



Научная статья

УДК 627.514.6

doi: 10.55186/25876740_2023_66_5_512

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВОДОСБРОСНОГО СООРУЖЕНИЯ ПО СХЕМЕ ИСТЕЧЕНИЯ ИЗ-ПОД ЩИТА В УСЛОВИЯХ ПРОПУСКА РАСХОДОВ РЕДКОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ

М.А. Бандурин, И.А. Приходько, А.Ю. ВербицкийКубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина,
Краснодар, Россия

Аннотация. В последние годы в водохозяйственном комплексе Юга России растет дефицит пресной воды. Это связано не только с ростом водопользователей и водопотребителей, но и с климатическими изменениями. Поэтому целью проведенных нами исследований является анализ возможности использования щитового затвора в качестве средства измерения расхода воды, установленного в оросительном лотке-водовыпуске для повышения эффективности использования пресной воды в условиях ее дефицита на Юге России. Материалы и методы: изучение пропускной способности щитового затвора, которое проводилось в лаборатории факультета гидромелиорации, кафедры строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов Кубанского ГАУ на модели гидрометрического лотка. Измерения проводились при условиях несвободного (подтопленного) истечения из-под затвора с образованием затопленного гидравлического прыжка. На практике условия свободного истечения из-под затвора в ирригационных сооружениях встречаются редко, следовательно, основное внимание в исследовании направлено на несвободное (подтопленное) истечение из-под затвора. Результаты: построены номограммы и соотношения для коэффициентов расхода анализируемого затвора, была исследована возможность использования существующей номограммы пропускной способности затвора для определения соответствующих характеристик моделируемого гидротехнического сооружения. Выводы: изучено влияние сужения поперечного сечения под затвором согласно различным практикам монтажа: тавровое крепление (с помощью анкеров) в канале и бетонирование в штробу на его пропускную способность. Результаты исследования представляют интерес с точки зрения инженерной практики, гидромеханики, гидравлики и будут полезны при калибровке конструкций направляющих, необходимых для подъема поверхностного щитового затвора с прямоугольным сечением для измерения расхода и разработки рекомендаций по оптимизации работы гидротехнического сооружения.

Ключевые слова: дефицит, климатические изменения, водообеспеченность, юг России, водные ресурсы, несвободное истечение, гидрометрический лоток, регулирование и измерения расхода

Благодарности: исследование выполнено при поддержке РФФИ и Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 22-17-20001.

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF A SPILLAGE FACILITY ACCORDING TO THE SCHEME OF OUTFLOW FROM UNDER THE SHIELD UNDER THE CONDITIONS OF PASSING RARE COSTS

M.A. Bandurin, I.A. Prikhodko, A.Yu. VerbitskyKuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin,
Krasnodar, Russia

Abstract. In recent years, the shortage of fresh water has been growing in the water management complex of the South of Russia. This is due not only to the growth of water users and water consumers, but also as a result of climate change. Therefore, the purpose of our research is to analyze the possibility of using a shield gate as a means of measuring water flow, installed in an irrigation flume-outlet to improve the efficiency of fresh water use in conditions of its deficit in the South of Russia. Materials and methods: study of carrying capacity of panel gate was conducted in laboratory of Faculty of Hydro amelioration, Department of construction and operation of water management objects of Kuban State Agrarian University, on the model of hydrometric flume. The measurements were carried out under conditions of non-free (waterlogged) outflow from under the gate with formation of a flooded hydraulic jump. In practice, conditions of free outflow from under the gate in irrigation structures are rare, therefore, the main focus of the study is on the non-free (submerged) outflow from under the gate. Results: nomograms and relationships for the flow coefficients of the analysed gate were constructed, the possibility of using the existing gate capacity nomogram to determine the relevant characteristics of the simulated hydraulic engineering installations was investigated. Conclusions: The effect of narrowing the cross-section under the gate according to different installation practices: T-bar anchoring (with anchors) in the channel and concreting in the box, on its throughput capacity has been studied. The results of the study are of interest in terms of engineering practice, hydromechanics, hydraulics and will be useful in calibrating guide structures required for lifting a surface panel gate with a rectangular cross-section to measure flow and developing recommendations for optimising the performance of the hydraulic engineering installations.

Keywords: deficit, climate change, water availability, south of Russia, water resources, captive outflow, gauging flume, regulation and flow measurement

Acknowledgments: the research was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Kuban Science Foundation under research project No. 22-17-20001.

Введение. В последние десятилетия на Юге России возрастает дефицит пресной воды [1-3]. Это обусловлено, в первую очередь, происходящими климатическими изменениями [4]. Для решения данной проблемы необходима оптимизация работы регулирующих сооружений

в водохозяйственном комплексе Нижней Кубани [5]. Рассмотрим щитовые поверхностные затворы, предназначенные для перекрытия и регулировки уровня воды. Простота проектирования, изготовления и эксплуатации щитовых затворов, высокая степень надежности

и низкие затраты на техническое обслуживание, а также возможность сочетания с автоматическим регистратором уровня воды позволяют отнести их к числу наиболее оптимальных гидротехнических сооружений для контроля уровня или измерения расхода. Объемный расход,



проходящий через классический щитовой поверхностный затвор, может быть рассчитан, если известны следующие характеристики: высота поднятия затвора (a), а также глубина воды перед затвором (H) и за затвором (h) соответственно. Незначительные потери напора и отсутствие необходимости в использовании дорогостоящего оборудования делают щитовые поверхностные затворы предпочтительными для измерения расхода, особенно в гидромелиоративных проектах [6]. За счет этого они все чаще используются в качестве комбинированных инструментов управления потоком и измерения расхода, для которых контроллеры измеряют уровень воды у затвора выше и ниже по течению, а также автоматически регулируют высоту подъема щита затвора для поддержания постоянного целевого расхода [7].

