
СТОРИНКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО

УДК 504.4.054:627.81

УЛУЧШЕНИЕ ВОДНОГО РЕЖИМА ВОДОХРАНИЛИЩА ЗА СЧЕТ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЕГО ГЛУБИНЫ

Анахов П.В.

Государственный университет телекоммуникаций
ул. Соломенская, 7, 03110, г. Киев
anakhov@i.ua

На примере высокогорного водохранилища с существенно ледниковым питанием показан беззатратный метод оптимизации глубины водохранилища с прогнозируемыми колебаниями характерных длиннопериодных волн. В качестве критерия оптимальности принято совпадение частот собственных колебаний водного бассейна и его гидрографа. Это приводит к возбуждению сейш, что способствует улучшению водного режима. *Ключевые слова:* возбуждение сейш, ледниковый приток, резонанс колебаний волн, частота сейш.

Поліпшення водного режиму водосховища за рахунок регулювання його глибини. Анахов П.В. На прикладі високогірного водосховища з істотно льодовиковим живленням показаний безвитратний метод оптимізації глибини водосховища із прогнозованими коливаннями характерних довгоперіодних хвиль. В якості критерія оптимальності прийнято збіг частот власних коливань водного басейну і його гідрографа. Це приводить до збудження сейш, що сприяє поліпшенню водного режиму. *Ключові слова:* збудження сейш, льодовикова притока, резонанс коливань хвиль, частота сейш.

Improvement the water conditions of the reservoir by adjusting of its depth. Anakhov P. On the example of the mountain reservoir with essential glacial inflow we show cost-free method for optimizing the depth of the reservoir with predictable oscillations of typical long-period waves. As the criterion of optimality accepted coincidence of frequencies of oscillation of the water basin and its hydrograph. This leads to the triggering of seiches, which improves water conditions. *Keywords:* triggering of seiches, glacial inflow, resonance of waves oscillation, frequency of seiches.

В 453 км от истока горной реки Катунь у ледника Геблера, в створе проектируемой ранее Катунской ГЭС (1,5 км выше деревни Еланда), намечается возведение Алтайской ГЭС установленной мощностью 140 МВт [1].

При строительстве плотины русло реки превращается в водоем, что приводит к уменьшению турбулентного перемешивания воды, изменению режима течений, повышению стратификации, сокращению количества

растворенного кислорода, изменению солености. Все это влияет на осадконакопление, миграцию наносов, биологическую продуктивность, биоценоз, рыбное хозяйство и может привести в определенных условиях к ухудшению условий самоочищения воды [2].

Водохранилище Алтайской ГЭС объемом 0,21 км³ представляет собой расширенный участок реки с обновлением объема в среднем через каждые 4-5 суток. Однако во время зимней межени, когда объем водохранилища будет обновляться за 25-30 суток, все же возможна температурная стратификация [1]. В этот период поступление кислорода в слой гипolimниона затруднено, тогда как потребление его в придонных слоях агентами, находящимися в воде, происходит интенсивно [3].

Конструкции основных сооружений Алтайской ГЭС запроектированы таким, чтобы было возможно увеличивать её мощность и выработку электроэнергии. Необходимые для этого увеличения полезного объема водохранилища и напора на турбинах плотины производятся за счет наращивания высоты плотины. Практически возможно так нарастить плотину, что установленная мощность Алтайской ГЭС достигнет 1 600 МВт, что соответствует установленной мощности проектируемой ранее Катунской ГЭС [4]. Увеличение объема неминуемо приведет к повышению стратификации как в зимний, так и в летний периоды.

Для перемешивания водных масс в условиях стратифицированных водохранилищ применяются различные методы, которые способствуют улучшению водного режима. Изменяют

такие его элементы – уровень воды, скорость течения, внешний и внутренний водообмены водохранилищ в целом или на отдельных их участках; используют регулируемый по глубине водозабор [2].

