



УДК 532,5.07.122

<https://doi.org/10.5281/zenodo.22296244>

МОДЕЛИРОВАНИЕ УМЕНЬШЕНИЯ ОБЪЕМА ВОДОХРАНИЛИЩА НА ОСНОВЕ ВОДНОГО БАЛАНСА

Каниев Ж.М. доцент, Ташкентского международного университета Кимё.,
Яхшибаев Д.С. проф., Первый проректор по духовно-воспитательной работе
Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада
ал-Хоразмий, *Абдурахмонова Ф.Ш.* Заместитель декана, Ташкентского
университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий,
факультет программной инженерии, *Мусурмонов С.У.* Преподаватель,
Ташкентского международного университета Кимё

Аннотация. В работе предложен метод оценки уменьшения полезного и полного объема водохранилища вследствие заиливания на основе данных водного баланса за прошлые годы эксплуатации. Метод предназначен для условий, когда регулярные батиметрические съемки чаши водохранилища отсутствуют или выполняются с большими интервалами. Исходными данными служат суммы приходных и расходных составляющих водного баланса, ежемесячные отметки уровней воды и проектная зависимость объема от уровня. Уменьшение объема определяется по разности между проектным объемом в диапазоне максимальной и минимальной отметок и фактическим изменением запасов воды по балансу. Для снижения влияния случайных ошибок используется сглаживающая степенная зависимость между накопленным уменьшением объема и объемом стока, параметры которой определяются методом наименьших квадратов. На материалах Каттакурганского, Чимкурганского и Южносурханского водохранилищ получена эмпирическая зависимость распределения заиливания по глубине. Для Каттакурганского водохранилища установлены зависимости уменьшения полезного и полного объема от

накопленного стока. Сопоставление расчета с данными съемки 1986 г. показало расхождение менее 1 % для уменьшения полезного объема. Предложенный подход позволяет актуализировать кривую «отметка–объем» и оценивать потерю регулирующей емкости по годам эксплуатации.

Ключевые слова: водохранилище; заиление; водный баланс; полезный объем; полный объем; наносы; объем стока; кривая «отметка–объем»

Введение

Гарантированный период запланированного режима водоподачи определяется сроком его заиления. Оно заключается в отложении взвешенных и донных наносов. Но так как взвешенные наносы составляют основную долю (90-95 %) твердого стока, то процесс называется заилением. Донные наносы на протяжении всего периода заиления откладываются полностью, и их объем обычно включают в общий сток наносов. Отложение наносов в верхнем бьефе на определенном этапе заиления настолько сокращает полезную регулируемую емкость водохранилищ, что приводит к нарушению запланированного режима работы водоисточника и ухудшению режима работы оросительных систем. Поэтому прогноз сроков заиления необходим для определения параметров водохранилища и плотины, своевременной разработки экономически целесообразных режимов эксплуатации и мероприятий по уменьшению наносных отложений и восстановлению потерянной из-за наносов емкости водохранилища, а также для определения зон интенсивного выпадения мельчайших наносов и удаления их с помощью специальных устройств.

Заиление водохранилищ имеет две стадии. При первой из них происходит полное отложение в верхнем бьефе всех поступающих наносов.

На второй - наблюдается отложение наносов с затухающей интенсивностью. Сбросная мутность при этом постепенно возрастает и в конце заиления близка к бытовой.

По режиму работы все гидроузлы подразделяются на подпертые бьефы и водохранилища. Для первых характерен стационарный уровневый режим, а для водохранилищ - переменный.

Методы расчета заиления разработаны только для стационарного уровня. В случае необходимости учета сработки уровней при расчетах заиления принимаются поэтапно параметры водохранилищ, соответствующие разным уровням сработки.

Одним из условий эффективной и экономичной эксплуатации водохранилищ является наличие информации об объеме водохранилищ. Этот объем с каждым годом эксплуатации непрерывно уменьшается из-за осаднения наносов.

