

УДК 626.816

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ НА Г-ОБРАЗНЫЕ ЗАТВОРЫ АВТОМАТОВ УРОВНЯ ВЕРХНЕГО БЬЕФА РЕЧНЫХ ПРОЛЕТОВ ВОДОЗАБОРНЫХ УЗЛОВ

*Н.У. Кайытова*

Обосновывается совершенствование методики расчета средств гидравлической автоматизации прямого действия, которые устраиваются в водосбросных створах низконапорных водозаборных сооружений. Приводится вывод формулы для определения величины противодействия, необходимого для поддержания расчетной глубины в верхнем бьефе.

*Ключевые слова:* Г-образные затворы; гидравлический расчет средств автоматизации; стабилизатор расхода воды.

---

## HYDRODYNAMIC PRESSURE ON L-SHAPED VALVES AUTOMATIC LEVEL HEADWATER RIVER SPANS OF WATER INTAKE SITES

*N.U. Kayipova*

The necessity of improving calculation methods of direct action hydraulic automation means which are arranged in the cross-sections of the spillway (river spans) of low-pressure water intake structures. All derive formula for determining the value of back pressure required to maintain the upstream water intake target depth is given.

*Keywords:* L-shaped valves; hydraulic calculation of automation means; water flow stabilizer.

При проектировании низконапорных водозаборных сооружений основными параметрами, регламентирующими вертикальные габариты их элементов, являются расчетный напор верхнего бьефа  $H_p$  и максимальный расчетный напор  $H_{max}$  [1].

Величина расчетного напора  $H_p$  определяется условиями командования над отводящим каналом и параметрами водоприемных элементов. Максимальный расчетный напор  $H_{max}$  обычно задается согласно рекомендациям [1] в зависимости от величины максимального расхода водотока расчетной обеспеченности  $Q_{i\%}$ .

Основным конструктивным элементом, обеспечивающим пропускную способность водозаборного сооружения и, соответственно, максимальные глубины в верхнем бьефе, является речной пролет. При гидравлическом расчете речного пролета низконапорных водозаборных сооружений истечение из верхнего бьефа (ВБ) в нижний бьеф (НБ) рассматривается в виде потока, проходящего через гребень водослива с широким порогом [1]. Этот подход является верным, если речной пролет оборудуется подпорным элементом в виде механически управляемого затвора, так как затвор может полностью подниматься над уровнем воды.

Необходимо отметить, что сооружение перед створом речного пролета с широким порогом для истечения через водослив, предупреждает уменьшение пропускной способности узла в случае незначительного превышения уровней воды в НБ отметки речного пролета. Такой режим работы обычно проявляется в начальный период пропуска паводкового расхода в условиях, когда в отводящем русле произошло образование наносных гряд при долговременной эксплуатации в режиме межениных расходов или предварительной промывки верхнего бьефа.

В современных условиях при проектировании и строительстве водозаборных сооружений на горных реках для систем гидроэнергетического и ирригационного назначения активно внедряются средства гидравлической автоматизации прямого действия. Они призваны повысить надежность сооружений, автономность гидроузла, а также снизить эксплуатационные затраты за счет сокращения персонала.

Ранее автором была предложена компоновочная схема усовершенствованного водозаборного сооружения (рисунок 1) [2]. В ходе проектирования и моделирования речной пролет представлен-