Однако использование щитовых поверхностных затворов для точного измерения расхода оказалось проблематичным из-за неопределенности относительно того, какой коэффициент расхода (C_d) использовать в уравнении расхода. Различия приводят к теоретическим и практическим расхождениям между константами, которые должны использоваться в любом уравнении расхода.

Оптимизация и калибровка расходов щитовых поверхностных затворов являются классическими проблемами в гидравлике, но, несмотря на многочисленные исследования, точность калибровки сброса для этих гидротехнических сооружений при обеспечении условий несвободного (подтопленного) истечения из-под щита не была оптимальна для заведующих управлением водными ресурсами организаций.

На практике для существующих шлюзовых затворов калибровка и определение оптимального C_d выполняются с использованием полевых или лабораторных измерений. На основе гидравлических экспериментов необходимо определить значения коэффициентов расхода, используемых в одномерных формулах, связывающих глубины, высоту открытия затвора и его ширину с расходом воды для рассматриваемой формы истечения, а также провести анализ параметров, связанных с измерением расхода воды, проходящий через прямоугольный затвор [8].

Использование выведенных формул и коэффициентов для определения расхода в условиях несвободного истечения требует уточнения следующих вопросов, где должна располагаться точка измерения бытовой глубины, для плоского вертикального затвора с острой низовой кромкой и без порога, установленного в канале с прямоугольным поперечным сечением, чтобы обеспечить хорошее соответствие между измеренным и расчетным расходами. На практике уровни воды нижнего и верхнего бьефов измеряются в самых разных сечениях.

Производители щитовых поверхностных затворов устанавливают датчики уровня воды на самой раме затвора, в то время как другие инженеры монтируют датчики уровня воды выше и/или ниже по течению от затвора [9].

Как конструкция направляющих, необходимых для подъема затвора (изменение ширины проема по отношению к ширине канала за счет расстояния между рамой затвора и бетонной стеной (для моделей анкерного крепления к торцу канала/стене)), влияет на значения коэффициентов расхода в условиях несвободного истечения.

Попытка ответить на эти вопросы стала целью модельно-гидравлических экспериментов, проведенных и описанных в данной работе. Поскольку на практике условия свободного истечения в ирригационных сооружениях встречаются редко, основное внимание в исследовании направлено на несвободное истечение из-под затвора.

Материалы и методы. Когда глубина h_2 над сечением, где наблюдается максимальное сжатие истекающей из-под затвора струи, заметно ниже глубины воды h в нижнем бьефе за гидравлическим прыжком в сечении 2-2 ($h_2 < h$) или близка к ней ($h_2 \approx h$) в условиях несвободного (подтопленного) истечения:

$$\frac{h}{h_1} \left(\frac{h}{h_1} + 1 \right) \leq 4\varphi^2 \left(\frac{H_0}{h_1} - 1 \right), \quad (1)$$

где h — бытовая глубина в нижнем бьефе, м; h_1 — глубина в сжатом сечении непосредственно за затвором при несвободном истечении, м; φ — коэффициент скорости для щитовых отверстий без порога; H_0 — полный напор в сечении 0-0, м.

В нижнем бьефе (непосредственно после затвора) образуется затопленный гидравлический прыжок (рис. 1).

В данном случае расход Q из-под плоского вертикального затвора принято рассчитывать, исходя из скорости потока v_1 на глубине h_2 ,

и определять с использованием уравнения сохранения энергии между поперечными сечениями 0-0 и 1-1 соответственно:

$$Q = \mu ab \sqrt{2g(H_0 - h_2)}, \quad (2)$$

где Q — расход, м³/с; μ — коэффициент расхода; a — высота отверстия, м; b — ширина отверстия, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; H_0 — полный напор в сечении 0-0, м; h_2 — глубина, образующаяся после сжатого сечения 1-1, м.

Лабораторные исследования многих авторов [10, 11, 12] показали, что в случае несвободного истечения потока из-под щита коэффициент расхода имеет те же значения, что и при свободном истечении. Исследованиями было установлено, что глубина непосредственно за щитом несколько меньше глубины потока в нижнем бьефе.

Значение коэффициента расхода отверстия μ для свободного потока равно $\mu = \varepsilon \cdot \varphi$, где φ — коэффициент скорости, отнесенный к сжатому сечению, ε — коэффициент вертикального сжатия струи при истечении из-под затвора, определяемый как отношение высоты поднятия затвора (a) к напору (глубине воды перед затвором) H . В зависимости от условий подхода потока к отверстию (если действуют только нормальные напряжения) величина этого коэффициента будет полностью зависеть от отношения высоты отверстия к напору a/H .

Значения коэффициента сжатия ε для условий свободного истечения определяются на основе гидравлических экспериментов [13]. Однако в одномерном описании потока четко не определено расположение поперечного сечения 1-1, где должна быть измерена глубина h_z , необходимая в уравнении (2). При затопленном гидравлическом прыжке предполагается, что глубина h_z равна глубине воды h в нижнем бьефе за гидравлическим прыжком в сечении 2-2, то есть $h_z \approx h$ (рис. 1 (II)).

Для расчета расхода при несвободном истечении из-под затвора используется также соотношение, полученное для свободного истечения, где глубина в поперечном сечении 1-1 задается соотношением $h_1 = \varepsilon \cdot a$:

$$Q = C_d ab \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

где C_d — коэффициент расхода; H — глубина потока перед затвором, м. Коэффициент расхода определяется следующим образом:

$$C_d = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1 + \varepsilon \frac{a}{H}}}, \quad (4)$$

где ε — коэффициент сжатия.

Согласно [8], если выполнены следующие условия (5), то истечение из-под затвора считают несвободным (рис. 2):

$$H < 0,81h \left(\frac{h}{a} \right)^{0,72}, \quad (5)$$

где H — глубина потока перед затвором, м; h — уровень воды за затвором, м; a — высота открытия (поднятия) затвора, м.

