

## Методика расчета водного баланса водохранилищ Тюямуюнского гидроузла

Сорокин Д.А., НИЦ МКВК

### Математическая постановка задачи

Речную систему, как объект планирования распределения и регулирования стока, можно описать системой дифференциальных уравнений сохранения массы (количества) вещества, имеющих свою специфику трансформации для участков реки с водохранилищем:

$$dV_i / dt = Q_i^H - Q_i^K - k^B \times Q_i^B - Q_i^П$$

$$Q_i^П = Q_i^{ПН} - Q_i^О + Q_i^{ПФ} - Q_i^{ФПР}$$

$$V_i^{max} \geq V_i^K \geq V_i^{min}$$

$$Q_i^{max} \geq Q_i^K \geq Q_i^{min}$$

$$Q_i^{ПН} - Q_i^О = (E_i - O_i) \times F_i / dt$$

Здесь:  $t$  – время,  $i$  – участок реки,  $V_i$  – объем воды на участке реки – в водохранилище ( $m^3$ ),  $Q_i^H$  – расход воды в начале участка – приток в водохранилище (здесь и далее для  $Q$  –  $m^3/c$ ),  $Q_i^K$  – расход воды в конце участка (попуск из водохранилища в реку),  $Q_i^B$  – расход требуемого водозабора из водохранилища (лимит на водозабор),  $k^B$  – коэффициент урезки требуемого водозабора (лимита),  $Q_i^П$  – расход потерь воды в водохранилище,  $Q_i^{ПФ}$  – расход потерь воды из водохранилища на фильтрацию, как функция наполнения воды в водохранилище  $Q_i^{ПФ} = f(V_i)/dt$ ,  $Q_i^О$  – расход осадков, поступающих в водохранилище,  $Q_i^{ФПР}$  – расход притока воды из грунтовых вод в водохранилище, осуществляемого при низких уровнях воды в водохранилище, как функция объема воды в водохранилище,  $Q_i^{ФПР} = f(V_i)/dt$ ,  $E_i$ ,  $O_i$  – испаряемость с водной поверхности и осадки на  $1 m^2$  водной поверхности ( $m$ ),  $F_i$  – площадь водной поверхности водохранилища ( $m^2$ ), как функция объема воды в водохранилище  $F_i = f(V_i)$ ,  $Q_i^{max}$ ,  $Q_i^{min}$  – максимальный и минимальный допустимые попуски из водохранилища,  $V_i^{max}$ ,  $V_i^{min}$  – максимальный и минимальный допустимые объемы наполнения водохранилища ( $m^3$ ). Значения  $Q_i^{max}$ ,  $Q_i^{min}$ ,  $V_i^{max}$ ,  $V_i^{min}$  будут определены на основе технических и эксплуатационных характеристик водохранилищных гидроузлов, и уточнены по результатам численных экспериментов и соответствующим рекомендациям, а также отражены в электронных правилах в разделе регулирования стока.

Реализация модели для Тюямуюнского гидроузла предлагается в виде алгоритма водного баланса водохранилищ (как единой емкости), с шагом по времени 1 месяц. Тогда изменение объема воды в водохранилище можно представить как:

$$dV / dt = \Delta V / \Delta t = [V(t+\Delta t) - V(t)] / \Delta t$$

Где:  $\Delta V$  – приращение функций, т.е. изменение объема воды в водохранилище ( $m^3$ ),  $\Delta t$  – приращение аргумента (количество секунд в 1 месяце),  $V(t+\Delta t)$ ,  $V(t)$  – объемы воды в водохранилище в конце месяца и в его начале. Приращение

функции  $\Delta V$  не является объемом регулирования стока реки водохранилищем, а характеризует изменение объема воды в водохранилище. Объем регулирования стока реки водохранилищем рассчитывается по разнице объемов притока речной воды в водохранилище и объема пускa из водохранилища в реку ( $W^H - W^K$ ). Если  $W^H - W^K > 0$ , то происходит изъятие воды в реке за счет наполнения водохранилища (а также за счет водозабора из водохранилища, если он существует), если  $W^H - W^K < 0$ , то происходит пополнение стока реки за счет сработки водохранилища.