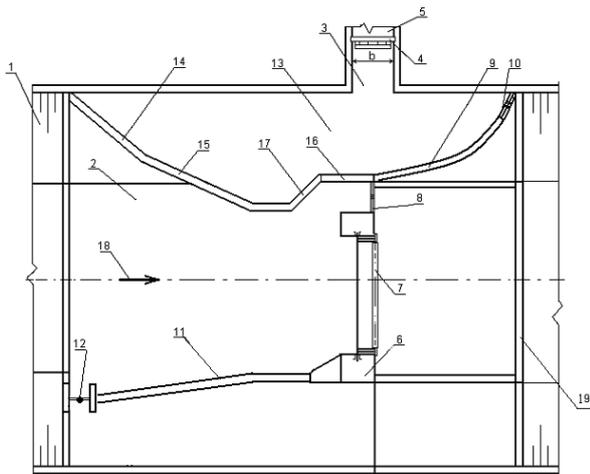


Рисунок 1 – Компонентная схема водозаборного сооружения для горных рек (ВСГР) конструкции КРСУ: 1 – береговой устой, 2 – подводящее русло, 3 – водоприемный оголовок, 4 – стабилизатор расхода, 5 – отводящий канал, 6 – подпорное сооружение, 7 – речной пролет, оборудованный затвором-автоматом уровня верхнего бьефа, 8 – затвор промывного отверстия, 9 – криволинейный в плане катастрофический водослив, 10 – затвор опораживающего отверстия водоприемной камеры, 11 – сбросной водослив, 12 – затвор наносоотводящего отверстия, 13 – водоприемная камера, 14 – усовершенствованный ломаный в плане порог, 15 – часть трапецидальной в плане формы ломаного в плане наносозащитного порога выступающая в сторону речного пролета, 16 – разделительный бычок водоприемной камеры и верхнего бьефа сооружения, 17 – концевая секция ломаного в плане наносозащитного порога, 18 – динамическая ось потока в верхнем бьефе сооружения, 19 – отводящее русло

ного водозаборного сооружения был оборудован моделью Г-образного затвора-автомата уровня верхнего бьефа клапанного типа прямого действия (рисунок 2) [4].

Лабораторные исследования [3] показали, что устройство клапанных затворов-автоматов уровня верхнего бьефа не гарантирует полного его открытия при пропуске паводковых расходов при заданном расчетном напоре  $H_p$ . Значение предельно допустимого открытия затворов составляет угол  $\alpha = 53^\circ \div 55^\circ$ . На модели затворы открывались на угол до  $40^\circ$ , а для большего их открытия требовалось увеличение глубины в верхнем бьефе модели водозаборного сооружения больше расчетного значения. На наш взгляд, это является следствием несовершенства теории и методики расчета затворов-автоматов уровня верхнего бьефа.

С целью вывода основного уравнения, характеризующего расчетные параметры затвора-автомата уровня верхнего бьефа прямого действия, была рассмотрена следующая схема (рисунок 3), на которой действие затвора-автомата заменено противодействующим подтоплением со стороны нижнего бьефа. При этом истечению через речной пролет должен противодействовать объем воды в виртуальном отводящем русле, площадь поперечного сечения которого стремится к бесконечности  $\omega_{от} \rightarrow \infty$ , скорости движения потока на любом участке длины равны нулю [1].

Составляя уравнение Бернулли для сечений I-I и II-II относительно плоскости сравнения 0-0 (см. рисунок 3), можем получить зависимость вида:

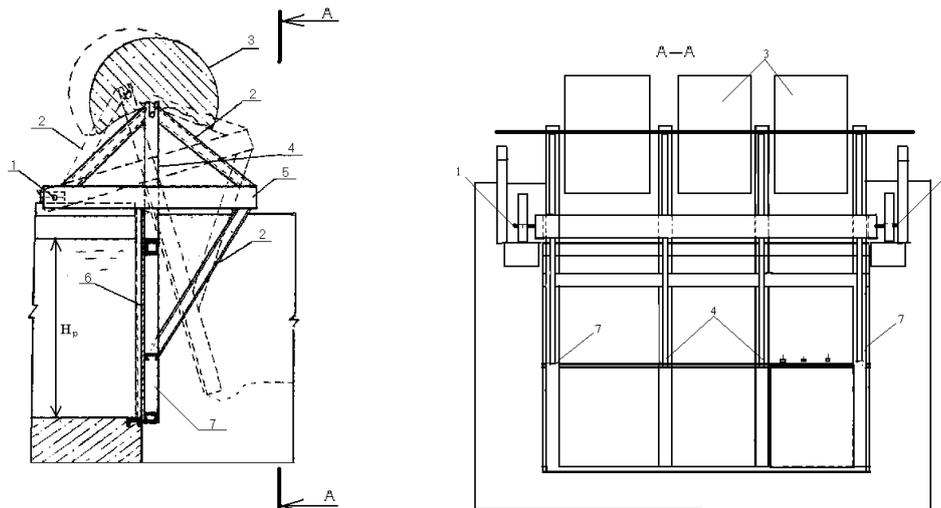


Рисунок 2 – Г-образный затвор автомат уровня верхнего бьефа:

1 – ось вращения; 2 – раскосы; 3 – протиговес; 4 – стойки; 5 – консоль; 6 – полотнище; 7 – боковые стойки

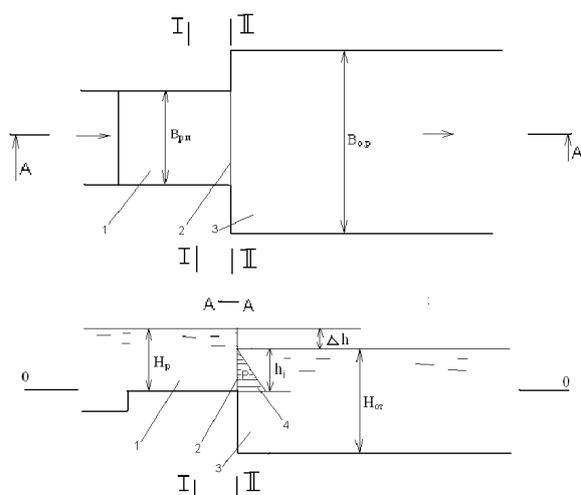


Рисунок 3 – Расчетная схема речного пролета с эквивалентным сопротивлением со стороны отводящего русла: 1 – порог речного пролета; 2 – створ устройства затвора-автомата уровня верхнего бьефа; 3 – эквивалентный поток в отводящем русле; 4 – эпюра противодавления со стороны виртуального отводящего русла

$$H_p + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_i + \xi_p \frac{v_1^2}{2g}, \quad (1)$$

где  $H_p$  – глубина воды над гребнем порога, где поток можно считать плавно изменяющимся при прохождении величин расходов воды меньше паводковых;  $v_1$  – скорость движения воды, на гребне порога составляющего речной пролет;  $h_i$  – требуемое превышение уровня воды в отводящем русле воды над дном речного пролета для поддержания на его гребне расчетного напора  $H_p$ ;  $\sum \xi_p$  – коэффициент потерь напора водного потока на преодоление концевое створа порога.

Так как эквивалентный объем воды в отводящем русле замещает подпорное устройство в виде затвора речного пролета, а скорость движения полотнища затвора-автомата уровня верхнего бьефа при установившемся уровне воды в верхнем бьефе равна нулю, в известном уравнении Бернулли (1) скоростной напор в сечении II принимается равным нулю. Поэтому для определения потерь напора в створе речного пролета нами используется скоростной напор, наблюдаемый в сечении I-I.

Преобразовывая приведенное уравнение, можем получить зависимость для определения величины противодавления, вызываемого эквивалентным сопротивлением от неподвижного объема воды, находящегося в виртуальном отводящем русле на 1 метр ширины речного пролета:

$$h_i = H_p - \Delta h + \frac{\alpha v_1^2}{2g}. \quad (2)$$

При выводе уравнения (2) были сделаны следующие преобразования:

$$\Delta h_i = \xi_p \frac{v_1^2}{2g},$$

где  $\Delta h_i$  – необходимая разность уровней воды в речном полете и в виртуальном отводящем русле для пропуска необходимого расхода  $Q_p$ , которая также может быть определена по формуле, определенной из уравнения Бернулли (1):

$$\Delta h_i = \frac{q_i^2}{c^2 H_p^2 2g}, \quad (3)$$

где  $q_i$  – удельный расход воды в створе речного порога;  $c$  – коэффициент, зависящий от величины коэффициента потерь напора при преодолении створа для устройства затвора-автомата уровня верхнего бьефа  $\xi_p$  и отношения  $\Delta h_i / H_p$ .

С учетом выражения (3) зависимость (2) может быть преобразована:

$$h_i = H_p - \frac{q_i^2}{c^2 H_p^2 2g} + \frac{\alpha q_i^2}{2g H_p^2}. \quad (4)$$

Приведенное уравнение может являться функцией для определения зависимости величины противодавления от расходов воды, которые необходимо сбрасывать в нижний бьеф водозаборного сооружения через речной пролет  $P-f(Q)$ . Анализ зависимости (4) показывает, что при сбросном расходе через речной пролет, равном нулю, величина противодавления должна составлять величину гидростатического давления при глубине  $H_p$ , а при максимальном – противодавление должно составлять образующийся при этом скоростной напор.

