

# Заиление водохранилищ на реке Нарын

**В.А.Биленко, к.т.н., доцент**

*На основании данных наблюдений за твердым стоком реки Нарын произведен анализ заиления Учкурганского водохранилища, расчет заиления Токтогульского водохранилища и распределения наносов по его акватории.*

Река Нарын прорезает гряду юрских меловых и третичных песчаников, глин и конгломератов. Большие уклоны и скорости течения обуславливают перенос рекой огромного количества взвешенных наносов, крупных донных наносов и даже валунов. Основной сток как взвешенных, так и донных наносов проходит в паводок. По минералогическому составу взвешенные наносы представлены кварцем, гранитом, полевым шпатом, кремнием, биотитом, рудными минералами и др [1].



Рис.1. Нижненарынский каскад ГЭС.

Освоение водных ресурсов Нарына началось в конце 50-х годов, когда была создана строительная организация «Нарынгидроэнергострой» для сооружения Учкурганского гидроузла, а в дальнейшем и последующих гидроузлов в бассейне Нарына. Непосредственно на Нарыне построено пять ГЭС, схематическое изображение которых приведено на рис.1, а в табл.1 даны характеристики гидроузлов с водохранилищами.

Первенцем в Нарынском каскаде ГЭС является Учкурганский гидроузел, введенный в эксплуатацию в 1961 г., а наиболее крупным как по мощности, так и по объему водохранилища является Токтогульский гидроузел, введенный в эксплуатацию в 1975 г. Хронологический ход ввода в эксплуатацию водохранилищ соответствует и ходу их заиления. Рассмотрение процессов заиления начнем с Учкурганского водохранилища.

Таблица 1

**Характеристики гидроузлов Нижнеарынского каскада ГЭС**

Название гидроэлектростанции	Год ввода первого агрегата	Расчет. напор Н, м	Устан. мощность МВт	Водохранилище			
				Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Полный объем, млн. м <sup>3</sup>	Полезный объем, м <sup>3</sup>	Протяженность км
Токтогульская	1975	140	1200	284,3	19500	14000	80
Курпсайская	1981	91,5	800	12,0	370	35	40
Ташкумырская	1985	53	450	7,8	140	16	20
Шамалдысайская	1990	26	240	2,4	40	5,7	12
Учкурганская	1961	29	180	4,0	53,4	20,9	17

Сооружение плотины Учкурганской ГЭС в узком каньоне образовало водохранилище длиной около 17 км и с площадью зеркала 4 км<sup>2</sup>, объемом 52,5 млн. м<sup>3</sup>, с полезной емкостью 20,9 млн. м<sup>3</sup> предназначенное для суточного регулирования стока и создания запаса воды для орошения.

В целях сохранения полезной емкости водохранилища и обеспечения транзита наносов в нижний бьеф в период концентрации твердого стока (апрель - август) в Саогидропроекте, при участии персонала станции, были разработаны мероприятия по рациональному режиму эксплуатации водохранилища. Мероприятия предусматривали снижение уровня воды в верхнем бьефе на 5 м относительно нормально подпертого уровня (НПУ) и проведение промывок сосредоточенными расходами 1000...1500 м<sup>3</sup>/с. Предполагалось, что при таком режиме «мертвый» объем водохранилища окажется занесенным за 5...6 лет, а объем полезной призмы останется не тронутым [3].

За период с 1962 по 1973 гг., до перекрытия р. Нарын в створе Токтогульской ГЭС, в Учкурганское водохранилище поступал бытовой сток наносов реки, а проведению специальных мероприятий по рациональному режиму эксплуатации водохранилища препятствовал забор воды в каналы (Большой Ферганский, Уч-Курганский, Северо-Ферганский и имени Ахун-Бабаева), расположенные ниже Учкурганской ГЭС, вследствие чего оно существенно заилено.

Наблюдения за изменениями емкости водохранилища велись и в последующие годы [8]. В состав работ входили промеры русла р.Нарын на участке водохранилища и подсчет объемов водохранилища.

По данным промеров глубин [8] построены кривые объемов Учкурганского водохранилища, приведенные на рис. 2.