Расчет водного баланса водохранилища ведется дискретно за каждый интервал времени  $\Delta t$  на каждом  $i$ -том участке по формуле:

$$V(t+\Delta t) - V(t) = [Q_i^H - Q_i^K - k^B \times Q_i^B - Q_i^P] \times \Delta t$$

Поиск наилучшего решения предлагается осуществлять в имитационном режиме, не допуская дефицита воды, перебором управляющих воздействий: пусков воды из водохранилищ ( $W_i^K = Q_i^K \times \Delta t$ ) или объемов воды в водохранилищах ( $V_i$ ), увязанных водным балансом с пусками, а также коэффициентов ( $k^B$ ), урезающих первоначально установленные лимиты водозаборов из ТМГУ, при соблюдении определенных правил и ограничений режимов водохранилищ и экологических пусков ( $k^3$ ). Коэффициенты урезки ( $k^B$ ) предлагается искать с шагом их изменения 0.5, т.е.:  $k^B = 1$  (урезка отсутствует),  $k^B = 0.95$  (урезка 5 %) ,  $k^B = 0.9$  (урезка 10 %) и т.д. Предлагается, что управляющие воздействия  $V_i$ ,  $k^B$ ,  $k^3$  будут теми переменными, которые пользователь электронных правил сможет изменять при решении задачи планирования распределения водных ресурсов и регулирования стока водохранилищами.

Одна из гипотез формирования фильтрации из водохранилищ ТМГУ была описана и исследована в конце 80-х годов отделе Комплексного регулирования стока рек НПО САНИИРИ [Каюмов О.А., 1990]. Для водохранилищ Тюмунского гидроузла (Руслового, Капарас, Султансанджара и Кошбулака) было предложено характеристики фильтрационного потока рассчитывать основываясь на гипотезе существования гидравлической взаимосвязи подземного резервуара с водохранилищем.