Теоретическому обоснованию параметров средств автоматизации речных пролетов водозаборных сооружений посвящены работы многих видных ученых в области гидротехники: Я.В. Бочкарева, Э.Э. Маковского, Мельникова Б.И., Рохмана А.И. и др. [1]. На сегодняшний день имеется множество различных методов, описывающих рабочие характеристики и параметры отдельно взятых конструкций затворов, способных обеспечить в автоматическом режиме поддержание расчетного напора в верхнем бьефе водозаборных сооружений. Но ни одна из них не является универсальной, способной произвести диагностику вновь создаваемых конструкций затворов-автоматов.

На наш взгляд, в качестве базовой по определению параметров средств автоматизации речных пролетов, с установлением связи между гидравликой потока и взаимодействующими с ним металлоконструкциями, может быть принята методика Э.Э. Маковского, составленная относительно гидравлических и пневматических регуляторов

уровней воды в автоматизированных системах [4]. В этой работе им даются теоретические уравнения уравнивания моментов от действия не только гидростатических сил и затворов относительно оси вращения, но также предложены некоторые зависимости для уравнивания при действии гидродинамических сил.

С целью разработки усовершенствованной методики расчета авторами были разработаны расчетные схемы взаимодействия водного потока верхнего бьефа с плоской напорной гранью затвора (рисунок 4). При этом в качестве прототипов были рассмотрены Г-образный затвор-автомат уровня верхнего бьефа [1] и регулятор АРУ [1].

При определении параметров элементов средств гидравлической автоматизации, обычно пользуются уравнением моментов внешних сил, действующих на подвижные части затвора относительно оси вращения  $O$  [1, 6]:

$$\sum M_o = P_{гд} \cdot l_2 - G_3 l_3 - G_{np} \cdot l_{np} = 0, \quad (5)$$

где  $\sum M_o$  – сумма моментов внешних сил, действующих на подвижные части затвора относительно оси вращения  $O$ ;  $P_{гд}$  – гидродинамическая сила, действующая на полотнище затвора, которая складывается из следующих составляющих:

$$P_{гд} = P_{гсд} + P_v \quad (6)$$

где  $P_{гсд}$  – сила гидростатического давления потока воды на полотнище затвора;  $P_v$  – сила, действующая на полотнище затвора в зависимости от величины скоростного напора потока;  $l_1$  – плечо действия равнодействующей силы  $P_{гд}$  на полотнище затвора;  $G_3$  – общая масса вращающихся элементов затвора;  $l_3$  – плечо действия момента от массы затвора относительно оси вращения  $O$ ;  $G_{np}$  – масса элемента, производящего противодействие при не-

достающем моменте от действия массы элементов затвора (при устройстве Г-образного затвора-автомата, где  $G_{np}$  – это масса противовеса, при устройстве АРУ – масса объема воды в емкости четверти эллипса);  $l_{np}$  – длина плеча действия момента от элемента противодействия.

Для рассмотрения взаимодействия водного потока с плоским полотнищем затвора автомата сделаем следующие допущения и ограничения:

- 1) при подходе потока к полотнищу затвора линии его токов остаются параллельными динамической оси струй на гребне водослива;
- 2) действие скоростного напора на полотнище затвора распределено равномерно по всей площади;
- 3) длина консоли затвора может изменяться в пределах  $c = (0 \div \infty)$ ;
- 4) высота полотнища затвора  $v \geq H_p$ ;
- 5) угол открытия может изменяться в пределах  $\alpha = (0 \div 90)$ ;
- 6) при всех углах открытия затвора расчетный напор перед полотнищем остается постоянным  $H_p = const$ ;
- 7) консоль размещается относительно полотнища затвора под углом  $90^\circ$ .

Искомой зависимостью в результате наших исследований будет:

$$M_{кр}^{гд} = f(\alpha, c, v), \quad (7)$$

где  $M_{кр}^{гд}$  – крутящий момент от действия гидродинамической силы.

Также функциональная зависимость (7) станет определяющей для расчета суммарного крутящего момента от действия массы затвора и элемента противодействия с учетом уравнения (5).