С середины прошлого века разработаны регрессионные зависимости для коэффициентов расхода C_d . В условиях свободного истечения коэффициенты расхода зависят от глубины воды в верхнем бьефе H и высоты поднятия затвора a . Однако в случае несвободного истечения необходимо обобщить его значение глубиной воды за затвором h .

Представим соотношение уравнения (4), описывающее зависимость коэффициента расхода для затопленного отверстия в следующей форме:

$$C_d = 0,611 \left(\frac{H-a}{H+15a} \right)^{0,072} (H-h)^{0,7} \left\{ 0,32 \left[0,81h \left(\frac{h}{a} \right)^{0,72} - H \right]^{0,7} + (H-h)^{0,7} \right\}^{-1}, \quad (6)$$

Введение приведенного выше уравнения в уравнение (3) позволяет вычислить расход:

$$Q = 0,864ab \sqrt{gH} \left(\frac{H-a}{H+15a} \right)^{0,072} (H-h)^{0,7} \left\{ 0,32 \left[0,81h \left(\frac{h}{a} \right)^{0,72} - H \right]^{0,7} + (H-h)^{0,7} \right\}^{-1}, \quad (7)$$

Коэффициент расхода определяется уравнением (6) в зависимости от высоты поднятия затвора, а также глубины до и после затвора $C_d = f(H/a; h/a)$ (рис. 3).



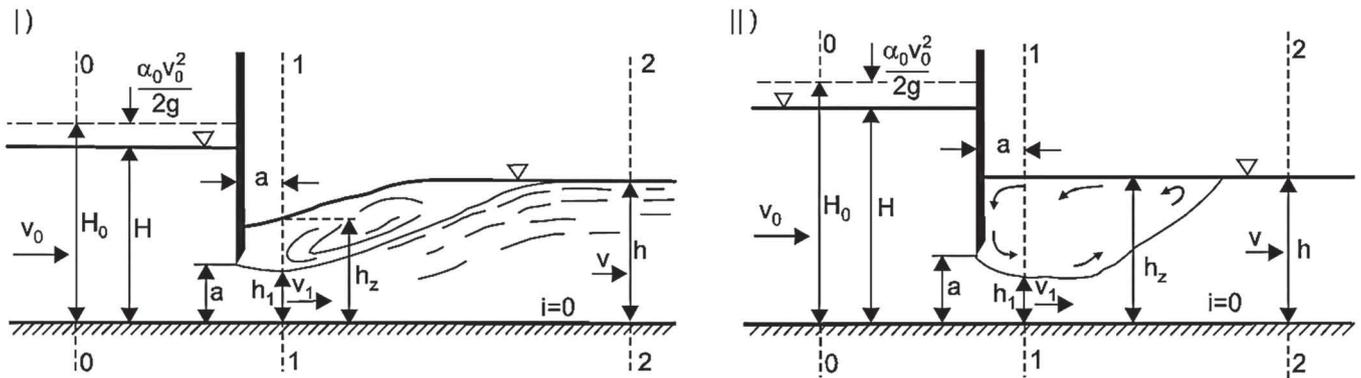


Рисунок 1. Истечение несвободное (подтопленное): (I) глубина воды h_2 заметно ниже, чем глубина воды ниже по течению h : ($h_2 < h$), затопленный прыжок, образующийся непосредственно у сжатого сечения 1–1; (II) глубина воды h_2 близка к глубине воды в канале ниже h : ($h_2 \approx h$), при котором сжатое сечение 1–1 бурного потока затопляется, профиль воды за затвором для образовавшегося гидравлического прыжка волнист и неустойчив
 Figure 1. The expiration is not free (flooded): (I) the depth of the water h_2 is noticeably lower than the depth of the water downstream h : ($h_2 < h$) a flooded jump formed directly at the compressed section 1–1; (II) the depth of the water h_2 is close to the depth of the water in the channel below h : ($h_2 \approx h$) at which the compressed section 1–1 of the turbulent flow is flooded, the water profile behind the gate for the resulting hydraulic jump is wavy and unstable

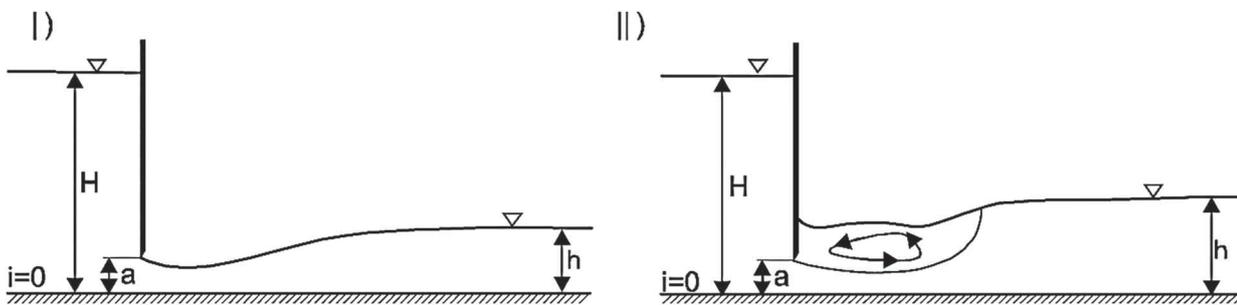


Рисунок 2. Истечение из-под затвора: (I) свободное истечение; (II) несвободное истечение
 Figure 2. Expiration from under the shutter: (I) free expiration; (II) non-free expiration