За год в водохранилище могут накапливаться миллионы кубометров наносов, поэтому объем водохранилища по кривой зависимости от отметки уровня в нём определяется с возрастающей погрешностью. Следовательно, необходим метод учёта непрерывного изменения объема водохранилища годами его эксплуатации. Такой метод нами разработан на основе водного баланса прошлых лет эксплуатации водохранилища.

Теоретические основы расчета речного стока, гидравлики и заиления водохранилищ изложены в классических гидротехнических работах [6–10].

Современные исследования подтверждают необходимость регулярной оценки потери емкости водохранилищ и актуализации зависимости «отметка–объем». Для этих целей применяются батиметрические съемки, ГИС- и геостатистические методы, дистанционное зондирование, а также реконструкция кривых объема по гидрологическим и седиментационным данным [1–5]. Предлагаемый в настоящей работе подход дополняет эти методы возможностью оценки изменения объема по многолетним данным водного баланса.

Материалы и методы

Для расчета необходимы данные о сумме приходных и расходных составляющих водного баланса водохранилища за несколько прошлых лет

эксплуатации, а также за эти же годы отметки уровней воды в водохранилище в конце каждого месяца.

Исходные данные надо брать за годы, в течение которых водохранилище наполняется до отметки НПУ или близкой к нему, а минимальная отметка бывает близкой к УМО, так как в противном случае точность расчёта ухудшается. Для расчёта необходима также проектная кривая зависимости объема водохранилища от отметки уровня в нём.

Уменьшение объема водохранилища с начала эксплуатации до расчётного года надо определять по зависимости:

$$\Delta V = (V_{\text{макс}} - V_{\text{мин}}) - (\Sigma\P - \Sigma P) \quad (1)$$

где $V_{\text{макс}}$ и $V_{\text{мин}}$ — объём водохранилища, определенный по проектной кривой при максимальной и минимальной отметках в конце месяца;

$\Sigma\P$ и ΣP — сумма приходных и расходных составляющих водного баланса водохранилища за месяцы, начиная с месяца, следующего за месяцем с максимальной отметкой уровня, и включительно до месяца с минимальной отметкой уровня.

В формуле (1) разность $(V_{\text{макс}} - V_{\text{мин}})$ характеризует объём водохранилища в начале эксплуатации по проектной кривой, а разность $(\Sigma\P - \Sigma P)$ — фактическое изменение объёма воды в расчетном году при снижении уровня от максимальной отметки в паводок до минимальной в межень. Абсолютная величина этой разности соответствует объёму водохранилища между минимальной и максимальной отметками в расчетном году.

Величина ΔV по формуле (1) определяется со значительной погрешностью, так как все составляющие водного баланса могут содержать случайные ошибки измерения и учета.

Чтобы уменьшить погрешность определения ΔV , необходимо вычислить ΔV за несколько прошедших лет, а затем построить сглаживающую зависимость ΔV от объема стока питающей водохранилище реки. Использовать непосредственно время эксплуатации нецелесообразно, поскольку объём стока,

являющийся основным фактором поступления наносов, существенно изменяется по годам.

Зависимость ΔV от объема стока O_c с начала эксплуатации водохранилища до расчетного года определяется в виде

$$\Delta V = K \cdot O_c^n \quad (2)$$

где n и K определяются согласно методу наименьших квадратов по формулам

$$n = \frac{m(\sum_{i=1}^m \ln O_c \cdot \ln \Delta V) - \sum_{i=1}^m \ln O_c \cdot \sum_{i=1}^m \ln \Delta V}{m \sum_{i=1}^m (\ln O_c)^2 - (\sum_{i=1}^m \ln O_c)^2} \quad (3)$$

$$K = \exp \frac{\sum_{i=1}^m \ln O_c \cdot \ln \Delta V - n \sum_{i=1}^m (\ln O_c)^2}{\sum \ln O_c} \quad (4)$$

здесь m — число лет, в которых был определен объем заиления ΔV .

Чтобы определить уменьшение полезного объёма водохранилища, в зависимостях (3) и (4) объём заиления должен быть определен между отметками УМО и НПУ.