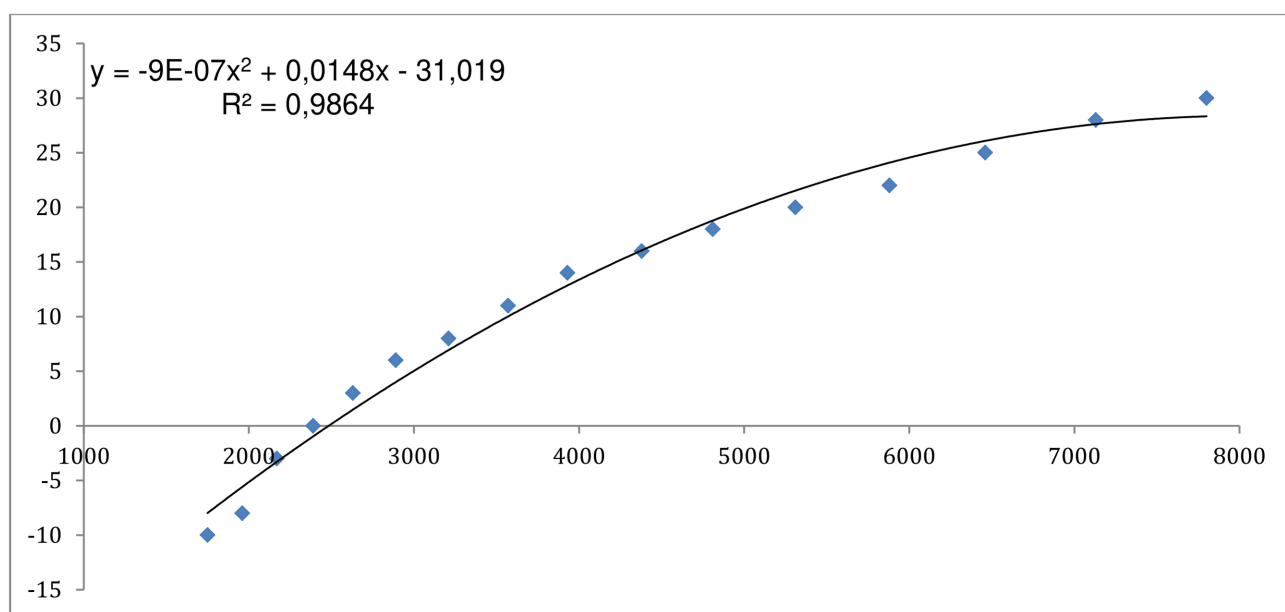


Рисунок 1. Зависимость фильтрационного расхода водохранилищ ТМГУ - ось Y ( $Q_{\text{фил.ТМГУ}}$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ) от суммарного объема воды в водохранилищах – ось X ( $V_{\text{ТМГУ}}$ ,  $\text{млн.м}^3$ )

Наличие фильтрационных потоков, подпитывающих водохранилище при очень низких уровнях воды в водохранилищах или уходящих из водохранилищ в подземную емкость при высоких уровнях воды в водохранилищах, было доказано выявленной синхронностью совмещенных графиков изменения годовых невязок стока и среднегодовых уровней воды в водохранилищах за 1982-1988 гг.

Модель гидравлической взаимосвязи подземного резервуара с водохранилищем была разработана А.Савицким и реализована в виде расчетного инструмента в отделе Комплексного регулирования стока рек САНИИРИ [Зубарев С.Л., Савицкий А.Г., Сорокин А.Г., Тихонова О.Н., 1991]. С использованием данной модели были выполнены расчеты фильтрационных потоков водохранилищ ТМГУ на данных режима работы ТМГУ за 1981-1988 годы [Каюмов О.А., 1990].

В региональном информационно-аналитическом Центре НИЦ МКВК была выполнена обработка фильтрационных потоков ТМГУ, полученных при моделировании гидравлической взаимосвязи подземного резервуара с водохранилищем, и построена зависимость расходов фильтрации ( $Q_{\text{фил.ТМГУ}}$ , м<sup>3</sup>/с) от суммарного объема воды в водохранилищах ТМГУ ( $V_{\text{ТМГУ}}$ , млн.м<sup>3</sup>) – см. рисунок 1.

Зависимость  $Q_{\text{фил.ТМГУ}}(V_{\text{ТМГУ}})$  применима в предположении одновременного наполнения и сработки всех водохранилищ, т.е. когда мы рассматриваем водохранилища ТМГУ как одну емкость. Для более точного расчета (при наличии данных режимов работы всех водохранилищ ТМГУ) мы рекомендуем использовать, полученные нами, зависимости фильтрационных расходов ( $Q$ , м<sup>3</sup>/с) от уровней воды в этих водохранилищах ( $H$ , м):

Для Руслового водохранилища:  $Q = - 0.015H^2 + 5.07H - 390$

Для Капараса:  $Q = - 0.024H^2 + 6.38H - 417$

Для Султансанджара и Кошбулака:  $Q = 1.22H - 143$

В среднем за период 1981-1988 гг. годовой фильтрационный расход из всех водохранилищ ТМГУ составил 16 м<sup>3</sup>/с или около 0.5 км<sup>3</sup> в год. Данный объем приблизительно соответствует отметке 124 м. Прекращение фильтрационных расходов из водохранилищ ТМГУ (фильтрационных потерь) происходит при отметках 119-118 м, при отметке 120 м объем фильтрационных потерь составляет около 0.2 км<sup>3</sup>/год. Максимальная фильтрация, осуществляемая при отметке 130 м, и которая выдерживается в течении всего года, оценивается в 0.9 км<sup>3</sup>/год.

Суммарные максимальные расчетные потери воды из водохранилищ ТМГУ (на участке г/п Дарганата – г/п Тюямуюн) на испарение и фильтрацию могут составлять до 2 км<sup>3</sup>, при существующем режиме наполнения и сработки водохранилищ в маловодные годы - 0.7..0.9 км<sup>3</sup>, в многоводные – до 1.5 км<sup>3</sup>.