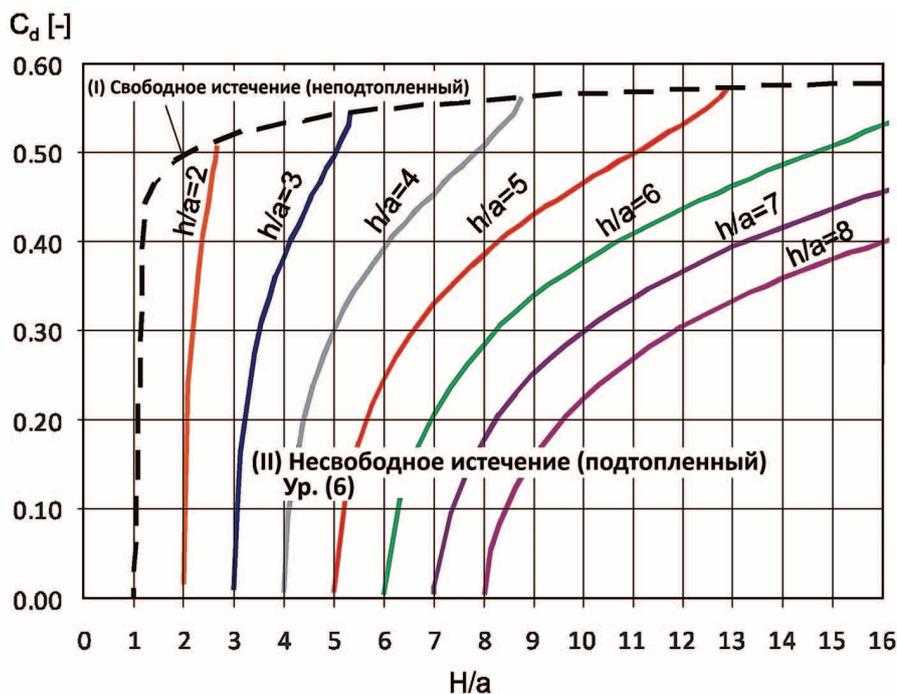


Рисунок 3. Номограмма для расчета значения коэффициента расхода для различных соотношений H/a и h/a в случае свободного и несвободного истечения из-под затвора
 Figure 3. Nomogram for calculating the value of the flow coefficient for different ratios H/a and h/a in the case of free and non-free flow from under the gate

Приведенные соотношения для двух видов истечения из-под затвора были определены в ходе гидравлических испытаний, проведенных в горизонтальном канале с прямоугольным поперечным сечением и шириной, равной ширине затвора [14]. Проходящий через шлюзовый затвор поток формируется, исходя из различных условий притока, определяемых трапецевидным поперечным сечением канала верхнего и нижнего бьефов.

Гидравлические эксперименты по измерению расхода воды с использованием модели щитового затвора, установленного в прямоугольном канале, были выполнены в гидравлической лаборатории факультета гидромелиорации кафедры строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов Кубанского ГАУ. Модель щитового затвора была построена в масштабе 1:2 по сравнению с прототипами конструкций, используемых на практике [15]. Щит затвора изготовлен из ПВХ прямоугольной формы, размеры затвора по пролету и высоте 0,43×0,50 м и толщиной 0,018 м соответственно. Очертание низового контура щита выполнено с прямолинейным скосом, обращенным в сторону нижнего бьефа.

В этом исследовании в качестве влияющих параметров были выбраны два тестовых примера крепления боковых частей рамы щитового затвора. В первом случае (I) направляющие затвора (опорно-ходовая часть) сужали ширину пролета перекрываемого отверстия с 0,40 м до $b=0,34$ м (рис. 4 (I)), крепление в канале с помощью анкеров. Во втором случае (II) направляющие были сформированы через пазы в стенках

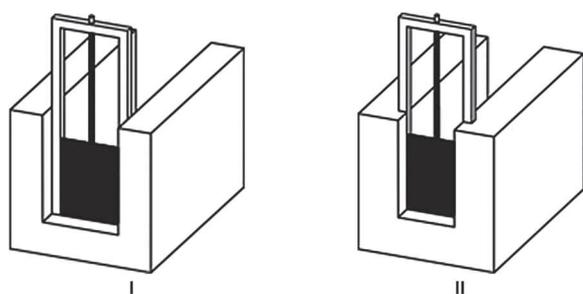


Рисунок 4. Варианты установки щитового затвора:
 (I) тавровое крепление (с помощью анкеров) в канале;
 (II) бетонирование в штробу
 Figure 4. Options for installing the shield gate:
 (I) T-bar attachment (using anchors) in the channel;
 (II) concreting into a straw

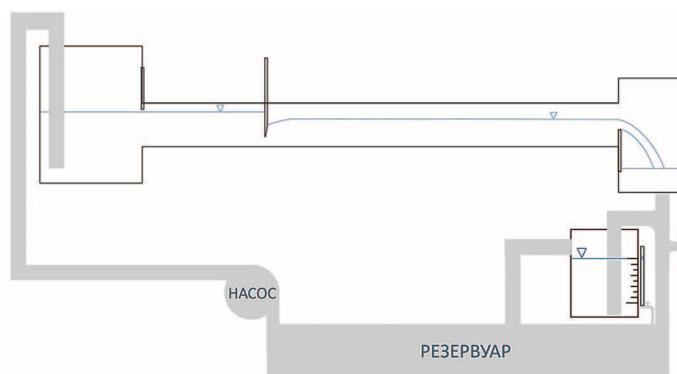


Рисунок 5. Общая схема экспериментальной установки (не в масштабе)
 Figure 5. General scheme of the experimental setup (not in scale)

опоры таким образом, чтобы они не уменьшали ширину пролета затвора — бетонирование в штробу. Ширина канала на выходе составила $b=0,40$ м (рис. 4 (II)).