Для этого необходимо уменьшение объёма, определенного между минимальной и максимальной отметками, привести к уменьшению объёма между УМО и НПУ, то есть к уменьшению полезного объёма водохранилища.

С этой целью можно использовать зависимость

$$\Delta V_{\text{полез}} = \Delta V \cdot \frac{\text{ОтметкаНПУ} - \text{ОтметкаУМО}}{\text{Отметка}_{\text{макс}} - \text{Отметка}_{\text{мин}}} \quad (5)$$

Чтобы определить уменьшение полного объема водохранилища, можно воспользоваться зависимостью

$$\Delta V_{\text{полн}} = \Delta V_{\text{полез}} \cdot \frac{\Delta V_{\text{НПУ}}}{\Delta V_{\text{НПУ}} - \Delta V_{\text{УМО}}} = \Delta V_{\text{полез}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta V_{\text{УМО}}}{\Delta V_{\text{НПУ}}}}, \quad (6)$$

где отношение $\Delta V_{\text{УМО}}/\Delta V_{\text{НПУ}}$ можно определить по зависимости следующего вида, полученной по натурным наблюдениям на водохранилищах: $\frac{\Delta V_{\text{УМО}}}{\Delta V_{\text{НПУ}}}$

$$\frac{\Delta V_H}{\Delta V_{НПУ}} = K_1 \left(\frac{H}{H_{НПУ}} \right)^{n_1} \quad (7)$$

Здесь

$$n_1 = \frac{m \sum_{i=1}^m \ell n \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right) \cdot \ell n \left(\frac{\Delta V_H(h)}{\Delta V_{НПУ}} \right) - \sum_{i=1}^m \ell n \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right) \cdot \sum_{i=1}^m \ell n \left(\frac{\Delta V_H(h)}{\Delta V_{НПУ}} \right)}{m \sum_{i=1}^m \left[\ell n \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right) \right]^2 - \left[\sum_{i=1}^m \ell n \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right) \right]^2} \quad (8)$$

$$K_1 = \exp \frac{\sum_{i=1}^m \ell n \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right) \cdot \ell n \left(\frac{\Delta V_H(h)}{\Delta V_{НПУ}} \right) - n_1 \cdot \sum_{i=1}^m \left[\ell n \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right) \right]^2}{\sum_{i=1}^m \ell n \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right)}, \quad (9)$$

где ΔV_H и $\Delta V_{НПУ}$ - объёмы заиления от дна до глубины H при изменении h до отметки $НПУ$;

m — число водохранилищ, результаты съёмки чаши которых были использованы для вычисления n_1 и K_1 .

Для получения зависимости (7) использованы съёмки чаши: Чимкурганского, Каттакурганского, Южносурханского водохранилищ.

Эти данные приведены в табл. 1, а кривая зависимости показана на рис. 1

Таблица 1 – Натурные данные по распределению объема заиления по глубине водохранилищ

Водохранилище	Каттакурганское	Чимкурганское	Каттакурганское	Чимкурганское	Южносурханское	Каттакурганское	Чимкурганское
Глубина H , м	2	2	4	4	4	6	6
$H/H_{НПУ}$	0,0625	0,076	0,125	0,153	0,154	0,1875	0,229
$\Delta V_H/\Delta V_{НПУ}$	0,036	0,044	0,072	0,083	0,055	0,107	0,143

Продолжение таблицы 1

Южносурханское	Каттакурганское	Чимкурганское	Чимкурганское	Южносурханское	Каттакурганское	Чимкурганское	Южносурханское
0,231	0,250	0,305	0,344	0,346	0,3125	0,382	0,423
0,145	0,146	0,212	0,267	0,274	0,196	0,267	0,427

По данным таблицы 1, используя (7), (8) и (9), получена формула, пригодная для русловых водохранилищ (рис. 1).

$$\frac{\Delta V_H}{\Delta V_{НПУ}} = 0,95 \left(\frac{H(h)}{H_{НПУ}} \right)^{1,26} \quad (10)$$

Если принять $H = H_{НПУ}$, то по зависимости (6) можно определить уменьшение полного объема водохранилища после определения уменьшения полезного объема.