#### Рекомендации по правилам управления ТМГУ

“Правила управления ТМГУ” должны помочь лицам, принимающим решения:

- В планировании распределения водных ресурсов нижнего течения Амударьи и разработке режимов работы ТМГУ (на год, сезон, месяц, декаду),
- В оперативном управлении – уточнении “плана регулирования стока” применительно к складывающейся водохозяйственной ситуации т.е.: а) уточнении притока воды к ТМГУ, б) уточнении требуемых попусков (отдачи) гидроузла (в том числе, по результатам фактического руслового баланса Амударьи), с) оценке отклонений планируемых попусков водохранилищ от фактических и др.

При “Планировании” ставится задача расчета гидрографа попусков воды из ТМГУ (расчет отдачи) и соответствующего изменения объема воды в водохранилище, при известных (ожидаемых) значениях притока к ТМГУ и известном

начальном наполнении водохранилищ. Рекомендуется придерживаться следующих “Правил”:

1. Приток речного стока к ТМГУ производится расчетом составляющих руслового водного баланса (РВБ) и сведением РВБ в среднем течении Амударьи, исходя из прогноза не зарегулированного стока реки Амударья в створе выше водозабора в Гарагумдарью (Каракумский канал), объемов регулирования стока реки Вахш в Нурекском водохранилище, установленных лимитов на водозабор в страны бассейна в среднем течении.

Сток реки Амударья в створе выше водозабора в Гарагумдарью за сезон (октябрь – март, апрель – сентябрь) рассчитывается по методике БВО “Амударья” на основе информации по прогнозу стока реки Амударья в г/п Керки, и данных по водозабору выше этого г/п.

Для оценки бокового притока (БП) и русловых потерь рекомендуется воспользоваться зависимостями, разработанными в рамках проекта “Электронные правила управления водными ресурсами Амударьи”, разработанных в НИЦ МКВК.

2. Для расчета водного баланса водохранилищ ТМГУ, в первом приближении, можно рекомендовать динамику объема воды в водохранилище (как суммы объемов воды в водохранилищах ТМГУ – Русловом, Капарасе, Султансонджаре и Кошбулаке) принять по выбранному аналогу из ретро-данных.

Потери воды на испарение можно рассчитать как произведение “чистой испаряемости” (разницы между испаряемостью и осадками) на среднюю за месяц (декаду) площадь водной поверхности. Потери на фильтрацию можно рассчитать по рекомендациям, изложенным в разделе “Рекомендации по составлению водного баланса ТМГУ”, которые можно найти при открытии интерфейса информационно-программного комплекса “Электронные правила” в разделе “Правила”.

Для расчета площади водной поверхности можно использовать зависимость  $F(V)$  или две зависимости  $H(V)$  и  $F(H)$ , где:  $H$  – отметка уровня воды в водохранилище [м],  $V$  – объем воды в водохранилище [млн.м<sup>3</sup>],  $F$  – площадь водной поверхности водохранилища [км<sup>2</sup>]. Батиметрическая взаимосвязь между  $H$  и  $V$  может быть взята по полученной нами зависимости (здесь предполагается, что водохранилища наполняются до единой отметки поверхности воды):