На рисунке 5 показан схематический вид экспериментальной установки, представляющую собой систему с замкнутым водооборотом и состоящую из питающего бака и насоса, который подает воду по трубопроводу в голову гидравлического лотка, оборудованного в конце плоским затвором. Гидравлический лоток (проточная зона) представляет собой прямоугольный горизонтальный канал с акриловым дном, боковые стенки экспериментальной секции выполнены из прозрачного закаленного стекла толщиной 0,01 м, что обеспечивает боковую визуализацию потока. В боковых частях лотка (протока) имеется механизм фиксации, предназначенный для установки различных видов затворов. В голове лотка имеется система гасителей энергии в виде трех последовательно установленных решеток с отверстиями разных диаметров — 5, 15 и 25 мм. Это позволяет получить на входе в лоток течение, близкое к равномерному однородному турбулентному потоку.

Экспериментальная работа начиналась с определения и проверки продолжительности цикла измерения основных показателей, в котором использовались два варианта щитового затвора (рис. 5). За общее время одного цикла принималось 240 мин, с регистрированием основных показателей каждые 5 мин. Эти экспериментальные условия были выбраны после предварительных прогонов установки и в соответствии с указаниями предыдущих лабораторных работ. По прошествии 20 мин с момента начала испытания, никаких изменений уровня воды зафиксировано не было. Адекватной продолжительностью выполнения одного теста авторами принято считать 240 мин, подчеркнем, что очевидных изменений уровня воды не происходило, следовательно, справедливо утверждать, что поток пришел в локально-равновесное состояние.

Модель шлюзового затвора помещалась в систему замкнутого водооборота гидролаборатории. Регулирование расхода воды в системе осуществлялось с помощью задвижки, установленной на соединительном трубопроводе. Расход измерялся с помощью индукционного расходомера. Изменить условия потока в нижнем бьефе можно было, установив необходимый уровень воды в лотке при заданном расходе. Для этого использовалась механическая задвижка,

установленная на расстоянии 3,20 м ниже затвора. Установка данной задвижки позволила смоделировать глубину в нижнем бьефе, сформированную в результате изменения условий потока, вызванного на практике увеличением сопротивления потоку в канале из-за аккумуляции наносов и роста растительности. После стабилизации уровня воды были измерены глубины верхнего и нижнего бьефов по оси лотка с помощью измерительных игл в виде стандартных электронных штангенциркулей, закрепленных на кронштейнах. Точность составляла 0,1 мм.

Глубины воды в нижнем бьефе были измерены в поперечном сечении, расположенном на 3,035 м удалении от затвора, в то время как глубины воды в верхнем бьефе были измерены на расстоянии 2,0 м перед затвором. Измерение горизонтальных координат каких-либо сечений потока осуществлялось с помощью линейки, проложенной вдоль лотка. Эти данные были использованы для расчета коэффициентов расхода при несвободном истечении из-под затвора, для высоты открытия (поднятия) затвора a в пределах $0,031 \div 0,101$ м. При проведении экспериментов с двумя вариантами установки щитового затвора расход при несвободном истечении был $Q_E(10,7 \div 51,0)$ $\text{дм}^3/\text{с}$.

Эксперимент был начат с расхода, при котором возможно получение необходимого типа сопряжения бьефов: с образованием затопленного гидравлического прыжка. Затем расход был увеличен до значения, при котором глубина воды в верхнем бьефе не превышала уровня боковых стенок лотка $H=0,3$ м.

Первое измеренное поперечное сечение нижнего бьефа было расположено на удалении 0,035 м от затворов. Шаг между последующими сечениями был равен 0,10 м. После превышения расстояния в 1,035 м от затвора, последующие сечения определялись с шагом 0,50 м. Последнее измеренное сечение находится на расстоянии 3,035 м от затвора.

Результаты и обсуждение. Исходя из полученного профиля нижнего бьефа, определенного в случае варианта установки щитового затвора с помощью анкеров в канал, был получен расход воды Q , и процентное отклонение ΔQ измеренного расхода Q от расчетного ($\Delta Q = (Q - Q_r) / Q_r \cdot 100[\%]$) с использованием соотношения (6). Исходя из этого, удалось определить глубину потока в нижнем бьефе за затвором h_d , которая позволила получить расход, равный измеренному, то есть процентное отклонение составило ноль $\Delta Q=0$ (рис. 6).

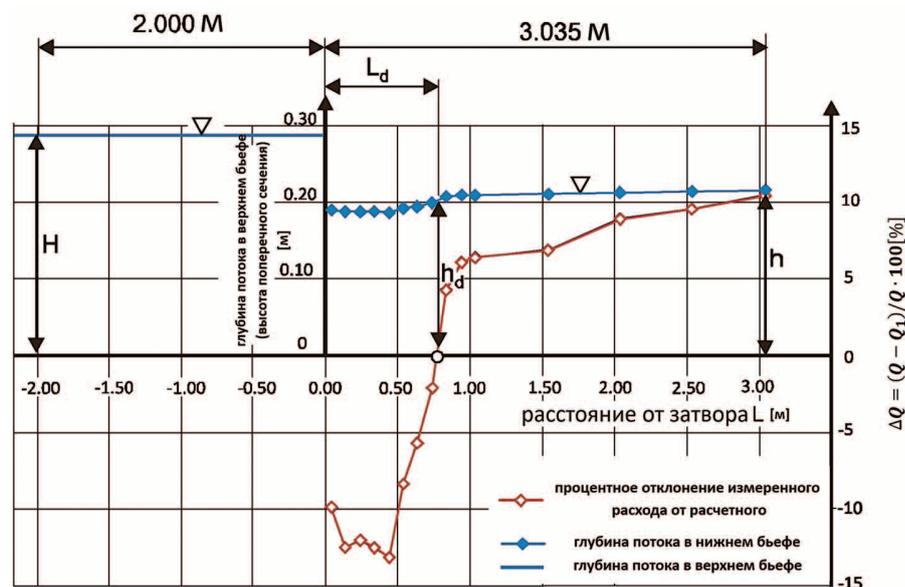


Рисунок 6. Определение поперечного сечения для глубины потока в нижнем бьефе за затвором
 Figure 6. Determination of the cross-section for the flow depth in the downstream behind the gate