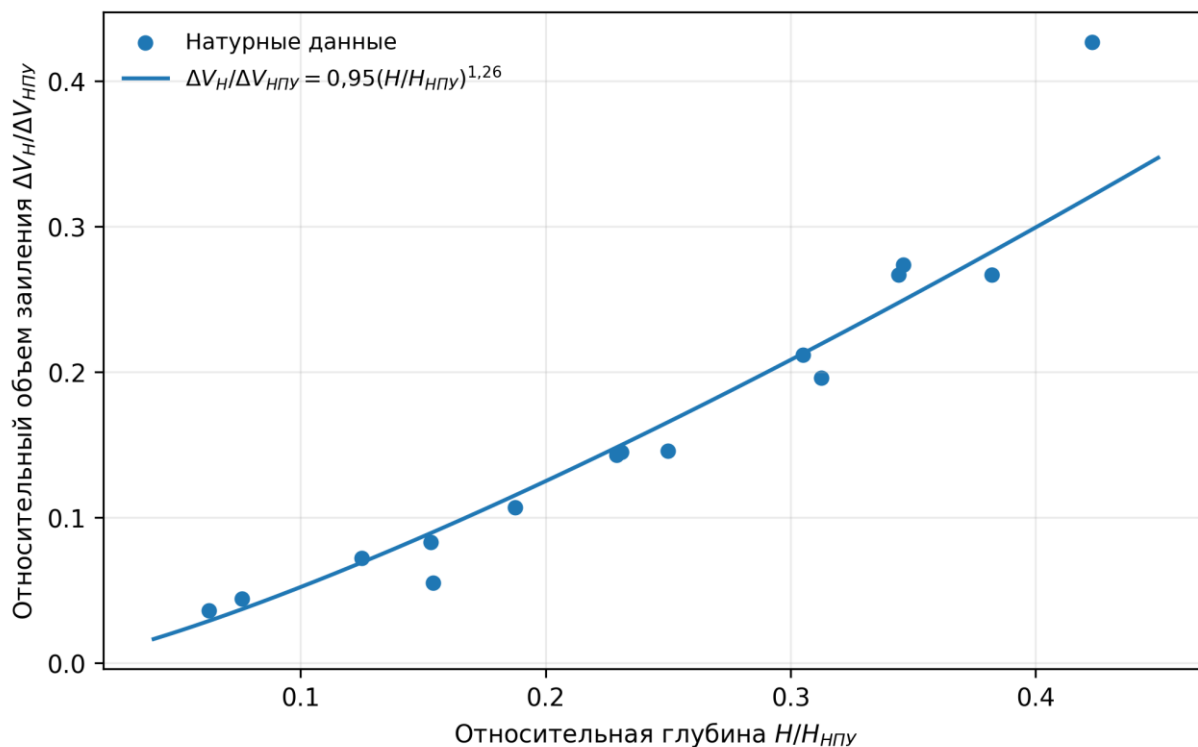


Рисунок 1 – Зависимость относительного объема заиления от относительной глубины для русловых водохранилищ

Для составления зависимости уменьшения объема водохранилища от объема стока питающей реки необходимо определить накопленные объёмы стока по годам эксплуатации водохранилища.

Для определения объема стока, поступающего в Каттакурганское водохранилище с начала его эксплуатации (1960 г.), использованы данные табл. 2 об объёмах стока по р. Кашкадарья (кишл. Чиракчи) по годам, а до 1970 г. — средний годовой объем стока

Таблица 2 – Годовые объемы стока по р. Кашкадарья (кишл. Чиракчи) в 1971–1995 гг.

