зависимости по расчёту параметров отложений наносов могут использоваться для установления формы расположения объёма аккумуляции по длине и высоте водохранилища в ходе его эксплуатации. Надёжность результатов расчета обусловлена наличием достоверных исходных данных по гидрологическим, гранулометрическим и геометрическим характеристикам речного бассейна. Полученные результаты расчётов дадут возможность в процессе эксплуатации вводить уточнения в проектной характеристике водохранилища $W=f(H)$ и в достаточной степени прогнозировать срок службы сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents / **G.M. Kondolf, Y. Gao, G.W. Annandale, G.L. Morris, et al** // *Earth's Future*.- 2014.-2.- P. 256–280.
2. U.S. Bureau of Reclamation Hydrology, hydraulics, and sediment studies for the Matilija Dam Ecosystem Restoration Project, Venture (CA): Draft Report, Sediment.- River Hydraul. Group, Denver, Colo., 2006.- 323 p.
3. Технические указания по расчёту максимального стока рек в условиях Кавказа ЗакНИИ.- Тбилиси, 1980. – 71с.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР.- Том 9, вып. 4: Восточное Закавказье.-Л.: Гидрометеиздат, 1971.- 227 с.

5. **Chudek E., Horn A., Joo M., McLaren S.** Stratification Patterns in Queensland Dams: Report by Water Monitoring Group, Queensland Department of Natural Resources.- Australia, 1998.- 76 p.
6. **Baljyan P.H., Kelejian H.G., Avanesyan E.V., Tokmajyan V.H.** Evaluation of the Actual State of the Mataghis Reservoir W-H Characteristic and Forecasting of Future Changes // Bulletin of High Technology.-Stepanakert, 2021.- 3(17).- P.14-22.
7. **Юлдашева К.А.** Опыт борьбы с заилинием водохранилищ.-Ташкент: НИЦ МКВК, 2011.- 70с.
8. **Ikramova M.** Regulation of the Amudarya River Runoff by the Tuyamyun Hydro Complex.- Warsaw: RS Global Sp. Z.O.O., 2021. – 78 с.
9. **Караушев А.В.** Теория и методы расчета речных наносов.- Л.: Гидрометеиздат, 1977.- 272 с.
10. **Jansson M.B., and Erlingsson U.** Measurement and quantification of a sediment budget for a reservoir with regular sediment flushing // Regul. Rivers Res. Manage.- 2000.-16.- P.279– 306.
11. **Мирихулава Ц.Е.** Основы физики и механики эрозии русел.- Л.: Гидрометеиздат, 1988.- 303 с.
12. Erosion Rates Deduced from Seasonal Mass Balance along an Active Braided River in Tianshan/ **Y. Lui, F. Metivier, J. Gaillardet, B.Ye, P. Meunier, et al** // Solid Earth Discussion.- 2011.-Vol. 3.- P. 541-589.
13. **Ибаб-заде Ю.А.** Движение наносов в открытых руслах.- М.: Стройиздат, 1974.- 352 с.
14. **Tokmajyan H.V.** On Movement of Suspended Particles in Turbulent Flow // Bulletin of High Technology.- Shushi, 2016.-1(1).- P. 3-10.
15. **Чалов Р.С.** Русловедение: теория, география, практика. Т.1: Русловые процессы: факторы, механизмы и условия формирования речных русел.- М.: ЛКИ, 2008.- 608 с.

Национальный политехнический университет Армении, Гидравлическая лаборатория Шушинского технологического университета. Материал поступил в редакцию 07.09.2022.

