

6. *Коронкевич Н.И., Мельник К.С.* Трансформация стока под влиянием ландшафтных изменений в бассейне реки Москвы и на территории города Москвы // *Водные ресурсы*, 2015, Т. 42, № 2, С. 133-143.

7. *Мельник К.С.* Гидротехническое воздействие на водные ресурсы в бассейне реки Москвы//*Фундаментальные исследования*, 2015, №2(6). С. 1230-1237.

8. *Георгиевский В.Ю.* Изменение стока рек России и Водного баланса Каспийского моря под влиянием хозяйственной деятельности и глобального потепления. Автореф. диссерт. на соискание ученой степени доктора географических наук. Спб: ГГИ, 2005, 39 с.

9. *Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю.* Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России/ В кн.: *Гидрологические последствия изменения климата*. Новосибирск: 2007. С. 192-204 .

10. Атлас возобновляемых водных ресурсов Европейской части России/. М.: ИВП РАН, 2014. – 96 с.

11. *Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., Телегина Е.А., Рец Е.П.* Максимальные и минимальные значения современного подземного стока как показатель естественных ресурсов подземных вод// *Недропользование – XXI век*. 2014. № 5. С. 27–33.

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШАРДАРИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Кузенбаев К.М.

Республиканское государственное предприятие

«Казгидромет», г. Алматы, Казахстан

Kaxan2909@mail.ru

Исследуется оценка гидравлического режима Шардаринского водохранилища на основе экспериментов на пространственной гидравлической модели при отметке НПУ.

Исходными данными для исследований послужили материалы, полученные от дирекции Шардаринской гидроэлектростанции «АО ШГЭС» и Алматинского Института энергетики и связи (АИЭС): техническое задание на гидравлические исследования и топография водохранилища. На гидравлической модели изучались процессы внутреннего водообмена, определяемые динамикой перемещения водных масс внутри водохранилища, гидравлические особенности

движения потока, общая картина течений. По результатам исследований построена модель транзитной струи.

Предусмотренные расчетные расходы Шардаринского водохранилища [1] приведены в табл. 1.

Таблица 1– Обеспеченность расчетных расходов воды, %

Показатели	Обеспеченность, %		
	1	10	50
Среднемесячные расходы, м ³ /с			27,3
Максимальные расходы, м ³ /с	23,30	16,70	
Минимальные среднемесячные расходы, м ³ /с			13,3

Методика проведения исследований. Моделирование водохранилищ имеет свои специфические особенности. На гидравлической модели изучалась кинематика потока в водохранилище. Расходы воды измерялись объемным способом в начале и конце периода моделирования. Уровни воды фиксировались мерными иглами. Визуально определялся план течений в водохранилище (положение транзитных струй, местоположение и размеры водоворотных зон). Для замера скорости распространения транзитных струй их поток окрашивался и фотографировался контур окрашенных струй. Частота кадров изменялась в пределах 5-60 сек. в зависимости от интенсивности растекания потока. На модели устанавливался секундомер, который фиксировался в каждом кадре, что давало возможность оценить интервал времени между каждой парой кадров. Обработка полученных фотографий позволила определить размеры транзитной струи и скорости распространения краски в ней. Местные скорости течения потока измерялись путем фотографирования святящихся поплавков широкоугольной камерой «CANON A3788». Фиксировалось время проникновения краски из транзитной струи в боковые застойно-водоворотные зоны.

Масштаб модели. Для соблюдения кинематического подобия и подобия турбулентного обмена, необходим неискаженный масштаб модели 1:100 или 1:200. Шардаринское водохранилище имеет протяженность 16,8 км, ширину 0,8 км, максимальную глубину 21,9 м. В условиях лаборатории для модели понадобилась бы площадка размером 168x8 м или 84x4 м, но такими возможностями автор не располагает. Поэтому исследования проводились на модели, построенной с искажением масштабов. Такой прием в моделировании находит распространение в гидравлических лабораториях. Искажение масштабов влечет за собой изменение соотношений между си-

лами инерции и силами трения, что в свою очередь приводит к соответствующим изменениям шероховатости модели. До настоящего времени нет допустимой величины искажения масштабов. Некоторые исследователи считают, что допустимо шестикратное искажение. Опыт моделирования водохранилищ с искажениями масштаба приведен в [2].

Анализ результатов исследований Крапивинского водохранилища, выполненных в КазНИИЭнергетики и ОГИ НИСа Гидропроекта, Шульбинского водохранилища, а также опубликованные в литературе материалы приводят к выводу, что физически наиболее обоснованными и подкрепленными материалами многочисленных лабораторных и натурных исследований являются результаты, полученные Я.З. Маневичем [3]. Примененный метод обеспечивает подобие средних по сечению скоростей, уровней и расходов воды; при его использовании не возникает существенных искажений плана течений. Данная методика положена в основу моделирования Шардаринского водохранилища.