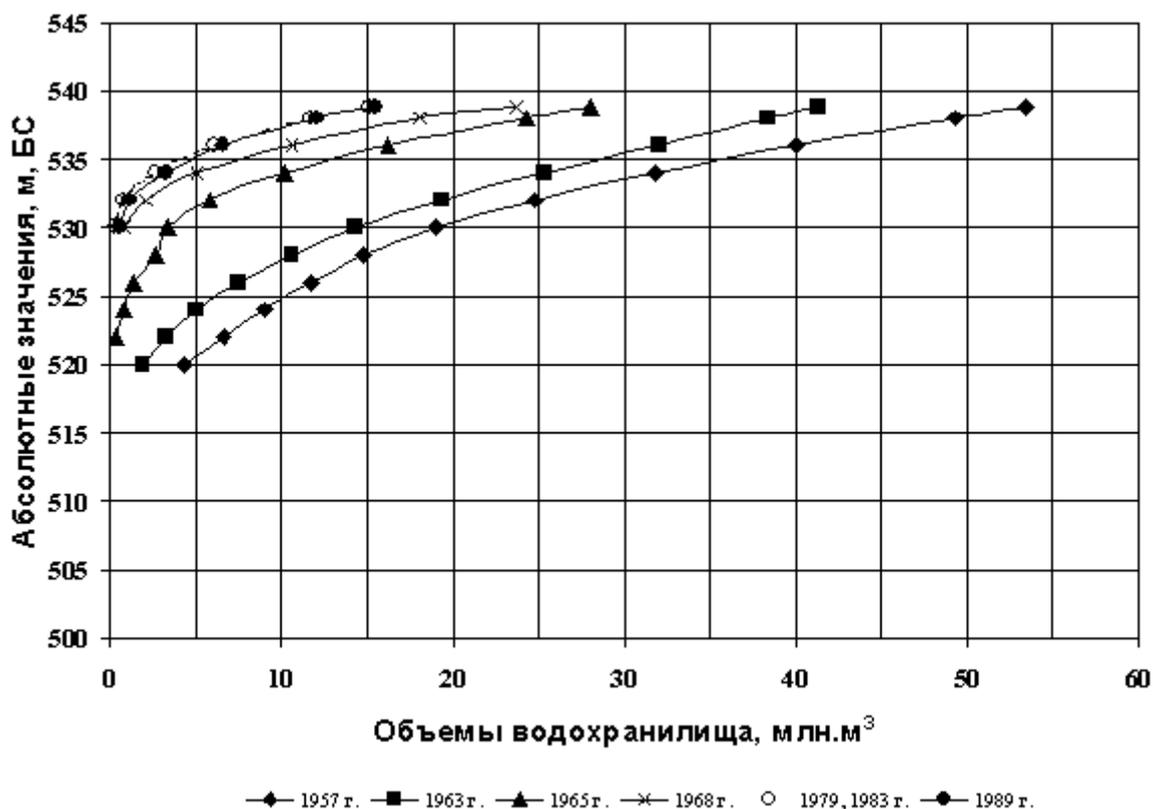


Рис. 2. Кривые объемов Учкурганского водохранилища.

По годам изменение емкости Учкурганского водохранилища имеет следующую динамику: в 1957 г. – 54 млн.м<sup>3</sup>, в 1963 г. – 42 млн.м<sup>3</sup> в 1968 г. – 24 млн.м<sup>3</sup>, с 1978 г. и по настоящее время – 15,5 млн.м<sup>3</sup>. Таким образом, полная емкость Учкурганского водохранилища равна 15,5 млн. м<sup>3</sup>, что почти в 3,5 раза меньше его проектной емкости, а полезная – 11,0 млн.м<sup>3</sup>.