Расстояние L_d от затвора до поперечного сечения, в котором измеренная глубина потока в нижнем бьефе за затвором h_d , обеспечивает соответствие между расчетным и наблюдаемым расходами, не зависит от коэффициента шероховатости в канале и увеличивается с высотой отверстия затвора a . Для высоты отверстия $a=0,06$ м глубина h_d должна быть измерена в поперечном сечении, расположенном на расстоянии $L_d \approx 10a$ от затвора. Увеличение отверстия шлюзового затвора до высоты $a=0,08$ м означает, что глубина h_d должна измеряться на расстоянии около $L_d \approx 15a$. Увеличение отверстия затвора до $a=0,10$ м сдвигает искомое поперечное сечение на расстояние $L_d \approx 18a$ (рис. 7).

При отверстиях затвора $a=0,10$ м, $a=0,08$ м и малых соотношениях h/a (для нижнего бьефа), например $h/a=2$ и $h/a=3$, различия между глубиной h_d , используемой для расчета расхода Q_r , и глубиной h , измеренные в конце анализируемого участка, на расстоянии 3,035 м от затвора, невелики; в результате измеренные и рассчитанные расходы равны. Значения коэффициента расхода, рассчитанного на основе измеренного расхода, и расхода, определенного по формуле (6) с использованием измеренной глубины, также равны.

Однако при отверстиях затвора $a=0,06$ м и больших соотношениях h/a различия между глубинами h и h_d заметно увеличиваются.

Например, при высоте отверстия $a=0,06$ м и соотношении $H/a=7,85$ глубина $h_d=0,255$ м должна быть измерена на расстоянии от затвора $L_d=0,65$ м (рис. 7).

Тогда рассчитанное отношение глубины воды к высоте открытия затвора будет равно $h_d/a=4,25$. Если мы возьмем поперечное сечение на постоянном расстоянии от затвора в 3,035 м, которое обеспечивает глубину, равную $h=0,283$ м, значение отношения $h/a=4,72$. Изменение этого соотношения с $h_d/a=4,25$ до $h/a=4,72$ приводит к различным значениям коэффициента расхода, как показано на рисунке 3.

Коэффициент расхода, рассчитанный для глубины в поперечном сечении, в котором измеренный расход соответствует расчетному расходу, определяется по кривой рисунка 3, заданной отношением $h_d/a=4,25 \approx 4,0$, в то время как коэффициент расхода, рассчитанный на основе глубины в нижнем бьефе, измеренной в поперечном сечении, расположенном на постоянном расстоянии от затвора, равном 3,035 м, будут более высокими.

В первом случае (I) направляющие затвора (опорно-ходовая часть) сужали ширину пролета перекрываемого отверстия с 0,40 м до $b=0,34$ м, в то время как в случае (II) направляющие были установлены в лотке таким образом, что они не уменьшали ширину проема, которая составляла $b=0,40$ м. Уменьшенная направляющими ширина отверстия в случае (I) показала эффект, так, при одинаковой высоте отверстия a , расходе Q и глубине h в нижнем бьефе, глубина H в верхнем бьефе увеличивается по отношению к глубине в случае (II). Таким образом, отношение H/a увеличивается, в результате чего значения коэффициента расхода выше, чем в варианте (II) (рис. 8).

Выводы. Проведенные исследования пропускной способности щитовых затворов, применяемых в оросительных системах, позволили сформулировать следующие выводы.

Ввиду невозможности точного определения положения поперечного сечения, в котором следует измерять глубину h_d , уравнение (2) малопригодно для расчета расходов воды на основе глубин, измеренных в нижнем и верхнем бьефах при несвободном истечении из-под затвора с образованием затопленного гидравлического прыжка.

В зависимости от высоты открытия затвора a изменяется положение поперечного сечения в нижнем бьефе, в котором следует измерять глубину h , используемую для расчета коэффициентов расхода C_d .

По результатам данной работы очевидно, что требуются дополнительные исследования по более широкому диапазону a/H и a/b , которые можно использовать в программах, аналогичных TableCurve 3D, в целях получения наиболее подходящего уравнения определения C_d .

Ожидается, что данная работа послужит основой для последующих исследований условий истечения из-под щита и оценки коэффициента расхода при аналогичных гидравлических условиях.

Дальнейшие исследования позволят оптимизировать распределение пресной воды в водохозяйственном комплексе Юга России, что благотворно скажется на экономических и экологических условиях Краснодарского края и России в целом.

