

УДК 502/504:532.5:626/627

А. П. ГУРЬЕВ, Н. В. ХАНОВ, Н. А. ВОЛГИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОДОБОЙНОГО КОЛОДЦА НА ГАШЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПОТОКА

В статье рассмотрено влияние конструктивных параметров водобойного колодца на гашение энергии потока. Отмечается, что широкое применение водобойных колодцев обусловлено эффективным гашением энергии во всем диапазоне напоров и расходов, пропускаемых водосбросными сооружениями. В результате исследований разных авторов установлена связь между параметрами потока в начале гидравлического прыжка и основными его характеристиками, второй сопряженной глубиной и длиной прыжка. Авторы данной статьи отмечают, что в нередки приходится корректировать проектные решения гидротехнических сооружений из-за различных условий строительства, неучтенных при проектировании сооружения. Такое обстоятельство приводит к изменению конструкции и параметров запроектированных сооружений. В процессе строительства иногда приходится менять принятые ранее технические решения, связанные с уточнением гидрологических и геологических условий или с изменением нормативной базы проектирования, как это случилось, например, со строительством Богучанской ГЭС. При пропуске поверочного расхода через водосброс № 2 Богучанской ГЭС будет проходить расход воды $Q = 3450 \text{ м}^3/\text{с}$, для которого необходимо предусмотреть водобойный колодец с параметрами: $h_{\text{кол}} = 11 \text{ м}$, $l_{\text{кол}} \approx 100 \text{ м}$. Размеры котлована (который был уже устроен) обеспечивают сооружение водобойного колодца с параметрами: $h_{\text{кол}} = 25 \text{ м}$, $l_{\text{кол}} \approx 75 \text{ м}$. Как видно, эти параметры не соответствуют имеющимся рекомендациям. Вопрос применения более глубоких, но менее длинных водобойных колодцев ранее не изучался. Сделан вывод, что исследуемый вопрос является актуальным для проектирования гидротехнических сооружений.

Гидротехнические сооружения, водобойный колодец, нижний бьеф, гашение энергии, расход, гидравлический прыжок.

The article considers the influence of design factors of the stilling basin on the energy dissipation of the flow. It is stated that a wide usage of stilling basins is conditioned by the effective dissipation of energy in the whole range of heads and water discharges passing through spillways. As a result of investigations by different authors there is established a relationship between the flow parameters in the beginning of the hydraulic jump and its main characteristics, the second conjugated depth and jump length. The authors of this article state that it is not seldom that the design decisions of hydraulic engineering structures should be corrected due to different conditions of construction which were not taken into consideration when designing the project. Such a circumstance leads to the change of the structure and parameters of the designed structures. In the process of building it is sometimes necessary to change the adopted technical decisions due to a more accurate specification of hydrological and geological conditions or with the change of the normative base of designing as it happened, for example, with the Boguchany HEP. When passing through spillway No 2 of the Boguchany HEP the check water flow will be $Q = 3450 \text{ м}^3/\text{с}$, for which it is necessary to provide a stilling basin with the following parameters: $h_{\text{кол}} = 11 \text{ м}$, $l_{\text{кол}} \approx 100 \text{ м}$. The sizes of the foundation pit (which has been already built) ensure the structure of the stilling basin with the following parameters: $h_{\text{кол}} = 25 \text{ м}$, $l_{\text{кол}} \approx 75 \text{ м}$. As it is seen these factors do not correspond to the available recommendations. The problem of using deeper but shorter stilling basins has not been studied yet. There is drawn a conclusion that the investigated problem is urgent for designing hydraulic engineering structures.

Hydraulic engineering constructions, the stilling basin, downstream, dissipation of energy, hydraulic jump.

Задача гашения энергии в нижних бьефах гидроузлов представляет собой одну из главных гидравлических проблем, возникающих при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений. Многообразие топографических, геологических и гидрологических условий возведения гидротехнических сооружений, существенное различие в их высоте, величине избыточной энергии перепада и роли их в составе гидроузла требуют различных типов гашения энергии.