Պ.Հ. ԲԱԼԶՅԱՆ, Ա.Վ. ԲԱԼԱՅԱՆ

ՋՐԱՄԲԱՐՈՒՄ ՀԱՏԱԿԱՅԻՆ ՋՐԱԲԵՐՈՒՄԵՐԻ ԿՈՒՏԱԿՄԱՆ ՏԵՄԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼԸ ԵՎ ԴՐԱ ԳՈՐԾԱԿԱՆ ԿԻՐԱՌՈՒՄԸ

Ջրամբարները կարևոր դերակատարում ունեն յուրաքանչյուր երկրի տնտեսական անվտանգության ապահովման և զարգացման գործում: Սակայն ջրամբարի կառուցումը հանգեցնում է մի շարք բացասական հետևանքների. խախտվում է գետի դաբերով ձևավորված կենսահամակարգը, իսկ գետային ջրաբերուկները, կուտակվելով ջրամբարում, շարունակաբար փոքրացնում են դրա կանոնավորման հնարավորությունը: Նշված հիմնահարցին առնչվել են հինգ մայրցամաքներում կառուցված հարյուր հազարավոր ջրամբարների դեպքում: Ելնելով վերը նշվածից՝ արդիական են ջրաբերուկային կուտակումների քանակական գնահատման և դրանց տեղակայման ձևի կանխատեսման խնդիրները: Այդ

խնդիրներից առաջինը բավական լավ է լուծված, սակայն երկրորդ խնդիրը գործնականում մնում է բաց: Աշխատանքի նպատակն է մշակել ջրաբերուկների կուտակման ընթացքի տեսական մոդել և դրա հիման վրա կանխատեսել ջրամբարում կուտակման ծավալի տեղաբաշխման կոորդինատները: Առաջարկված չափորոշիչը հնարավորություն է տալիս հաշվարկել ջրամբարի այն հատույթների տեղադիրքը, որտեղ կարող են կանգ առնել տարբեր չափերի հատակային ջրաբերուկները: Հոսանքի, ջրաբերուկների և հունի հիդրոլոգիական, հատիկաչափական և երկրաչափական ելքային բնութագրերի դեպքում ստացվել է ջրամբարի երկարությամբ բերվածքների կուտակման կոորդինատների հաշվարկի կախվածություն: Ջրաբերուկների հաշվեկշռային հավասարման կիրառմամբ լուծվել է նաև կուտակման շերտի փոփոխության կանխատեսման խնդիրը: Ստացված արտահայտությունը թույլ է տալիս ժամանակից կախված որոշել ջրաբերուկային կուտակումների ընթացիկ մակարդակը: Կատարված մշակումների արդյունքների հիման վրա, հաշվի առնելով շահագործման ընթացքում ջրամբարի ծավալում կատարվող փոփոխությունները, պարբերաբար ճշտվում է դրա նախագծային բնութագիրը:

Առանցքային բառեր. ջրամբար, հատակային ջրաբերուկներ, կուտակում, ջրաբերուկների ելք, կուտակման տեղամաս:

P.H. BALJYAN, A.V. BALAYAN

A THEORETICAL MODEL OF THE BOTTOM SEDIMENT ACCUMULATION PROCESS IN A RESERVOIR AND ITS PRACTICAL USE

Reservoirs play an important role in the development of each country and ensure its economic security. However, the construction of reservoirs leads to a number of negative consequences: the river ecosystem formed over centuries is disturbed, and river sediments deposited in the reservoir, gradually reduce its regulatory capacity. This problem is faced by hundreds of thousands of reservoirs built in five continents. Based on the foregoing, the tasks of quantitative assessment of sediment deposits and forecasting the shape of their location in the reservoir are topical. The first of these problems has been fairly well solved, but the second one practically remains open. The purpose of the work is to develop a theoretical model of the process of sedimentation of bottom sediments and, on its basis, to predict the coordinates of the location of the accumulation volume in the reservoir. A criterion is proposed that makes it possible to calculate the location of those sections of the reservoir where bottom sediments of various sizes can be deposited. Given the initial hydrological, granulometric, and geometrical characteristics of the flow, sediment, and channel, the dependence of calculating the coordinates of sediment deposits along the reservoir is derived. The problem of predicting the change in the sediment layer is also solved using the sediment balance equation. The resulting expression allows, depending on the time, to set the current level of sedimentation. Based on the results of the developments carried out, taking into account the changes occurring in the volume of the reservoir during the operation period, its design characteristics are periodically updated.

Keywords: reservoir, bottom sediments, accumulation, sediment expenditure, sediment area.