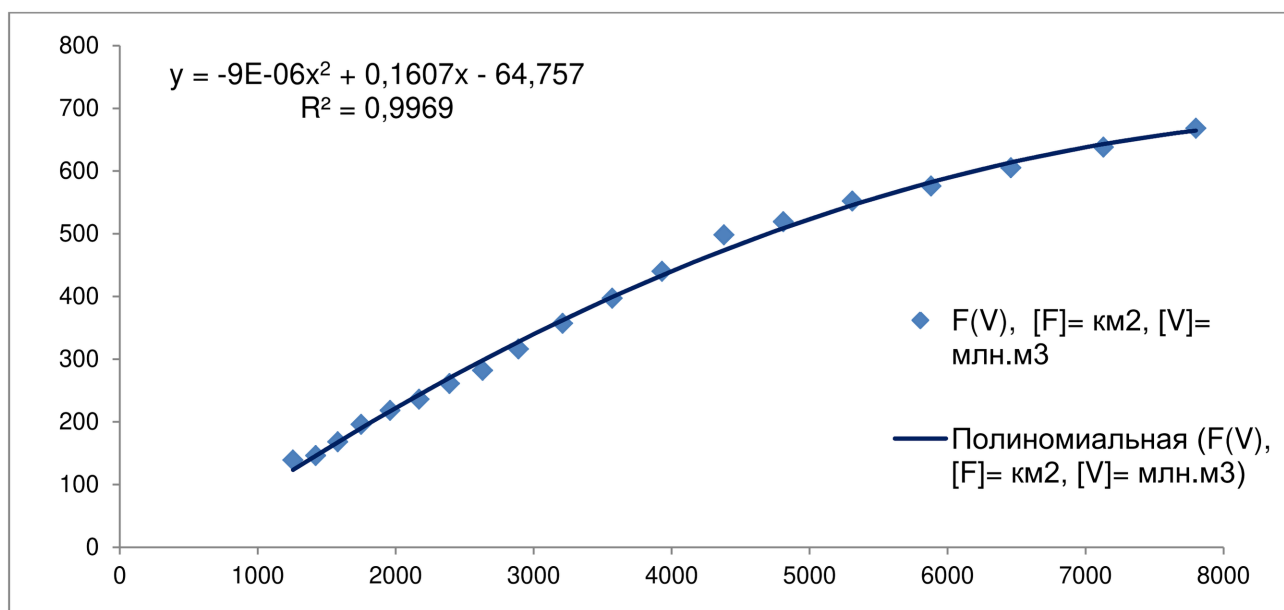


Рисунок 2. Зависимость площади водной поверхности водохранилищ ТМГУ от объема воды в водохранилищах (проектные значения) -  $F(V)$

Суммарный полезный проектный объем водохранилищ ТМГУ составляет (при минимальном уровне сработки 120 м) 4.945 км<sup>3</sup>, в том числе: в Русловом водохранилище – 2.09 км<sup>3</sup>, в Капарасе – 0.55 км<sup>3</sup>, в Султансанджаре – 1.285 км<sup>3</sup>, в Кошбулаке – 1.02 км<sup>3</sup>. Но если сработать водохранилища ниже отметки 120 м (Русловое до 114 м, Капарас до 117 м, Султансанджар до 115 м), то потенциальный суммарный объем воды, который можно будет использовать из водохранилищ ТМГУ, составит 5.7 км<sup>3</sup>

Водоохранилища ТМГУ, осуществляя комплексное сезонное регулирование, не используют свой емкостной потенциал в полной мере. Одна из главных причин такого положения – заиливание Руслового водохранилища. С начала эксплуатации до 2010 года Русловое водохранилище заилено приблизительно на 1.2 км<sup>3</sup>, после 2010 года, объем заиливания колеблется, достигая величины в 1.3 км<sup>3</sup>. Мертвый объем Руслового водохранилища практически полностью заилен.

3. Далее, расчетные значения отдачи водохранилищ ТМГУ (суммы объема водозабора в каналы и попуска в реку), полученные на основании регулирования стока в водохранилищах по году-аналогу, предлагается сравнить с рекомендациями по назначению отдачи водохранилищ ТМГУ, полученными в результате численных экспериментов. Согласно рекомендациям, требуемая отдача ТМГУ (как сумма требуемого попуска в н.б ТМГУ - г/п Тюямуюн, и лимитов на водозабор, осуществляемого из ТМГУ) представляет собой набор графиков, рассчитанных по русловому балансу нижнего течения реки, где одной из составляющих баланса являются русловые потери, определяемые по рекомендуемым алгоритмам.

Расчет требуемых попусков рекомендуется осуществлять “снизу вверх”, начиная с назначения экологических попусков в Приаралье, подачи воды в Арал, назначения лимитов на водозабор и их урезки в годы ниже среднего, отдельно для маловодного, среднего по водности и многоводного года, по месяцам гидрологического года (октябрь – сентябрь).