На сегодняшний день наиболее часто для гашения энергии за водобросными сооружениями применяются водобойные колодцы, которые могут быть применены в любых геолого-топографических условиях. Широкое распространение они получили благодаря эффективному гашению энергии во всем диапазоне напоров и расходов, пропускаемыми водобросными сооружениями. Однако, они имеют и один существенный недостаток – значительные капиталовложения.

Изучением проблем работы водобойного колодца занимались Б. А. Бахметьев, Н. Н. Павловский, М. Д. Чертоусов, А. Н. Рахманов, О. М. Айвазян, В. Т. Чоу и др. [1]. Расчетная схема водобойного колодца представлена на рисунке 1.

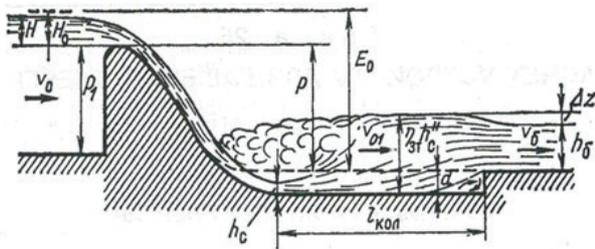


Рис. 1. Расчетная схема водобойного колодца: H – напор; H_0 – напор с учетом скорости подхода потока; v_0 – средняя скорость подхода потока к водосливу; p_1 – высота порога водослива со стороны верхнего бьефа, p_2 – высота порога водослива со стороны нижнего бьефа; E_0 – полная удельная энергия потока; d – глубина водобойного колодца; h_6 – глубина в отводящем русле, соответствующая бытовым условиям; Δz – перепад при выходе потока из водобойного колодца в отводящее русло; h_c – сжатая глубина (первая сопряженная); h_c'' – вторая сопряженная глубина; v_{01} – средняя скорость в водобойном колодце при глубине h_c'' , v_6 – средняя скорость в отводящем русле при бытовой глубине; $\eta_{зт}$ – степень затопления прыжка, $l_{кол}$ – длина водобойного колодца

В результате исследований (рис. 1) была установлена связь между параметрами потока в начале гидравлического прыжка и основными его параметрами, второй сопряженной глубиной и длиной прыжка. В настоящее время для русел с прямоугольным поперечным сечением вторую сопряженную глубину определяют по уравнению [2, 3]:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{кр}}{h_1} \right)^3} - 1 \right), \quad (1)$$

где h_1 – первая сопряженная глубина, м; $h_{кр}$ – критическая глубина, определяемая по зависимости, м:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\alpha q^2 / g}, \quad (2)$$

где q – удельный расход на водобойном колодце, м³/с на 1 п. м; α – коэффициент кинетической энергии; g – ускорение свободного падения, м/с².

Определение первой сопряженной глубины сводится к решению кубического уравнения:

$$(p - H_0) h_1^2 - h_1^3 = \frac{q^2}{\varphi^2 2g}, \quad (3)$$

где p – высота плотины, м; H_0 – напор на водосливе, м; φ – коэффициент скорости.

Уравнение решается методом Кардана (с более простым решением), методом последовательных приближений или построением графоаналитической кривой:

$$y = (p - H_0) h_1^2 - h_1^3. \quad (4)$$

Для определения длины гидравлического прыжка в м рекомендуется применять одну из следующих формул:

длина прыжка по опытным данным

$$l_{пр} = (4...5)(h_2 - h_1); \quad (5)$$

формула Б. А. Бахметьева

$$l_{пр} = 5(h_2 - h_1); \quad (6)$$

формула Н. Н. Павловского

$$l_{пр} = 2,5(1,9h_2 - h_1); \quad (7)$$

формула М. Д. Чертоусова

$$l_{пр} = 10,3 h_1 \left(\sqrt{\left(\frac{h_{кр}}{h_1} \right)^3} - 1 \right)^{0,81}, \quad (8)$$

формула О. М. Айвазяна

$$l_{пр} = k h_w, \quad (9)$$

где k – коэффициент, зависящий от числа Фруда Fr_1 :

$$k = 8(10 + \sqrt{Fr_1}) / Fr_1; \quad (10)$$

h_w – значение потерянного напора в прыжке, определяемое по формуле:

$$h_w = (h'' - h')^3 / (4 h'' h'). \quad (11)$$

Подпертый гидравлический прыжок, как это наблюдается в водобойном колодце, может иметь меньшую длину. Длина подпертого гидравлического

прыжка для небольших сооружений может быть принята $0,7...0,8$ от длины гидравлического прыжка, но для ответственных сооружений рекомендуется принимать $l_{\text{кол}} = l_{\text{пр}} [2]$.