Наблюдения свидетельствуют об интенсивных смещениях водных масс при колебаниях сейш – стоячих водяных волн, частота которых совпадает с частотой собственных колебаний водного бассейна (рис. 1).

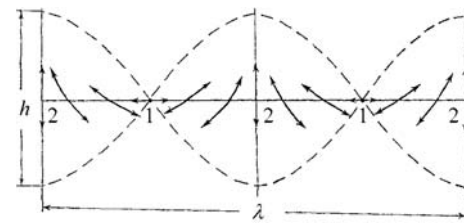


Рис. 1. Схема сейшевой волны: 1 – узлы; 2 – пучности; $h=2A$ – высота волны, где A – амплитуда; λ – длина волны [5]

На рис. 1 показаны три положения поверхности воды при воздействии волн: два крайних (пунктирные линии) и среднее (сплошная линия). Стрелками на линии среднего уровня показаны орбиты частиц в различных точках волнового профиля.

Колебания приводят к значительному перемешиванию, а следовательно, и к выравниванию по вертикали температуры воды, увеличению содержания в ней растворенного кислорода, взвешенных и растворенных веществ [3].

Методика исследований

Характерной особенностью рек ледникового питания является закономерный внутрисуточный ход стока в теплый период года. В соответствии с изменением теплового баланса

поверхности ледника внутрисуточный гидрограф имеет циклический пилообразный или волнообразный вид с одним максимумом и одним минимумом за сутки. На рис. 2 представлен пример, наиболее правдиво, с точки зрения Г. Н. Голубева, иллюстрирующий внутрисуточный ход стока Q .

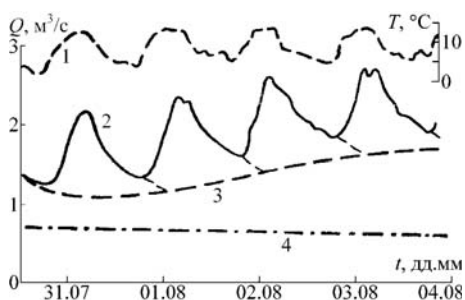


Рис. 2. Внутрисуточный ход и расчленение стока с горноледникового бассейна Джанкуат (Кабардино-Балкария) в ясные дни 31.07-04.08.1970 года: 1 — температура воздуха; 2 — сток с открытого льда; 3 — сток из фирновой области, 4 — сток с неледниковой части бассейна [6]

Согласно принципу комбинационного резонанса селективный отклик колебательной системы (водной массы водохранилища) на воздействие с частотой, близкой к частоте ее собственных колебаний, может происходить при условии кратного или дробного соотношений частот сейш и возбуждающей одиночной волны. Таким образом стоячая волна возбуждается при совпадении частот свободных колебаний водохранилища с частотой ледникового стока. Условие возбуждения водной массы запишется следующим образом [7]:

$$nf_S \approx f_T, \quad (1)$$

где f_S , f_T — частоты сейшевой и внешней, приточной, волн, соответ-

ственно; $n = (\overline{1/n}) \vee (\overline{1/n})$ — коэффициент; \vee — знак дизъюнкции.

Изменение глубины озера Севан (Армения) в прошлом столетии вызвало изменение частоты стоячих волн. При анализе явления в прямоугольном бассейне с горизонтальным дном обнаружена закономерность модулирования частоты колебаний сейш функцией глубины воды. Эффект можно объяснить обобщенной формулой Мериана [7]:

$$f(t)_S^{ab} = 1800 \sqrt{g \times D(t)} \sqrt{\left(\frac{a}{L(t)}\right)^2 + \left(\frac{b}{W(t)}\right)^2},$$

$$L(t) = \text{const}, W(t) = \text{const}, \quad (2)$$

где $f(t)$ — закон изменения частоты сейшевых колебаний, ц/час (циклов в час); f — характерная частота, ц/час.; t — время; $a = \overline{1/a}$, $b = \overline{1/b}$ — количество узлов продольной и поперечной сейш, соответственно; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения; D , L , W , $D(t)$, $L(t)$, $W(t)$ — характерные глубина, длина, ширина бассейна и законы их изменения, соответственно.