При моделировании должны выполняться следующие соотношения:

$$\left(\lambda \beta / H\right)_M \left(\lambda \lambda / H\right)_{kp} = 1,6 \div 1,9 \quad (1)$$

$$\left(\lambda \beta / H\right)_H \left(\lambda \lambda / H\right)_{kp} = 1,6 \div 1,9 \quad (2)$$

$$Re_M > Re_{kp} \quad (3)$$

$$\left(\beta / H\right)_M \geq 6 \quad (4)$$

Здесь индексы (м) и (н) означают модельные и натурные величины. Неравенство (4) предложено А.А. Сабанеевым [4] для обеспечения кинематического подобия.

По очертаниям Шардаринского водохранилища (см. табл. 2) и конструктивным возможностям принят плановый масштаб модели $M_{\Gamma} 1:2000$, вертикальный масштаб – $M_B 1:500$. Искажение составило 4. Модель разместилась в закрытом помещении, имела длину 6,8 м, ширину 0,32 м.

Обоснование выбора масштаба. Как отмечалось выше, для гидравлической модели принят искаженный масштаб: $M_{гор.} 1:2000$, $M_{верт.} 1:500$, при искажении масштаба должны выполняться условия (1) и (4).

Шардаринское водохранилище имеет следующие характеристики: шероховатость ложа водохранилища $n = 0,08$, гидравлический радиус $R_H = H_H = 2,0$ м, средняя ширина $B_H = 0,2$ км, глубина $H_H = 2,0$ м.

Таблица 2 – Морфометрические характеристики водохранилища

Характеристики	НПУ 1770 м	УМО 1727 м
Площадь акватории, км ²	10,45	1,6
Полный объем, млн.м ³	238	20,0
Полезный объем, млн.м ³	218	-
Средняя глубина, м	21,9	12,5
Средняя ширина, км	0,8	0,26
Длина	16,8	6,5
Длина береговой линии	45,0	13,7

Коэффициент Шези находится из формулы Павловского

$$G = \frac{1}{\eta} R^y :$$

$$y = 2,5\sqrt{\eta} - 0,13 - 0,75(\sqrt{\eta} - 0,10)\sqrt{R} \quad (5)$$

Расчет проводится для начального сечения параболического типа. При $y = 0,386$ коэффициент $C = 14,25$ мм^{0,5}/с. Коэффициент гидравлического трения равен:

$$\lambda = \frac{8g}{G^2} = 0,386. \quad (6)$$

Величина $\left(\lambda \frac{B}{H}\right) = 38,6$, т.е. условие $\left(\lambda \frac{B}{H}\right)_M \gg \left(\lambda \frac{B}{H}\right)_{kp}$ выполняется.

Для модели, как и для природы, расчет ведем для начального сечения (входного). Коэффициент шероховатости принят для бетона $n = 0,015$, $B_M = 10$ см, $H_M = 0,4$ см, $R = 0,37$ см. При $y = 0,174$ коэффициент Шези $C = 25,166$ м^{0,5}/с, коэффициент $\lambda_M = 0,124$. Величина

$\left(\lambda \frac{B}{H}\right)_M = 3,095$, выполняется условие (1)

$$\left(\lambda \frac{B}{H}\right)_M \gg \left(\lambda \frac{B}{H}\right)_{kp} = 1,6 \div 1,9.$$

Проверяем условие (3) по числу Рейнольдса: площадь живого сечения равна $\omega_M = 2/3 \cdot BH = 0,000266$ м², при $Q_M = 0,02085$ л/с,

$$v = \frac{Q}{\omega} = \frac{0,0002085}{0,000266} = 0,782, \text{ м/с}. \text{ При этом число}$$

$$Re_M = \frac{\nu \cdot h}{\nu} = \frac{0,0782 \cdot 0,04}{0,0000013} = 241.$$

По данным Хопфа [5] и А.М. Латышенкова [6] критическое число $Re_{кр}$ равно 300 для открытых цилиндрических потоков. Как отмечает Р.Р. Чугаев [7] «на величину $Re_{кр}$ в значительной мере влияет степень отклонения формы потока от цилиндрической. При сужающихся по длине потоках ламинарное движение с увеличением скоростей переходит в турбулентное позже, чем при расширяющихся (при одинаковых прочих условиях)».