Анализ опыта проектирования водобойных колодцев показал, что для уменьшения капиталовложений в сооружение старались минимизировать длину водобойного колодца. Этого можно достичь установкой дополнительных гасителей, закруткой потока, проектированием водобойного колодца, расширяющимся в плане, переливом через боковую стенку и др.

В практике гидротехнического строительства нередко приходится корректировать проектные решения из-за различных условий строительства, не учтенных при проектировании сооружения, что неизбежно приводит к изменению конструкции и параметров запроектированных сооружений. Кроме того, по ходу строительства иногда приходится менять принятые ранее технические решения, связанные с уточнением гидрологических и геологических условий строительства или с изменением нормативной базы проектирования, как это случилось, например, со строительством Богучанской ГЭС [4, 5].

Строительство Богучанской ГЭС стало уникальным случаем для гидротехнической практики, как в России, так и в мире. За время консервации строительства изменились требования, предъявляемые к режиму пропуска строительных расходов, в связи с чем, было принято решение о строительстве дополнительного водосброса практического профиля вместо трех агрегатных секций здания ГЭС. Поскольку котлован под агрегатные секции ГЭС был уже устроен, встал вопрос о способе гашения энергии потока, пропускаемого водосбросом № 2. Было рассмотрено два варианта гашения энергии потока: отбросом струи в нижний бьеф и с помощью устройства водобойного колодца, сооружаемого в котловане агрегатных секций.

При пропуске поверочного расхода через водосброс № 2 Богучанской ГЭС будет проходить расход $Q = 3450 \text{ м}^3/\text{с}$. Для этого расхода необходимо предусмотреть водобойный колодец с параметрами: $h_{\text{кол}} = 11 \text{ м}$, $l_{\text{кол}} \approx 100 \text{ м}$.

Размеры котлована обеспечивают сооружение водобойного колодца с параметрами: $h_{\text{кол}} = 25 \text{ м}$, $l_{\text{кол}} = 75 \text{ м}$. Как видно, глубина водобойного колодца превосходит требуемое значение почти в 2,5 раза, но

длины водобойного колодца явно недостаточно по имеющимся рекомендациям. Это подтверждают и гидравлические исследования, которые показали, что в водобойном колодце формирующийся гидравлический прыжок распространяется за водобойную плиту ниже по течению (рис. 2) [5].

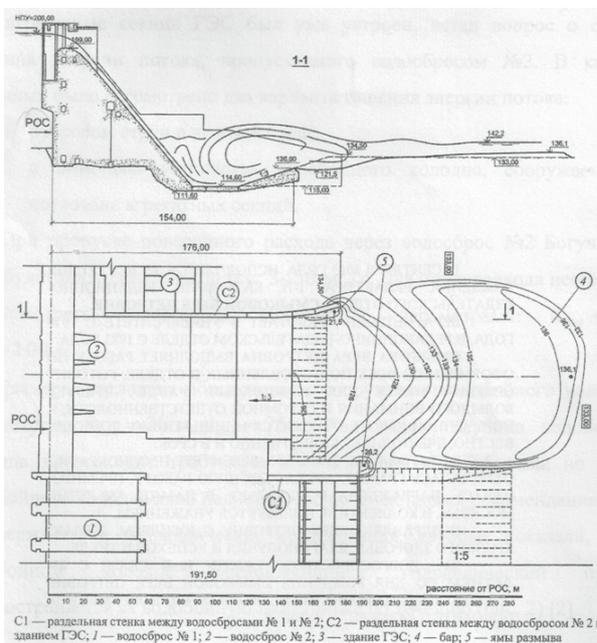


Рис. 2. Схема гидравлического прыжка по результатам исследований

Заключение

Несмотря на большой объем исследований, о которых сообщено в предыдущей части статьи, вопрос применения более глубоких, но менее длинных водобойных колодцев не обсуждался. Эта тема является актуальной для проектирования гидротехнических сооружений и является предметом дальнейших исследований авторов.