Год	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
Объём стока за год Q_c , млн.м ³	330	800	950	560	460	73	370	830	750

1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
720	1010	517	495	509	535	144	894	561	315	514	643	1470

1993	1994	1995
1420	896	350

Результаты

На основании данных об объёмах стока в Каттакурганском водохранилище по формулам (2), (3) и (4) получены зависимости уменьшения объема водохранилища от объёма стока

$$\text{уменьшение полезного объема } \Delta V_{\text{полез}} = 0,019 O_c^{0,82} \quad (11)$$

$$\text{уменьшение полного объема } \Delta V_{\text{полн}} = 0,033 O_c^{0,79} \quad (12)$$

В табл. 3 приведены результаты расчета с 1980 г. по 2001 г.

Таблица 3 – Расчетное уменьшение полезного и полного объема Каттакурганского водохранилища в 1980–2001 гг.

Год	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Объём стока за год O_c , млн.м ³	13569	14579	15096	15591	16100	16633	16777	17671	18322	18637
$\Delta V_{\text{полез}}$, млн.м ³	46,5	49,3	50,7	52,1	53,5	54,9	55,3	57,7	59,5	60,3
$\Delta V_{\text{полн}}$, млн.м ³	60,7	64,2	66,0	67,7	69,5	71,3	71,8	74,8	77,0	78,0

1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
19151	19794	21264	22684	23580	23930	24574	25218	25862	26506	27150	27794
61,7	63,4	67,2	70,9	73,2	74,0	75,7	77,3	78,9	80,5	82,1	83,7
79,7	81,8	86,6	91,1	93,9	95,0	97,0	99,0	101	103	105	107

Сопоставление результатов расчёта с данными съёмки 1986 г. показывает хорошую согласованность: по табл. 5 уменьшение полезного объема по съёмке составляет 55,0 млн м³, а расчетное значение по табл. 3 — 55,3 млн м³. Относительное расхождение составляет около 0,55 %, то есть менее 1 % (рис. 2).

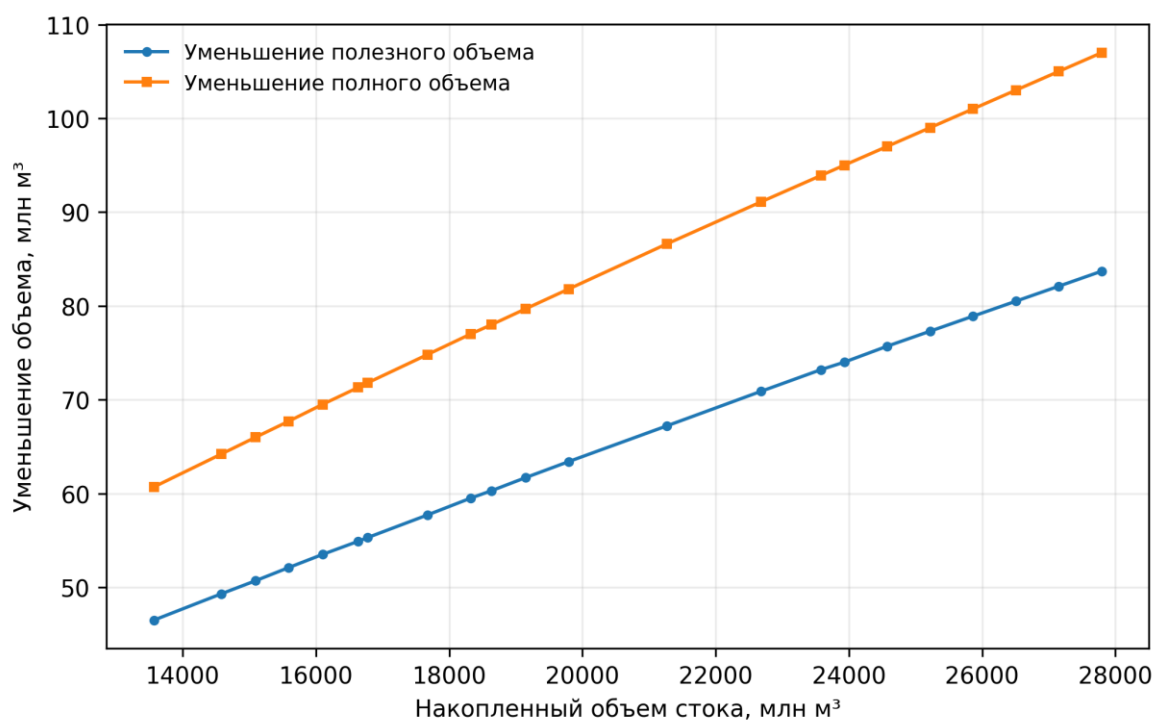


Рисунок 2 – Зависимость уменьшения полезного и полного объема Каттакурганского водохранилища от накопленного объема стока