Сопоставление продольных профилей, выполненных по съемкам 1957...1989 г. показывает, что наибольшая толща отложения наносов до 25 м по глубине отмечаются на расстоянии 1880...2735 м от створа плотины. По результатам анализа гранулометрического состава [8], толща этих отложений на этом участке сформирована наносами с процентным содержанием пылевых фракций диаметром менее 0,05 мм до 62,5%. В верхней части водохранилища толщина наносов уменьшается и сформирована преимущественно наносами  $d=0,004...0,04$  мм, перемежающимися фракциями со средним диаметром 0,1 мм с включением камней  $d=0,3$ м.

Водохранилище на данный момент почти полностью заполнено наносами и это обстоятельство оказывает отрицательное влияние на режим работы водохранилища и безопасность плотины в отношении паводковых явлений, в частности, по результатам обследования, выполненного нами в 2000 г. [4], было выявлено, что из 8 донных водосбросов плотины 3 оголовка водосброса заилены. Задача очистки водохранилища Уч-Курганской ГЭС на р. Нарын является актуальной для его эксплуатации.

Объем выноса твердой фазы малых водотоков на участке Учкурганского водохранилища незначительный и существенно не может влиять на его заиливание [8]. Кроме того, как следует из [3], при правильной эксплуатации возможна самоочистка водохранилища. Поэтому, на наш взгляд, единожды проведенная очистка обеспечит нормальную эксплуатацию водохранилища на многие десятки лет.

Заиление вышележащих водохранилищ Шамалдысайской, Ташкумырской и Курпсайской ГЭС нами не рассматривается, т.к. сток наносов р. Нарын к началу их строительства уже полностью задерживается Токтогульским водохранилищем.

Рассмотрим заиление Токтогульского водохранилища расположенного первым в Нижненарынском каскаде ГЭС с полным объемом 19,5 млрд. м<sup>3</sup>. Анализ расходов и стока взвешенных наносов в Токтогульское водохранилище производился на основании наблюдений, проводимых с 1964 г. на гидропосту Уч-Терек, расположенном выше водохранилища.

Согласно данным Гидрометцентра Кыргызстана [5] был составлен ряд значений средних месячных расходов наносов на реке Нарын, в районе станции Уч-Терек. К сожалению, некоторые данные отсутствовали (помечены скобками), что объясняется недостатком материальной базы Гидрометцентра Кыргызстана и неблагоприятными погодными условиями (наличие ледяного покрова и др.) во время проведения замеров, не позволяющими проведение данного вида работ. Недостающие данные были получены нами интерполяцией имеющихся данных.

В результате получился ряд размером 27 лет, с 1964 по 1992 г., за исключением 1976 и 1988 г., который представлен в табл. 2. Вычисление среднегодового расхода взвешенных наносов  $R_0$  и коэффициента вариации  $C_{VR}$  произведены по известным формулам [2, 6]. При наличии данных многолетних измерений стока наносов среднемноголетний расход  $R_0$  определен по формуле:

$$R_0 = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – период наблюдений, а коэффициент вариации  $C_{VR}$  вычислен по формуле:

$$C_{VR} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{R_i} - I)^2}{n}}. \quad (2)$$