В условиях проводимого эксперимента имеется и расширяющийся поток, поэтому в зависимости от формы поперечного сечения потока имеют место числа Re , близкие к $Re_{кр}$. В сужающихся участках поток будет переходить в зону турбулентного режима (зона квадратичного сопротивления) позже, чем в расширяющихся. Во всех случаях это касается транзитной струи. Масштабные множители:

$$\alpha_Q = \frac{1}{\alpha e^{0.5} \cdot \alpha_h^2} = \frac{1}{11175000}; \quad Q_M = \alpha_Q \cdot Q_H; \quad \alpha_v = \frac{\alpha h}{\sqrt{\alpha e}} = 11,2107;$$

$$\alpha_t = \frac{\alpha e^{1.5}}{\alpha h} = 178,4.$$

Описание модели. В лаборатории гидротехнических сооружений электростанций ранее проводились исследования по гидравлическому моделированию Капчагайского и Шульбинского водохранилищ. На основе обобщения этого опыта принята жесткая модель с искаженным масштабом. Моделировалось водохранилище протяженностью 12 км (без учета волны нагона).

Лабораторная модель длиной 6 м формовалась из бетонного раствора. Расход воды измерялся объемным способом. Уровень воды в водохранилище фиксировался мерной иглой, установленной перед плотиной. Опыты проводились при двух расходах: $Q_{max1\%} = 233 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{min10\%} = 67 \text{ м}^3/\text{с}$ и, соответственно, уровнях: НПУ=1770 м и УМО=1727 м. На модели имеем:

$$Q_{1\%} = 0,02085 \text{ л/с} = 20,85 \text{ г/с}; \quad Q_{10\%} = 0,0149 \text{ л/с} = 14,9 \text{ г/с}.$$

Результаты модельных исследований. Исследования режима течения, измерение скоростей течения в водохранилище проводились только при расходе $Q_{1\%} = 233 \text{ м}^3/\text{с}$, что на модели соответствовало $Q_M = 20,85 \text{ г/с}$. Расход $Q_{10\%} = 167 \text{ м}^3/\text{с}$ на модели не пропускался, т.к. в пересчете на принятый масштаб получалась весьма малая величина ($Q_M = 14,9 \text{ г/с}$). Измерение скоростей течения проводилось

путем окрашивания потока в водохранилище раствором марганцовки и скоростью продвижения фронта облака марганцовки (рис.1).

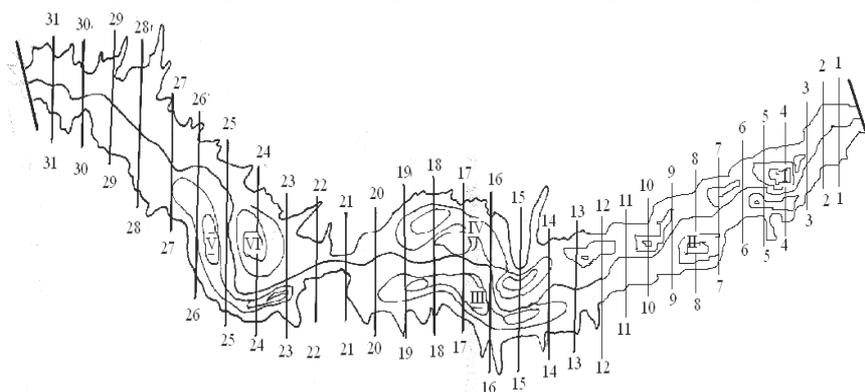


Рис. 1 – Плановая схема течений в Шардаринском водохранилище

Сопоставляя полученные значения скоростей с измеренными другим способом (путем фотографирования поплавков) можно сказать, что оценка скоростей течения потока по продвижению красящего вещества (например, марганцовки) вполне приемлема для водохранилищ со скоростями течения не менее 2-3 м/с. В этом случае поперечное растекание струи не оказывает существенного влияния, что подтверждается и исследованиями на водохранилищах Крапивинской ГЭС, проведенными в ОГИ НИСа Гидропроекта в 1973 г. и Шульбинского ГЭС, проведенными в КазНИИЭ.

Скорости течения в транзитной струе и в водоворотных областях были получены путем фотографирования светящихся поплавков. В картине течения водохранилища наблюдаются не менее 4-5 устойчивых водоворотных зон при наличии четко выраженной транзитной струи.

На рис. 2 приводится график изменения средних по сечению скоростей течения в транзитной струе по длине Шардаринского водохранилища при расходе $Q_H=233 \text{ м}^3/\text{с}$ и отметке наполнения 1770 м. (скорости пересчитаны для натуральных условий с учетом принятого для модели искаженного масштаба).