1. Рахманов А. Н. О размерах гидравлического прыжка в водобойном колодце // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1965. – Т. 77. – С. 9–37.

2. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: Учебник для вузов. – М.: КолосС, 2004. – 656 с.

3. Айвазян О. М. Основы гидравлики бурных потоков. – М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 266 с.

4. Толошинов А. В., Волынчиков А. Н. Выбор оптимального варианта водосброса № 2 Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2009.

– № 3.– С. 16–21.

5. Новикова И. С., Родионов В. Б., Семенов В. М. Гидравлические исследования и выбор конструкции эксплуатационного водосброса № 2 Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 9. – С. 54–60.

Материал поступил в редакцию 16.06.2014.

Гурьев Алим Петрович, доктор

технических наук, профессор

Тел. +7 (499) 976-21-56

Ханов Нартмир Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидротехнические сооружения»

E-mail: nvkhanov@yahoo.com

Волгин Николай Александрович, аспирант

E-mail: nvolgin@yandex.ru

Тел. 8-916-707-01-22

УДК 502/504:627.82.034.93

В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, А. М. СИЛКИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

ЭТАП СТРОИТЕЛЬСТВА ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН – ЗАЛОГ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ

В решении задачи по обеспечению эксплуатационной безопасности грунтовых плотин важнейшую роль играет этап строительства таких сооружений, где обеспечение качества работ является залогом их надежности и долговечности. В статье проводится анализ причин повреждений, аварий и разрушений грунтовых плотин, являющихся наиболее массовым видом напорных гидротехнических сооружений. Отмечается, что при решении задачи по обеспечению эксплуатационной надежности напорных грунтовых сооружений немалую роль играет этап реализации проектного решения, то есть этап строительства плотин, при ответственном отношении к которому в процессе возведения сооружений нередко выявляются и своевременно корректируются неточности проектных решений, разработок, требований и др. Обоснована методика установления закономерностей оперативного освидетельствования строительных показателей грунтов на основе корреляционно-регрессивного анализа экспериментальных данных. Эта методика позволяет учитывать межфакторные связи в грунтах. Рекомендованы квалификационные показатели для глинистых грунтов, являющиеся многофакторными критериями их состояния при уплотнении. Представлена система оперативного освидетельствования качества укладки глинистых грунтов в тело напорных сооружений, которая может быть использована как для «чистых» (без включений) грунтов, так и для содержащих обломочный материал. Эта система существенно повышает надежность послойной их укладки путем исключения влияния природной изменчивости свойств грунтов на объективность оценки качества уплотнения.

Оперативный геотехнический контроль, квалификационный показатель грунта, коэффициент (степень) уплотнения, метод монолитов, метод лунки (шурфа).

In solving the problem on ensuring the operational safety of earth dams the most important role is played by the construction stage of these structures where ensuring of works quality is the security of their reliability and durability. In the article there is given an analysis of causes of damages, failures and destructions of earth dams which are the most prevailing among head hydro-technical structures. It is stated that when solving the problem on ensuring the operational safety of earth head structures a considerable role is played by the stage of the design decision implementation that is the stage of dams building, under the proper relation to it in the process of erection of structures some inaccuracies of design decisions, developments, requirements etc. are revealed and corrected in due time. The method is substantiated for the establishment of regularities of operative examination of soils building factors on the basis of the correlated-regressive analysis of the experimental data. This method allows taking into consideration inter-factor connections in soils. There are recommended qualification indicators for clay soils which are multi-factor criteria of their condition under compaction. There is given a system of the operative examination of the quality of clay soils laying into the body of head structures which can be used both for «clean» (without inclusions) soils and for those containing detritus. This system significantly improves the reliability of their layering by excluding the influence of the natural changeability of soils properties on the objective assessment of the compaction quality.

Operative geotechnical control, qualification indicator of soil, coefficient (degree) of compaction, method of monoliths, method of the hole (bore bit).