В численных экспериментах, при определении потребных попусков из ТМГУ в реку, подача воды в озера Приаралья (дельты реки Амударья) принята следующим образом: для многоводного года – 8 км<sup>3</sup>, для среднего по водности года – 5 км<sup>3</sup> и маловодного – 3 км<sup>3</sup>.

Для многоводных лет и средних по водности при обеспеченности ниже 75 % предлагается урезку лимита на водозабор не осуществлять, при обеспеченности в пределах 90 > P > 75 % - урезать лимит на 10 %, при 95 > P > 90 % - на 20 % и при P > 95 % - на 30 %. Если вы принимаете наши рекомендации по назначению экологических попусков и по урезке лимитов, то можете пользоваться, рассчитанными для этих условий, сезонными значениями отдачи ТМГУ:

| Показатель               | Сценарий                  | Ед изм             | окт-мар | апр-сен | год   |
|--------------------------|---------------------------|--------------------|---------|---------|-------|
| Отдача ТМГУ: потребность | 1.Многоводный             | млн.м <sup>3</sup> | 10793   | 26874   | 37667 |
|                          | 2.Средний                 | млн.м <sup>3</sup> | 9239    | 23914   | 33153 |
|                          | 3.Маловодный - урезка 10% | млн.м <sup>3</sup> | 7226    | 19180   | 26406 |
|                          | 4.Маловодный - урезка 20% | млн.м <sup>3</sup> | 6774    | 17468   | 24242 |
|                          | 5.Маловодный - урезка 30% | млн.м <sup>3</sup> | 6323    | 15755   | 22078 |

Таблица 1. Требуемая отдача ТМГУ

4.Предлагается планировать режим работу ТМГУ, в увязке с расчетами по режиму работы Нурекского водохранилища, расчетами руслового баланса Амударьи в среднем и нижнем течении, а также расчетами водного баланса водохранилищ ТМГУ.

При “Оперативном управлении” ставится задача: в условиях фактической водности корректировать режим работы ТМГУ – попуски из водохранилища (отдачи) и соответствующее изменение объема воды в водохранилищах. Рекомендуется придерживаться следующих “Правил”:

1. При назначении попусков воды из ТМГУ рекомендуется анализировать текущий объем воды в водохранилище (суммарные объем по всем водохранилищам) по наиболее распространенной форме “Диспетчерских правил” – графической зависимости, построенной в координатах: время (ось X) – объем воды в водохранилище (ось Y).

Рекомендуется пользоваться, разработанным нами графиком  $V(t)$ , построенном на данные эксплуатации ТМГУ за 1992 – 2022 гг.

На графике (Рисунок 3)  $V(t)$  можно выделить следующие зоны:

Зону А. - Зона ограничена кривыми “Н=130 м” и “max”

Зону В. - Зона ограничена кривыми “max” и “Р=90%”

Зону С. - Зона ограничена кривыми “Р=90%” и “min”

Зону D. - Зона ограничена кривыми “min” и “Н=120 м”