Возможность использования искаженного масштаба (вертикального) на подобных моделях подтверждается также данными ОГИ НИСа Гидропроекта и лабораторией гидросооружений электростанций КазНИИЭ, полученными на моделях Крапивинского водохранилища (1973 г.) и Шульбинского водохранилища (1981 г.).

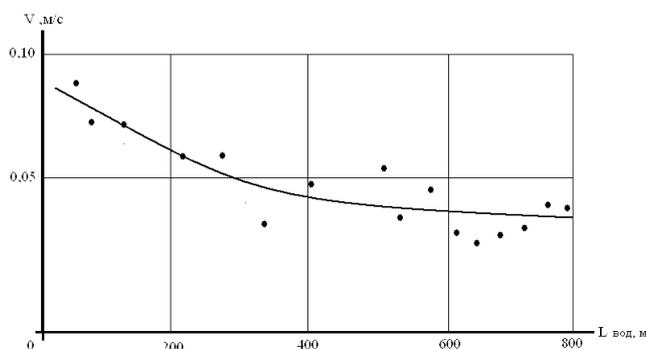


Рис. 2 – График изменения скоростей течения в транзитной струе при пропуске $Q=233 \text{ м}^3/\text{с}$; НПУ 1770 м

Для оценки интенсивности водообмена между транзитной струей и водоворотными зонами были поставлены следующие опыты: вначале подкрашивалась поступающая на модель вода, и фиксировалось время окраски водоворотных зон, а также всего объема водохранилища. Затем на модель подавалась чистая вода, и измерялось время осветления. Оценка осветления проводилась визуально, поэтому не следует претендовать на большую точность. Время осветления фиксировалось секундомером.

При работе водохранилища с расходом $Q=233 \text{ м}^3/\text{с}$ на отметке 1770 м (рис. 1) левобережный водоворот (I) осветлялся за одни сутки, правобережный и левобережный водовороты (II) – за 3-е суток, левобережный (III) – за 15 суток, водоворотные зоны (IV) – за 14 суток, а (V) и (VI) – за 27. На модели определялось также и время полного водообмена в водохранилище при пропуске $Q=233 \text{ м}^3/\text{с}$.

Проведенные опыты подтвердили, что скорости течения в приплотинной части водохранилища были в пределах $0,05 \text{ м/с}$, полного водообмена на модели не наблюдалось. Краска оставалась на дне водохранилища, но по глубине вода шла осветленная. Промывалась модель в течение 7 час. 15 мин., что соответствует в натуре 54 сут.

Заключение. Гидравлические исследования режимов работы Шардаринского водохранилища выполнены на модели с искажением масштаба, принятый плановый масштаб 1:200; искажение составило 3. Определено время водообмена в транзитной струе и в водоворотных зонах и проведена оценка скоростей течения в транзитной струе двумя способами (по фронту облака краски – марганцовки и путем фотографирования святящихся поплавков). Все опыты, в пе-

ресечете на натурные условия, дали вполне согласующиеся результаты по скоростям течения и времени водообмена.

Литература

1. *Ержан К.Т., Кузенбаев К.М.* Стратегия управления водными ресурсами бассейна реки Сырдарья // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях. Труды конференции. – Алматы, 2004. – 175 с.
2. Наставление Гидрометеорологическим станциям и постам. – Л.: Гидрометеоздат, 1957. Вып. 6, Ч.1. – С 32-131.
3. *Маневич Я.З.* О гидравлическом моделировании с искажением масштабов моделей. - Изв. ВНИИГ, Л.: 1977, т.115, С. 67-72.
4. *Сабанеев А.А.* Универсальная формула для коэффициента Шези, Известия ВНИИГ, т.32, 1947. – С.27-44.
5. *Хофман В.Д.* Машинные методы математических вычислений. – М.: Мир, 1980. –278 с.
6. *Латышенкова А.М.* Формирования характеристик расхода воды в реках и озерах. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – С.54-89.
7. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. Л.: Гидрометеоздат, 1975. С.85-100.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ГОДОВОГО ПРИТОКА В РЫБИНСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ⁸

Литвинов А.С., Кучай Л.А., Соколова Е.Н.
Институт биологии внутренних вод им И.Д. Папанина РАН, Борок
litvinov@ibiw.yaroslavl.ru

В настоящее время все большее внимание уделяется естественным причинам изменения климата и природной среды Земли в целом и их региональному отражению. Факт глобального потепления в XX веке фиксируется с семидесятых годов столетия. Потепление глобального климата приводит к изменению циркуляционных процессов в атмосфере и, как следствие, водных ресурсов бассейнов рек, в первую очередь подверженных воздействию климатических факторов.

⁸Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №14-05-00346).