Таблица 2

**Среднемесячные расходы наносов на р. Нарын,  
в районе станции Уч-Терек, кг/с**

Год	Месяцы												Ср. годовые
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1964	(10)	(10)	(70)	(60)	40	2700	440	68	13	1,4	(2)	(2)	(285)
1965	(10)	(10)	24	90	90	120	1100	580	98	37	48	(18)	(185)
1966	52	(25)	(40)	(750)	1500	7000	1900	1700	250	50	29	32	(1111)
1967	(15)	20	53	970	(2500)	2000	1200	460	85	30	9,5	17	(613)
1968	(7,2)	18	74	470	970	2500	1500	980	120	14	22	9,4	(557)
1969	18	27	510	1500	5200	5200	4400	1200	530	89	30	18	1600
1970	6,9	31	35	370	1300	1300	1900	700	210	23	15	7,4	490
1971	6,1	31	210	270	360	2500	880	470	65	28	31	16	410
1972	10	10	95	150	590	1600	840	920	71	33	50	11	360
1973	(10)	(20)	42	600	1400	3200	2000	670	210	3,2	(16)	(10)	680
1974	(15)	(20)	5,9	140	370	630	680	330	43	7,7	(10)	(20)	190
1975	(8)	(10)	6,4	220	220	1900	590	570	64	(10)	(15)	(4)	(301)
1977	(2)	(10)	(75)	150	(900)	(970)	600	400	62	71	46	8,3	(275)
1978	3,5	1,8	69	1100	1400	930	1000	1000	35	9,1	8	20	460
1979	4,1	6,9	110	1200	1000	2700	(1700)	880	85	170	23	(18)	(658)
1980	(2)	(17)	(75)	180	1700	930	640	380	46	14	(6)	(8)	(333)
1981	15	35	49	230	1300	1100	1100	270	41	19	21	6,4	350
1982	(10)	(6)	35	340	340	130	360	450	38	12	10	(2)	(144)
1983	1,1	7,9	37	160	880	1300	1100	1100	170	49	14	10	400
1984	5,8	12	110	520	320	720	480	1100	46	15	14	2,8	280
1985	(10)	(10)	41	430	280	780	520	230	(10)	15	17	(10)	(196)
1986	2,1	16	32	200	280	940	880	360	54	28	10	7	230
1987	6,7	8,2	120	240	1200	3000	2900	1100	110	100	34	21	740

Год	Месяцы												Ср. годовые
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1989	(10)	(10)	(110)	(610)	(2400)	1800	1400	450	90	26	23	12	(578)
1990	45	35	280	720	2100	1400	1200	520	270	43	24	24	560
1991	(15)	(15)	200	320	440	2300	1400	670	170	24	25	(10)	(466)
1992	(12)	(10)	130	480	580	920	1300	310	63	22	15	15	(321)

В результате вычислений выполненных по формулам (1) и (2) получили среднемноголетний расход наносов  $R_0=473$  кг/с и коэффициент вариации  $Cvr=0,655$ .

Результаты выполненного расчета расхода наносов заданной обеспеченности по программе FLIKE (Log Pearson III) приведены в табл.3.

Таблица 3

#### Расход наносов при различных значениях обеспеченности

Обеспеченность $P\%$	0,1	0,5	1,0	2,0	10,0	50,0
Расход наносов $R_0$ , кг/с	3548	2335	1920	1560	894	392

Фракционный состав наносов принят по [5] для гидростов, ближайших к гидроствору Уч-Терек. В табл. 4 приведены значения фракционного состава наносов Нарына на участке Нижненарынского каскада ГЭС.

Таблица 4

#### Средний гранулометрический состав взвешенных наносов в р. Нарын

Пост	Годы наблюдений	Число проб	Крупность наносов в мм и содержание в % от общего количества			
			>0,20	0,20-0,05	0,05-0,01	<0,01
р. Кекирим	1938-1943, 1956-1960	202	2,9	21,2	17,7	58,2
с. Алексеевка	1933-1935, 1937-1942 1948, 1950-1952, 1954, 1957, 1958	74	1,8	21,9	21,5	54,8
ст. Верхне-Учукрганская	1953-1957		2,8	25,0	19,1	53,2
кишл. Учкурган	1929, 1931-1944, 1946-1962	124	2,4	15,2	27,2	55,2

Из табл.4 видно, что средний гранулометрический состав взвешенных наносов в р. Нарын на данном участке реки почти не изменяется, поэтому нами для дальнейших расчетов принято распределение по гидроствору с. Алексеевка.

Суммарная приближенная оценка продолжительности периода заполнения водохранилища наносами может быть произведена по уравнению [2]:

$$T = \frac{W_B}{W_H(1 - \delta)}, \quad (3)$$

где  $T$  – средняя продолжительность периода заиления водохранилища в годах;  $W_B$  – мертвый объем водохранилища в м<sup>3</sup>;  $W_H$  – средний годовой объем наносов в м<sup>3</sup>;  $\delta$  – транзитная часть наносов мелких фракций, сбрасываемых из водохранилища при паводках, в долях от общего объема наносов, для равнинных водотоков в среднем  $\delta=0,3-0,4$ .