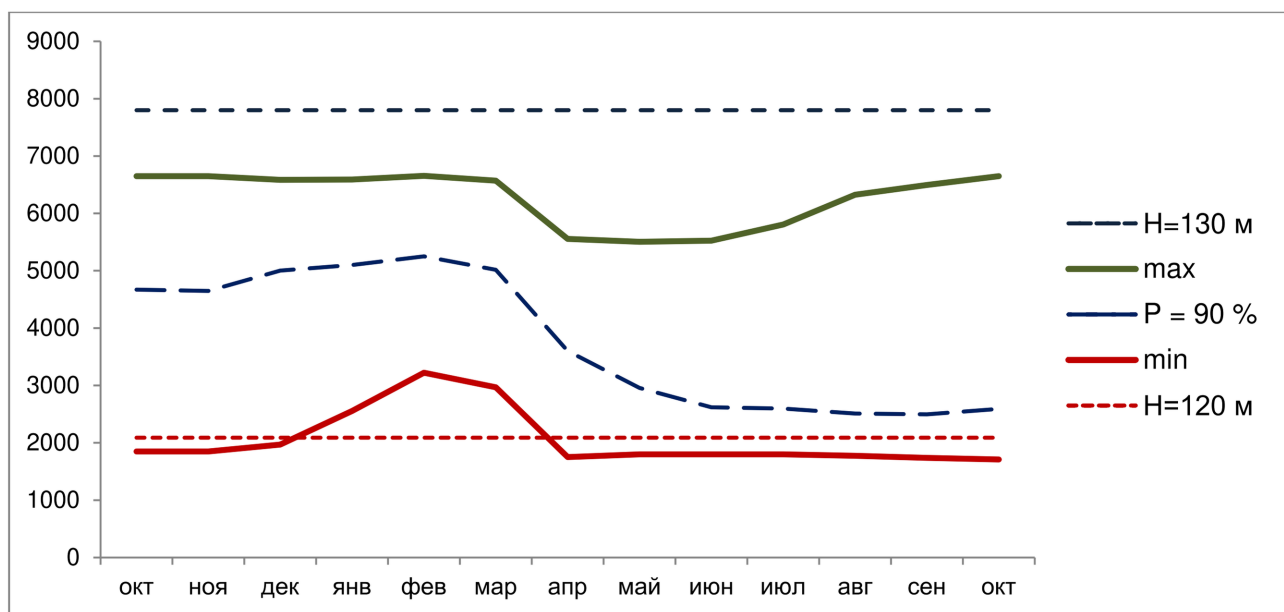


Рисунок 3. Кривые, очерчивающие характерные зоны режимы наполнения водохранилищ ТМГУ

Кривая “Н=130 м” – общий объем воды в водохранилищах ТМГУ, соответствующий отметке уровня воды в водохранилище 130 м – НПУ, кривая “Н=120 м” – объем воды в водохранилищах ТМГУ, соответствующий отметке уровня воды в водохранилище 120 м - УМО. Таким образом, между этими кривыми находится призма регулирования – полезный объем воды в водохранилище.

Кривые “max” и “min” – кривые наполнения водохранилищ, очерчивающие максимальные и минимальные объемы воды в водохранилищах ТМГУ, наблюдаемые в период 1992 – 2022 гг.

Кривая “ $P=90\%$ ” - кривая наполнения водохранилищ ТМГУ, ниже которой отдача ТМГУ не гарантирует в маловодные годы выполнение всех требований на воду в нижнем течении Амударьи.

Работа ТМГУ в зона “А” возможна в особо многоводные годы, при суммарном начальном наполнении водохранилищ к началу октября не ниже  $6.5 \text{ км}^3$ .

Работа ТМГУ в зона “В” гарантирует для лет обеспеченностью  $P < 75\%$  работу водохранилищ ТМГУ без урезки лимитов на водозабор в нижнем течении и подачу воды в Приаралье и Арал по требованиям.

Зона С – зона ограниченной отдачи ТМГУ, не гарантирующая для маловодных лет водозабор в нижнем течении по лимитам (максимальным за период 1992 – 2022 гг).

Зона D – зона устойчивого дефицита воды, при котором осуществляется опорожнение водохранилищ ниже отметки 120 м.

Согласно графику, при оперативном управлении в годы средней водности рекомендуется, по возможности, держать суммарные объем воды в зоне “В”, в маловодные годы – в зоне “С”.

При этом, в годы средней водности конечный объем в водохранилищах ТМГУ не должен быть меньше начального. В маловодные годы (при начальном наполнении не ниже  $4.5 \text{ км}^3$ ) такие условия не выполнимы.

В многоводные годы, следующие за маловодными, следует вернуть наполнение водохранилищ в зону “В”.

2. Анализ фактических характеристик режима работы ТМГУ рекомендуется осуществлять по показателям:

- Отклонению притока воды к гидроузлу по прогнозу (плану) от фактического притока воды, по месяцам (декадам), в т.ч. в нарастающем итоге,  $\text{млн.м}^3$
- Отклонению расчетного (планируемого) попуска воды из гидроузла от фактического, по месяцам (декадам), в т.ч. в нарастающем итоге,  $\text{млн.м}^3$
- Отклонению расчетных (планируемых) объемов воды в водохранилищах от фактических, по месяцам (декадам),  $\text{млн.м}^3$

3. В “Правилах” для ТМГУ, разработанных в советское время, ТМГУ рассматривался как буферная емкость регулирующая сток нижнего течения Амударьи в интересах, прежде всего, ирригации.