При наличии данных съёмки чаши водохранилища можно составить зависимость уменьшения объема водохранилища от дна до каждой отметки уровня от этой отметки. Для Чимкурганского водохранилища такая зависимость приведена в табл. 4 и составлена по кривой зависимости объема водохранилища от уровня.

Таблица 4 – Относительное распределение уменьшения объема Чимкурганского водохранилища по отметкам

Отметка, м	462	464	466	468	470	УМО 471	472	474	476	478
$\Delta V/\Delta V_{\text{НПУ}}$	0	0,044	0,083	0,143	0,212	0,267	0,267	0,314	0,374	0,408

480	482	484	486	488	НПУ 488,2
0,466	0,584	0,686	0,854	0,996	1

По данным табл. 4 можно составить кривую зависимости объема водохранилища от отметки уровня в нём на любой расчетный год (табл. 5, рис. 3).

Таблица 5 – Кривые зависимости объема Чимкурганского водохранилища от отметки уровня в различные годы

Отметка, м	по проекту	1970 г.	1980 г.	по съёмке 1986 г.	1990 г.	2000 г.
------------	---------------	---------	---------	----------------------	---------	---------

462	0	0	0	0,01	0	0
464	4	2,4	1,33	0,67	0,5	0
466	10	6,99	4,96	3,79	3,38	1,28
468	22	16,8	13,3	11,29	10,6	6,98
470	40	32,3	27,1	24,11	23,1	17,7
УМО 471	50	40,3	33,8	30,0	28,7	22,0
472	62	52,3	45,8	42,0	40,7	34,0
474	88	76,6	68,9	64,48	63,0	55,0
476	120	106	97,3	91,96	90,2	80,7
478	156	141	131	125,39	123	113
480	200	183	172	165,06	163	151
482	256	235	221	212,23	209	195
484	320	295	278	268,52	265	248
486	400	369	348	335,98	332	310
488	492	456	432	417,30	413	387
НПУ 488,2	500	464	439	425,0	420	395
ФПУ 489,25	550	511	485	470,0	465	438