Средний годовой объем наносов  $W_H$ , может быть определен по формуле:

$$W_H = \frac{31500R_0}{\beta}, \quad (4)$$

где  $R_0$  – средний годовой расход наносов в кг/сек;  $\beta$  – объемный вес наносов в т/м<sup>3</sup>, равный от 0,5...0,7 для илистых наносов в первые годы отложений до 1,0...1,5 для песчаных или илистых уплотненных наносов.

Оценка распределения наносов по акватории водохранилища основывается на учете скоростей течения в водохранилище  $V_{cp}$  и скорости выпадения взвешенных в потоке частиц данной крупности  $V_b$ . Зависимость между  $V_{cp}$  и  $V_b$  можно выразить следующим уравнением:

$$v_b = u \left(1 - \frac{v_{cp}}{v_k}\right), \quad (5)$$

где  $u$  – гидравлическая крупность наносов;  $v_k$  – предельная скорость выпадения частиц, определяемая по формуле:

$$v_k = 3,7 d^{\frac{1}{3}} H^{\frac{1}{6}} \text{ м/с}, \quad (6)$$

где  $H$  – средняя глубина на участке длиной  $L$ ;  $d$  – средний диаметр частиц в м.

Зная скорость осаждения взвешенных наносов и среднюю скорость течения на каком-либо участке водохранилища, можно вычислить путь  $L$ , на протяжении которого выпадут наносы рассматриваемой крупности

$$L = tv_{cp} = \frac{H}{v_b} v_{cp}, \quad (7)$$

где  $L$  – длина участка в м, на котором выпадут наносы, имеющие скорость падения в текучей воде  $u$  м/сек;

$t$  – время выпадения частиц данной фракции;

$V_{cp}$ —средняя скорость течения воды на участке водохранилища длиной  $L$ , которая может быть получена как частное от деления расхода воды  $Q$ , вытекающего из водохранилища, на среднюю площадь сечения водохранилища  $\omega$  на участке длиной  $L$ , т. е.

$$v_{cp} = \frac{Q}{\omega} \quad (8)$$

При расчете заиления Токтогульского водохранилища за основу был взят ряд наблюдений за твердым стоком на гидропосту Уч-Терек (см. табл. 3), расположенным выше Токтогульского водохранилища. По формуле (4) был рассчитан средний годовой объем стока

наносов равный 
$$W_H = \frac{31500 \cdot 473}{1} = 16.6 \text{ млн. тонн}$$

Далее принимая, что мертвый объем Токтогульского водохранилища равен 5,5 млрд. м<sup>3</sup>, и принимая транзитную часть наносов мелких фракций, сбрасываемых из водохранилища при паводках, в долях от общего объема наносов  $d = 5\%$ , по формуле (3) было рассчитано возможное время заиления мертвого объема

Токтогульского водохранилища которое составило 
$$T = \frac{5,5 \cdot 10^9}{16.6 \cdot 10^6 (1 - 0.05)} = 350 \text{ лет}$$

Как следует из изложенного выше, оценка распределения наносов по акватории водохранилища основывается на учете скоростей течения  $V_{cp}$  в водохранилище и скорости выпадения взвешенных в потоке частиц данной крупности  $V_B$ , зависимость между которыми определяется по формуле (5). Гидравлическую крупность наносов, входящую в формулу (5) определяли по табл. 9,3 [2], а предельную скорость выпадения частиц, определяли по формуле (6).

При расчете распределения наносов по акватории водохранилища принято 6 створов на равном расстоянии друг от друга. Таким образом, имея данные о твердом расходе, крупности, или гранулометрическом составе наносов, поступающих в водохранилище, о величине расхода воды и площади поперечных сечений на различных участках водохранилища, по уравнению (7) было определено, на каком расстоянии от зоны выклинивания подпора произойдет осаждение частиц различной крупности. Расчеты сведены в табл.6.