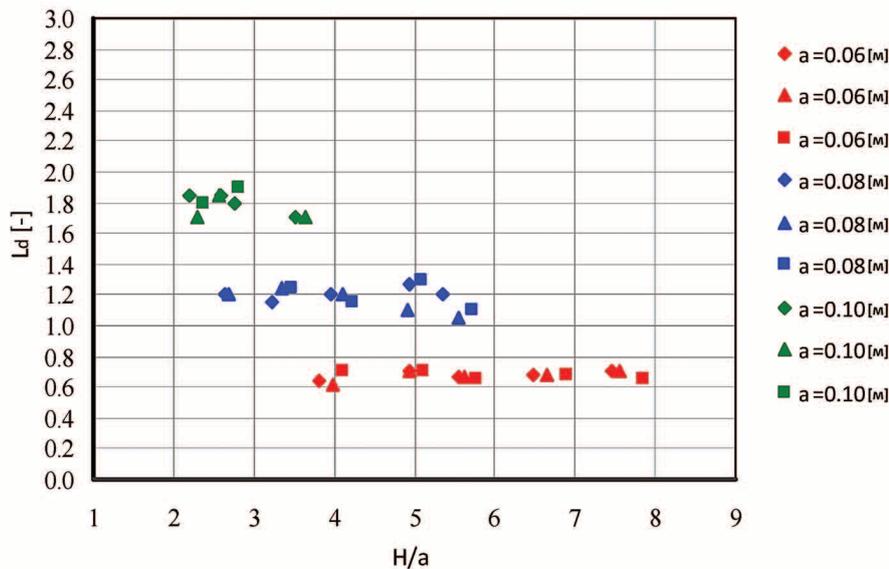


Рисунок 7. Изменения расстояния L_d между затвором и поперечными сечениями, при этом измеренная глубина воды в этих сечениях h_d обеспечивает соответствие между расчетным и наблюдаемым расходами, выраженными в функции H/a

Figure 7. Changes in the distance L_d between the gate and the cross sections, while the measured water depth in these sections h_d provides a correspondence between the calculated and observed flow rates, expressed in the function H/a

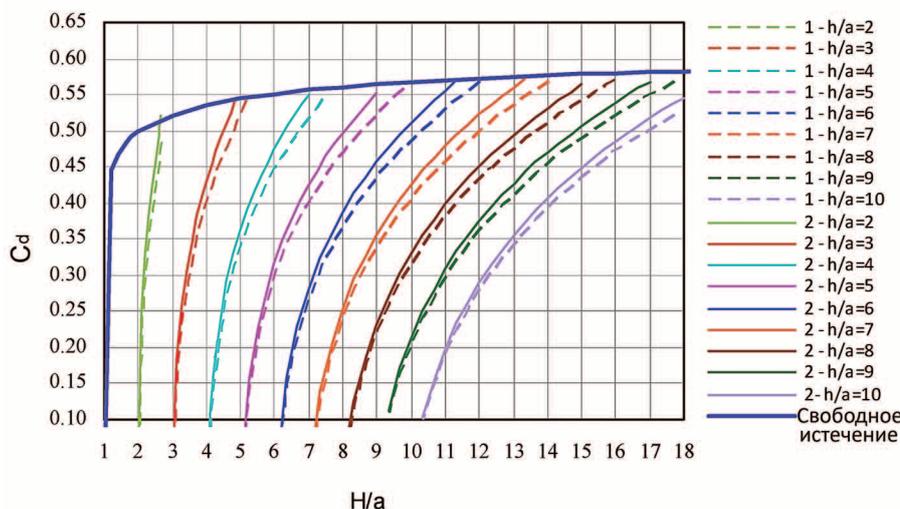


Рисунок 8. Номограмма для расчета коэффициентов расхода C_d , составленная на основе уравнения (5), включая поправку для экспериментов, выполненных для двух тестовых вариантов крепления боковых частей рамы щитового затвора

Figure 8. Is a nomogram for calculating the C_d flow coefficients based on equation (5), including an amendment for experiments performed for two test mounting options for the side parts of the shield gate frame



Список источников

1. Рыскулбеков А.Ж., Абдиманапов Б.Ш., Боранкулова Д.М. Гидротехнические сооружения: состояние, опасность, последствия // Bulletin d'EUROT ALENT-FID JIP. Editions du JIPTO. 2013. Т. 5. С. 69-73.
2. Бандурин М.А., Волосукин В.А., Гумбаров А.Д., Приходько И.А. Мониторинг безопасности водопроводящих сооружений оросительных рисовых систем юга России при возрастающих климатических изменениях. М.: ООО «Русайнс», 2022. 194 с.
3. Bandurina, I.P., Bandurin, M.A., Prikhodko, I.A. (2022). Application of a Software and Hardware Complex to Improve the Operational Reliability of Water Pipelines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10-12, 2022*. Virtual, Online, p. 052075. doi: 10.1088/1755-1315/988/5/052075
4. Bandurin, M.A., Prikhodko, I.A., Bandurina, I.P., Rudenko, A.A. (2022). Analysis of Impact of Urbanization Development on the Deterioration of Ecological State of Rivers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10-12, 2022*. Virtual, Online, p. 042044. doi: 10.1088/1755-1315/988/4/042044
5. Волосукин В.А., Бандурин М.А., Приходько И.А., Евтеева И.Д. Имитационное моделирование устойчивости оградительных дамб реки Псекупс в условиях возрастающих статических и сейсмических воздействий // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 5 (389). С. 459-463. doi: 10.55186/25876740_2022_65_5_459
6. Волосукин В.А., Бандурин М.А., Приходько И.А., Комсюкова Я.А. Эффективность мониторинга технического состояния противопаводковой системы в водохозяйственном комплексе Нижней Кубани в условиях возрастающих статических и сейсмических воздействий // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 6 (390). С. 573-579. doi: 10.55186/25876740_2022_65_6_573
7. Silva, C.O., Rijo, M. (2017). Flow rate measurements under sluice gates. *J. Irrig. Drain. Eng.*, no. 143, p. 06017001.
8. Kiczko, A., Kubrak, J., Kubrak, E. (2015). Experimental and numerical investigation of non-submerged flow under a sluice gate. *Ann. Warsaw Univ. life sci. land advertising.*, no. 47, pp. 187-201.
9. Shayan, H.S., Farhoudi, J., Khezerloo, A.B. (2015). Theoretical and experimental study of flow from sluice gates. *Proc. Inst. civileng. water management*, no. 167, pp. 152-163.
10. Ольгаренко В.И., Юрченко И.Ф., Ольгаренко И.В. Обоснование эффективности планирования технологических процессов водопользования и оперативное управление водораспределением на базе использования метода Монте-Карло // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 1 (29). С. 49-65.
11. Максимов С.А., Корнеев И.В., Данильченко А.Н. и др. Мелиорация сельскохозяйственных земель в Нечерноземной Зоне России. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова, 2022. 134 с. doi: 10.37738/VNIIGIM.2022.18.70.001
12. Сасикова Н.С., Хаджиди А.Е., Кузнецов Е.В., Кравченко Л.В. Разработка компенсационных мероприятий