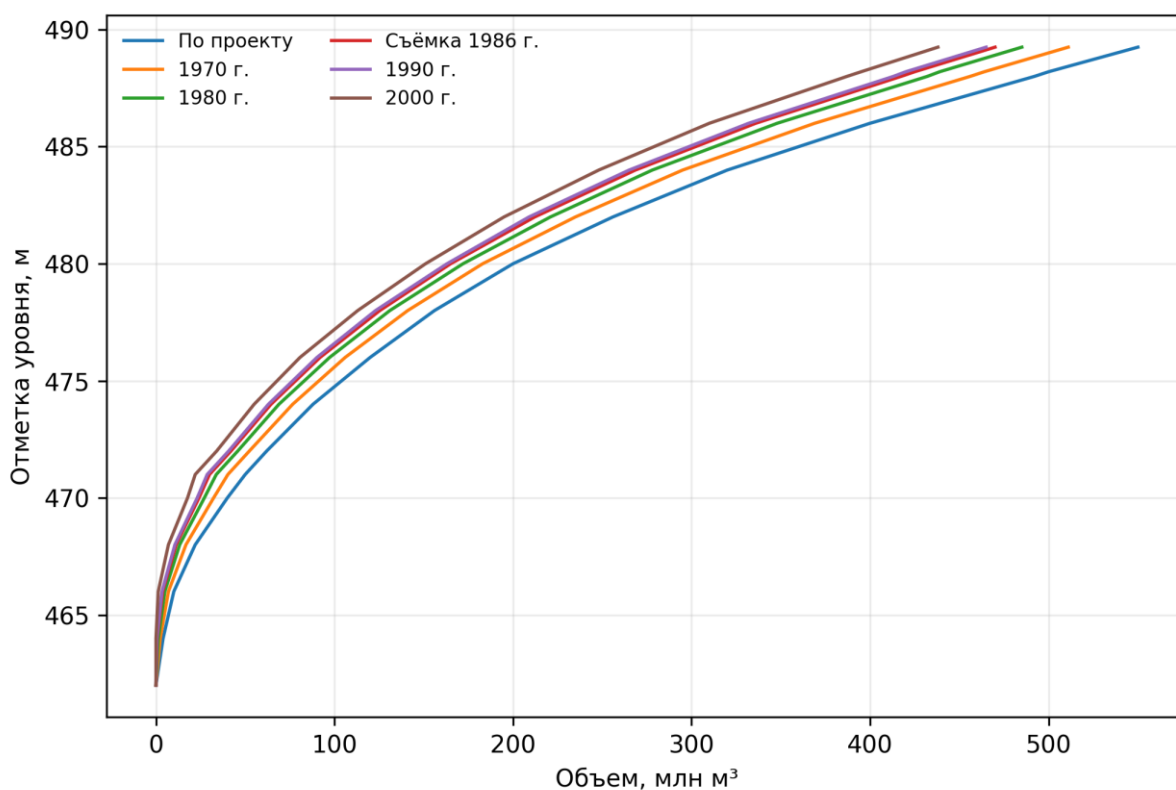


Рисунок 3 – Кривые зависимости объема Чимкурганского водохранилища от отметки уровня в различные годы

Объем водохранилища в зависимости от отметки уровня в нём на любой расчетный год определяется по формуле

$$V = V_{\text{пр}} - \Delta V_{\text{НПУ}} \left(\frac{\Delta V(h)}{\Delta V_{\text{НПУ}}(h)} \right) \quad (13)$$

где $V_{\text{пр}}$ - объем по проектной кривой,

$\Delta V(h)/\Delta V_{НПУ}(h)$ — относительная доля заилиения, принимаемая по данным табл. 4.

Обсуждение и выводы

Полученные зависимости показывают, что уменьшение емкости водохранилища целесообразно связывать не только со временем эксплуатации, но и с накопленным объемом стока, поскольку межгодовая водность существенно изменяется. Для Каттакурганского водохранилища степенные зависимости (11) и (12) позволяют оценивать уменьшение полезного и полного объемов по накопленному стоку. Сопоставление с данными съёмки 1986 г. подтверждает применимость метода в рассмотренном диапазоне исходных данных.

Практическое значение предложенного подхода состоит в возможности периодического уточнения кривой «отметка–объем» между инструментальными съёмками чаши водохранилища. Точность результата определяется качеством приходных и расходных составляющих водного баланса и выбором лет, в которых максимальные и минимальные уровни близки соответственно к НПУ и УМО. Эмпирическая зависимость распределения заилиения по глубине получена по данным трёх русловых водохранилищ; поэтому при переносе на водохранилища иной морфометрии необходима дополнительная проверка по натурным данным.

Таким образом, метод водного баланса может использоваться для оценки потери регулирующей емкости, прогноза изменения полезного и полного объема и актуализации эксплуатационных характеристик водохранилища по годам его работы.

Список литературы

1. Гидротехнические сооружения: Справочник проектировщика. (1985). Стройиздат.
2. Крицкий, С. Н., & Менкель, М. Ф. (1981). Гидрологические основы управления речным стоком. Наука.

3. Хамидов, А. А., & Худайкулов, С. И. (2003). Теория струй многофазной вязкой жидкости. ФАН.
4. Хамидов, А. А., Худайкулов, С. И., & Махмудов, И. Э. (2009). Гидромеханика. ФАН.
5. Чертоусов, М. Д. (1960). Гидравлика (специальный курс). Госэнергоиздат.