Относительную амплитуду сейшевой волны A_S , возбужденной ледниковым стоком (коэффициент усиления), можно рассчитать по формуле [8]:

$$A_S = \left\{ \left[1 - \frac{f_T}{f_S} \right]^2 + Q^{-2} \left[\frac{f_T}{f_S} \right]^2 \right\}^{-1/2}, \quad (3)$$

где Q — добротность водоема, определяющая потери энергии в колебательной системе и ширину полосы частот резонанса.

Основным фактором, определяющим потери энергии в замкнутом бассейне, является трение воды о дно. Обычно оно довольно мало, поэтому в озерах следует ожидать высоких значений добротности. В полужамкнутых бассейнах, таких как

гавани, значительны потери энергии за счет излучения в открытое море. Т.о. сужение устья при строительстве плотин для защиты от внешних ветровых волн и зыби способствует увеличению добротности гавани, и, следовательно, приводит к усилению внутренних, сейшевых, колебаний. Для прямоугольного водоема с горизонтальным дном добротность можно рассчитать по формуле [8]:

$$Q = \frac{L}{W}. \quad (4)$$

Морфометрические характеристики прямоугольного водоема дополняет относительная ширина устья $\mathcal{G} = W_m / W$, где W_m – ширина устья. Относительная ширина устья может изменяться в пределах от 1 (полностью открытая с одной стороны бухта) до 0 (бесприточное, бессточное озеро). Для случаев, когда $Q \gg 1$

и $\mathcal{G} < 1,0$, резонансные частоты на уровне половинной мощности $f_{1/2}$ можно рассчитать по формуле [8]:

$$\left\{ \begin{aligned} f_{1/2}^- &= f_s \left(1 - \frac{1}{2Q} \right); \\ f_{1/2}^+ &= f_s \left(1 + \frac{1}{2Q} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Соответствующая ширина полосы частот резонанса $\Delta f = f_{1/2}^+ - f_{1/2}^-$ составит [8]

$$\Delta f = \frac{f_s}{Q}. \quad (6)$$

Результаты исследований

В табл. 1 приводится сравнительная характеристика основных справочных параметров Алтайской и Катунской ГЭС. В табл. 2 приводится сравнительная характеристика рассчитанных параметров водохранилищ Алтайской и Катунской ГЭС.

Таблица 1

Справочные параметры Алтайской и Катунской ГЭС

Параметры	Алтайская ГЭС	Катунская ГЭС
Мощность, МВт [1]	140	1 600
Высота плотины, м [1]	50	170
Нормальный подпорный уровень, м [1]	490	610
Морфометрические характеристики водохранилища:		
- объем V , км ³ [1]	0,21	5,88
- площадь S , км ² [1]	12,1	87,0
- длина L , км	24,7 [1]	73 [9]

Таблица 2

Рассчитанные параметры водохранилищ Алтайской и Катунской ГЭС

Параметры	Формула	Алтайская ГЭС	Катунская ГЭС
Средняя глубина, м	$\bar{D} = V / S$	17,4	67,6
Средняя ширина, км	$\bar{W} = S / L$	0,490	1,192

Закінчення таблиці 2

Частота продольной одноузловой сейши, ц/час.	(2)	0,951	0,635
Добротность водохранилища, ед.	(4)	50	61
Ширина полосы частот резонанса, ц/час.	(6)	0,018	0,011
Резонансные частоты на уровне половинной мощности, ц/час.:	(5)		
- f_{min} ц/час.		0,908	0,662
- f_{max} ц/час.		0,926	0,672

Полагая зависимость частоты сейш от глубины $f_s(\bar{D})$ линейной, покажем результирующую зависимость амплитуды резонансных приточно-сейшевых волн в водохранилище Алтайской (Катунской) ГЭС от среднего уровня воды (рис. 3).