Опорожнение водохранилищ предполагалось начинать в период проведения весенних промывных поливов. В первую очередь должны были опорожняться Русловое водохранилище и Капарас до отметки 120 м (уровень мертвого объема). Наполнение должно было производиться в осенне-зимний период за счет гарантированного попуска из Нурекского водохранилища, в том же порядке: Русловое, Капарас, затем Султансанджар и Кошбулак.

По всей длине рек Вахш и Амударья необходимо было поддерживать санитарный попуск в размере  $100 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Современную работу ТМГУ рекомендуется рассматривать в виде некоторого рационального режима, который рассчитывается в зависимости от водности реки (притока к ТМГУ) и начального накопления воды в водохранилищах, на основе ряда “правил”, удовлетворяющих требования отдельных потребителей водных ресурсов нижнего течения Амударьи.

Одно из таких правил означает первоочередное опорожнение Руслового водохранилища ниже 119 м, что обеспечивает:

- согласно фильтрационной модели ТМГУ, прекращение фильтрации из ТМГУ, что сокращает потери воды из водохранилища,
- пропуск наносов в реку (промывной режим Руслового водохранилища) и, согласно фильтрационной русловой модели, увеличение мутности потока воды в русле реки, и в части каналов, забирающих воду из реки, что по оценке некоторых авторов уменьшает потери воды за счет уменьшения фильтрации.

4. По сравнению с правилами советского времени, вводятся коррективы и уточнения по очередности и срокам наполнения и опорожнения водохранилищ.

В условиях среднего по водности года (притока к ТМГУ) и максимального наполнения водохранилищ к январю (это возможно, если предыдущий год был не маловодным), опорожнение водохранилищ следует начинать с Руслового в феврале-марте, а в это время, Султансанджарское и Кошбулакское водохранилища, по возможности, должны держать накопленную воду, Капараское - срабатывать по требованиям водопроводов питьевого водоснабжения.

В апреле-июне Русловое водохранилище необходимо, по возможности, держать на пониженных отметках (ниже 119 м), осуществляя промывной режим, а Капарас срабатывать до уровня Руслового. В апреле-июне Султансанджар и Кошбулак срабатываются по мере необходимости.

В июле-августе происходит одновременное наполнение Руслового водохранилища и водохранилища Капарас (тем самым аккумулируется в Капарасе речная вода низкой минерализации), Султансанджар и Кошбулак наполняются (срабатываются) по мере необходимости.

В сентябре–декабре Капараское водохранилище срабатывается по графику водопроводов питьевого водоснабжения, остальные водохранилища выходят к концу года на объемы, близкие к начальным.

В маловодные годы вводятся коррективы по наполнению Руслового водохранилища и водохранилища Капарас. В июне-августе необходимо наполнять Русловое, а в июле-августе - Капарас, хотя бы до отметки 126–128 м; в этот период для предупреждения (снижения) дефицита в низовьях Амударьи, необходимо опорожнять Кошбулак и Султансанджар по каналу осветленной воды.

#### Литературные источники

1. Каюмов О.А., 1990. Рекомендации по управлению водно-солевым, наносным и уровнем режимом р. Амударьи и водохранилищ Тюямуянского гидроузла, НПО САНИИРИ, Отдел комплексного регулирования стока рек, Договор 47/88 с Средазгипроводхлопком. Ташкент.

2. Зубарев С.Л., Савицкий А.Г., Сорокин А.Г., Тихонова О.Н., 1991. Оперативное и перспективное управление стоком р. Амударья в Тюямуянском гидроузле, а также иные специальные вопросы экологии региона Приаралья // Проблемы Арала и Приаралья, САНИИРИ, Ташкент, С.114-121.