Таблица 6

**Расчет распределения наносов по акватории водохранилища**

Расчетные параметры	Диаметр частиц, мм	Номера расчетных створов (расстояние, км)					
		1 (0,0)	2 (2,0)	3 (4,0)	4 (6,0)	5 (8,0)	6 (10,0)
Площадь сечения водохр., м <sup>2</sup>		1000	5000	10000	25000	50000	100000
Ширина водохранил., м		200	500	700	1120	1570	2200
Глубина водохранил., м		5,0	10,0	14,3	22,3	31,8	45,5
Ср. скорость воды $V_{ср}$ , м/с		1,558	0,3116	0,1558	0,06232	0,03116	0,01558
Предельная скорость выпадения частиц, $V_k$ , м/с	0,2	0,283	0,318	0,337	0,363	0,385	0,409
	0,05	0,178	0,200	0,212	0,229	0,243	0,258
	0,01	0,104	0,117	0,124	0,134	0,142	0,151
Скорость выпадения частиц, $V_b$ , м/с	0,2	отриц.	0,004	0,113	0,174	0,193	0,202
	0,05	отриц.	отриц.	0,001	0,001	0,002	0,002
	0,01	отриц.	отриц.	отриц.	0,00004	0,00006	0,00007
Длина уч. выпадения частиц, L, м	0,2	проносится	785,6	19,7	8,0	5,1	3,5
	0,05	проносится	проносится	4180,0	956,0	569,3	376,8
	0,01	проносится	проносится	проносится	32557,2	15894,1	9873,8

На основании результатов, приведенных в табл.6 определено расстояние, на котором произойдет выпадение частиц взвешенных наносов заданного фракционного состава: фракции диаметром  $d=0,2$  мм выпадут приблизительно на расстоянии 2,8 км,  $d=0,05$ мм – 8,2 км и  $d=0,01$ мм – 19,9 км.

По результатам полученных данных можно сделать следующие выводы:

По Учкурганскому водохранилищу:

- Сравнение результатов промеров по поперечникам с изучением мутности показывает, что объем заиления почти полностью определяется объемом

взвешенных наносов; донные наносы не оказывают существенного влияния на заиление водохранилища.

- На основании изучения имеющихся материалов по заилению водохранилища и его очистке [8] и наших обследований (2000 г.) установлено, что очистка водохранилища остается актуальной задачей. Для проведения мероприятий по очистке необходимо: провести батиграфическую съемку водохранилища; разработать проект очистки.

По Токтогульскому водохранилищу:

- Период заиления мертвого объема довольно продолжительный, более 350 лет, но заиление устьевой части водохранилища может привести к поднятию дна.
- Выпадение даже самых мелких фракций наносов произойдет на расстоянии до 20 км от устья, т.е в пределах Кетмень-Тюбинской долины.
- В обозримом будущем наносы не достигнут створа плотины и не могут повлиять на работу и безопасность Токтогульской ГЭС.

### **Литература**

1. Бассейн реки Нарын (физико-географическая характеристика) /Под редакцией Р.Д.Забирова и В.А.Благообразова. – Фрунзе: Изд-во АН Кирг. ССР, 1960. – 229 с.
2. Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеиздат, 1979.
3. Зырянов А.Г. Динамика заиления водохранилища Учкурганской ГЭС и опыт борьбы с наносами // Гидротехническое строительство, № 1. – М., 1973, – С. 32–37.
4. Отчет по оценке безопасности Токтогульской и Учкурганской плотин. Компонент С «Безопасность плотин и управление водохранилищами». Проект GEF. – Бишкек, 2001.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. – Т. 14. Средняя Азия. Вып. 1. Бассейн р. Сыр-Дарьи // Под ред. И.А. Ильина. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 439 с.
6. Строительные нормы и правила. СНиП 2.01.14–83. Определение расчетных гидрологических характеристик. – М.: Стройиздат, 1985.
7. Токтогульская ГЭС на р. Нарын. Технический проект основных сооружений, том 1. Природные условия. Кн. 2. Инженерно – геологические условия. – 1036-ТЗ. – САО «Гидропроект», 1969.
8. ТЭР расчистки водохранилища Учкурганской ГЭС на р.Нарын. Проект № 3805-17 / ВО «СОЮЗГИДРОЭНЕРГОСТРОЙ». – М., 1990.