Анализ расчетной схемы (см. рисунок 4) показал, что действие от составляющих гидродинами-

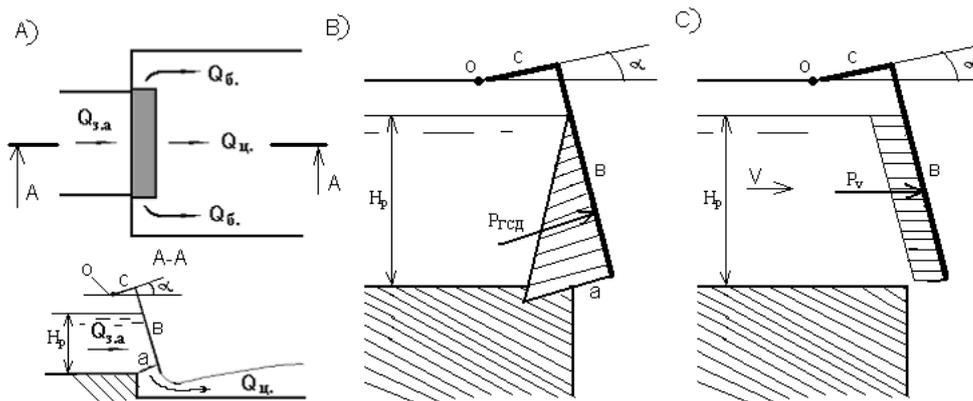


Рисунок 4 – Расчетная схема взаимодействия гидродинамической силы водного потока, проходящего через речной пролет с плоской напорной гранью полотнища затвора-автомата уровня верхнего бьефа:  $O$  – ось вращения;  $c$  – длина консоли затвора;  $v$  – высота полотнища затвора;  $a$  – величина открытия затвора;  $\alpha$  – угол открытия затвора

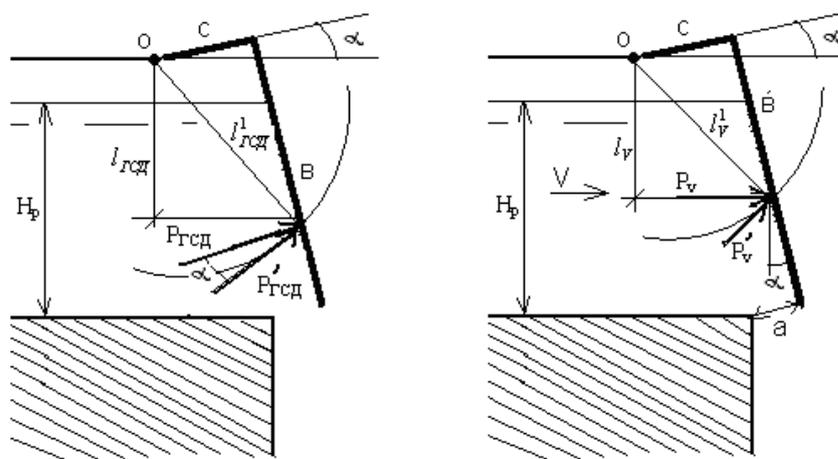


Рисунок 5 – Расчетная схема для определения приведенных сил, составляющих гидродинамическую силу потока, проходящего через речной пролет, оборудованный средством гидравлической автоматизации клапанного типа

ческую силу происходит с различной направленностью, поэтому необходимо привести их к равнодействующей и определить их средневзвешенное плечо. Анализ расчетных схем различных конструкций затворов-автоматов, показал, что общей направленностью сил являются направления касательных к окружностям, проходящим через центры приложения рассматриваемых сил с центром на оси вращения затвора.

Таким образом, необходимо определить значения приведенных составляющих  $P_{ГД}^1$  и  $P_V^1$  от рассматриваемых составляющих сил  $P_{ГД}$  и  $P_V$  (рисунок 5), приведенных моментов  $M_{ГД}^1$  и  $M_V^1$ , которые с учетом величин приведенных плеч действия  $l_{ГД}^1$   $l_V^1$  равны по значению первоначальным моментам.