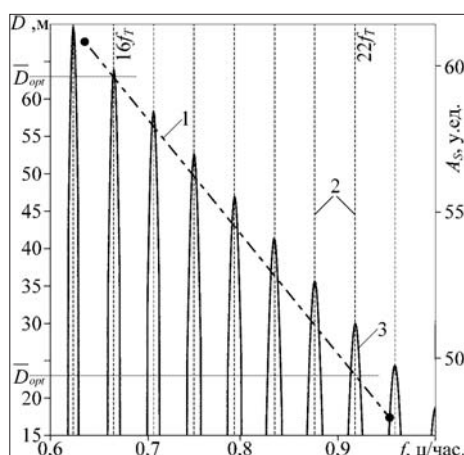


Рис. 3. Зависимость амплитуды резонансных приточно-сейшевых волн в водохранилище Алтайской ГЭС от уровня воды: 1 – частота сейшевых колебаний; 2 – частоты колебаний, кратных частоте волны ледникового стока; 3 – амплитуды резонансных волн

Частота волны ледникового стока f_T при длительности периода 24 часа составляет $1/24$ циклов в час, кратные частоты в соответствии с формулой (1) представлены рядом nf_T . В диа-

пазон частот сейшевых колебаний водохранилища Алтайской ГЭС при изменении его объема (в соответствии с [4]) попадают следующие волны: $16f_T=0,667$; $17f_T=0,708$; $18f_T=0,750$; $19f_T=0,792$; $20f_T=0,833$; $21f_T=0,875$; $22f_T=0,917$ ц/час.

Полагая зависимость добротности водохранилища сейш от глубины $Q(\bar{D})$ линейной, представим резонансную кривую водохранилища (отклик на ледниковый приток). Расчетные оптимумы \bar{D}_{opt} определяются по совпадению частот, кратных притоку, и собственных колебаний водохранилища. На рис. 3 отмечены резонансные частоты для крайних колебаний ряда и соответствующие им глубины.

Выводы

Предложенный беззатратный метод определения глубины водохранилища обеспечивает совпадение частот собственных колебаний водного бассейна и его гидрографа. Это приводит к возбуждению сейш, что способствует улучшению водного режима. Сейшевое перемешивание водных масс найдет применение при оптимизации глубины водохранилищ, которым свойственны длиннопериодные приливно-отливные волны, сгонно-нагонные волны прогнозируемой длительности.

Література

1. ОВОС по обоснованию инвестиций в строительство Алтайской ГЭС на реке Катунь в Республике Алтай [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ecoclub.nsu.ru/katun/new/new3.shtml>.
2. Гидроэнергетика и окружающая среда / Под. ред. Ю. Ландау, Л. Сирено. – К.: Либра, 2004. – 484 с.
3. Арсеньева Н. М., Давыдов Л. К., Дубровина Л. Н., Конкина Н. Г. Сейши на озерах СССР. – Л.: изд-во Ленинградского университета, 1963. – 184 с.
4. Енгоян О. З. ГЭС на реке Катунь: факты и аргументы / Проблемы устойчивого развития Обь-Иртышского бассейна / Под ред. Ю. Р. Широкова, Н. Л. Чубыкиной. – Новосибирск: ИСАР-Сибирь, 2005. – С. 86-89.
5. Егоров Н. И. Физическая океанография. Изд. 2-е, доп. и перераб. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 455 с.
6. Голубев Г. Н. Гидрология ледников. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 248 с.
7. Анахов П. В. Використання мікросейсмогенних явищ для розвантаження тектонічних напружень // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36, №5. – С. 128-142.
8. Rabinovich A. B. Seiches and Harbor Oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering (ed. by Y. C. Kim). – Singapore: World Scientific Publ., 2009. – P. 193-236.
9. Заключение по эколого-экономической экспертизе проекта Катунской ГЭС с контррегулятором (Чемальская ГЭС) / СО АН СССР, 1989. – 31 с.