В свою очередь, величина гидростатического давления на 1 м ширины полотна затвора в зависимости от угла открытия  $\alpha$  может быть определена по формуле:

$$P_{ГД} = \rho g \frac{H_p - \left(2\sqrt{c^2 - \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2}\right) \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon}\right)}{3} \times \frac{\epsilon - H_p - \left(2\sqrt{c^2 + \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2}\right) \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon}\right)}{\cos \alpha}. \quad (8)$$

Сила, действующая на 1 м ширины полотна затвора от скоростного напора потока, определится по зависимости:

$$P_V = \rho g \frac{\epsilon - H_p - \left(2\sqrt{c^2 + \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2}\right) \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon}\right)}{\cos \alpha} \frac{q^2}{2gH_p^2}. \quad (9)$$

Величины приведенных сил, составляющих гидродинамическое давление, определяются по формулам:

$$P_{ГД}^1 = P_{ГД} \cos \beta, \quad (10)$$

где  $\beta$  – угол между направлениями действующей силы ГСД и касательной к окружности, проходящей через точку приложения равнодействующей нагрузки, определяется по формуле:

$$\beta = \arctg \frac{c}{\epsilon - \frac{H_p}{3}}. \quad (11)$$

$$P_V^1 = P_V \cos \gamma, \quad (12)$$

где  $\gamma$  – угол между направлениями действующей силы от скоростного напора и касательной к окружности, проходящей через точку приложения равнодействующей нагрузки, определяется по формуле:

$$\gamma = 90 - \arcsin \frac{H_p - 2\sqrt{c^2 + \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon}\right)}{\epsilon - \frac{H_p - 2\sqrt{c^2 + \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon}\right)}{\sqrt{c^2 + \left(\epsilon - \frac{H_p - 2\sqrt{c^2 + \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left(\frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon}\right)}{2}\right)^2}}. \quad (13)$$

Для определения крутящих моментов от действия приведенных сил, необходимо знать значения соответствующих наименьших расстояний от оси вращения до точек приложения сил (плеч

приведенных сил), которые определяются по формулам:

$$l_{ГСД}^1 = \sqrt{c^2 + \left( \frac{H_p - 2\sqrt{c^2 + \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon} \right)}{3 \cos \alpha} \right)^2}, \quad (14)$$

$$l_V^1 = \sqrt{c^2 + \left( \frac{H_p - 2\sqrt{c^2 + \epsilon^2} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \left( \frac{\alpha}{2} + \arctg \frac{c}{\epsilon} \right)}{2 \cos \alpha} \right)^2}. \quad (15)$$

Приведенные силы  $P_{ГСД}^1$  и  $P_V^1$  направлены по касательным к окружностям с различными радиусами, но имеющими один центр. Возможно их сложение с целью определения возникающего крутящего момента. Но для этого расчета необходимо знать плечо действия общей силы, которое можно определить по формуле:

$$l_{cp} = \frac{P_{ГСД}^1 l_{ГСД}^1 + P_V^1 l_V^1}{P_{ГСД}^1 + P_V^1}. \quad (16)$$

Приведенные выше преобразования позволили рассчитать определение величин крутящего момента от действия гидродинамической нагрузки относительно оси вращения затвора и определения функциональных зависимостей (7). Полученные уравнения могут быть использованы и для определения параметров и местоположения элементов противодействия конструкций затворов, устраиваемых в речных пролетах. С учетом уравнения (4) можно определить связь механических

сопротивлений, возникающих от полотнища затвора, с гидравлическими характеристиками потока в виде:

$$\frac{M_{КР}^{ГД}}{\rho g l_{cp}} = H_p - \frac{q_i^2}{c^2 H_p^2 2g} + \frac{\alpha q_i^2}{2g H_p^2}. \quad (17)$$

В дальнейшем необходимо провести экспериментальные исследования истечения через уступы, на которых устраиваются затворы речных пролетов, и для определения поправочных коэффициентов, учитывающих допущения и ограничения, приведенные выше. Планируется разработка усовершенствованной конструкции затвора-автомата уровня верхнего бьефа.

#### Литература

1. Гидравлические процессы при водозаборе из горных рек. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2014. 196 с.
2. Лавров Н.П. Водозаборное сооружение для деривационной ГЭС на р. Иссык-Ата / Н.П. Лавров, Г.И. Логинов, М.К. Торопов // Гидротехническое строительство. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2008. № 12. С. 5–9.
3. Гидротехнические сооружения для малой энергетики горно-предгорной зоны / под ред. Н.П. Лаврова. Бишкек: Салам. 2009. 496 с.
4. Маковский Э.Э. Автоматизированные автономные системы трансформации неравномерного стока / Э.Э. Маковский, В.В. Волчкова. Фрунзе: Илим, 1981. 371 с.