- для возмещения ущерба водным биологическим ресурсам при отборе воды на орошение // International Agricultural Journal. 2022. Т. 65. № 2. doi: 10.55186/25876740_2022_6_2_22
13. Юрченко И.Ф., Носов А.К. О критериях и методах контроля безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного водохозяйственного комплекса // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сборник научных трудов. 2014. № 53. С. 158-165.
14. Kuznetsov, E., Khadzhi, A., Motornaya, L., Filimonov, M., Kravchenko, L. (2021). Method of restoring water level of small rivers. *E3S Web of Conferences*, no. 273, p. 050072.
15. Waya, R.K., Limbu, S.M., Ngupula, G.W., Mwita, C.J., Mgaya, Y.D. (2017). Temporal patterns in phytoplankton, zooplankton and fish composition, abundance and biomass in Shirati Bay, Lake Victoria Tanzania. *Lakes Reserve. Res. Manag.*, no. 22 (1), pp. 19-42.

References

1. Rykskulbekov, A.Zh., Abdimanapov, B.Sh., Borankulova, D.M. (2013). Gidrotekhnicheskie sooruzheniya: sostoyaniye, opasnost', posledstviya [Hydraulic structures: condition, danger, consequences]. *Bulletin d'EUROT ALENT-FID JIP. Editions du JIPTO*, vol. 5, pp. 69-73.
2. Bandurin, M.A., Volosukhin, V.A., Gumberov, A.D., Prikhod'ko, I.A. (2022). *Monitoring bezopasnosti vodoprovodyashchikh sooruzhenii orositel'nykh risovykh sistem yuga Rossii pri vozrastayushchikh klimaticheskikh izmeneniyakh* [Monitoring of the safety of water supply facilities of irrigation rice systems in the South of Russia with increasing climatic changes]. Moscow, Rusains LLC, 194 p.
3. Bandurina, I.P., Bandurin, M.A., Prikhodko, I.A. (2022). Application of a Software and Hardware Complex to Improve the Operational Reliability of Water Pipelines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10-12, 2022*. Virtual, Online, p. 052075. doi: 10.1088/1755-1315/988/5/052075
4. Bandurin, M.A., Prikhodko, I.A., Bandurina, I.P., Rudenko, A.A. (2022). Analysis of Impact of Urbanization Development on the Deterioration of Ecological State of Rivers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Virtual, Online, January 10-12, 2022*. Virtual, Online, p. 042044. doi: 10.1088/1755-1315/988/4/042044
5. Volosukhin, V.A., Bandurin, M.A., Prikhod'ko, I.A., Evteeva, I.D. (2022). Imitatsionnoe modelirovaniye ustoychivosti ograditel'nykh damb reki Psekups v usloviyakh vozrastayushchikh statcheskikh i seismicheskikh vozdeistvii [Simulation modeling of the stability of the protective dams of the Psekups river in conditions of increasing static and seismic impacts]. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* [International agricultural journal], no. 5 (389), pp. 459-463. doi: 10.55186/25876740_2022_65_5_459
6. Volosukhin, V.A., Bandurin, M.A., Prikhod'ko, I.A., Komsyukova, Ya.A. (2022). Effektivnost' monitoringa tekhnicheskogo sostoyaniya protivopavodkovoi sistemy v vodokhozyaistvennom komplekse nizhnei Kubani v usloviyakh vozrastayushchikh statcheskikh i seismicheskikh vozdeistvii [Effectiveness of monitoring the technical con-

- dition of the flood control system in the water management complex of the Lower Kuban in conditions of increasing static and seismic impacts]. *Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal* [International agricultural journal], no. 6 (390), pp. 573-579. doi: 10.55186/25876740_2022_65_6_573
7. Silva, C.O., Rijo, M. (2017). Flow rate measurements under sluice gates. *J. Irrig. Drain. Eng.*, no. 143, p. 06017001.
8. Kiczko, A., Kubrak, J., Kubrak, E. (2015). Experimental and numerical investigation of non-submerged flow under a sluice gate. *Ann. Warsaw Univ. life sci. land advertising.*, no. 47, pp. 187-201.
9. Shayan, H.S., Farhoudi, J., Khezerloo, A.B. (2015). Theoretical and experimental study of flow from sluice gates. *Proc. Inst. civileng. water management*, no. 167, pp. 152-163.
10. Ol'garenko, V.I., Yurchenko, I.F., Ol'garenko, I.V. (2018). Obosnovaniye effektivnosti planirovaniya tekhnologicheskikh protsessov vodopol'zovaniya i operativnoye upravleniye vodoraspredeleniem na baze ispol'zovaniya metoda Monte-Karlo [Justification of the efficiency of planning technological processes of water use and operational management of water distribution based on the use of the Monte Carlo method]. *Nauchnyi zhurnal Rossiiskogo NII problem melioratsii* [Scientific journal of the Russian Research Institute of Land Reclamation Problems], no. 1 (29), pp. 49-65.
11. Maksimov, S.A., Korneev, I.V., Danil'chenko, A.N. i dr. (2022). *Melioratsiya sel'skokhozyaistvennykh zemel' v Nечерноземной Zone Rossii* [Reclamation of agricultural lands in the Non-Chernozem Zone of Russia]. Moscow, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, 134 p. doi: 10.37738/VNIIGIM.2022.18.70.001
12. Sasikova, N.S., Khadzhi, A.E., Kuznetsov, E.V., Kravchenko, L.V. (2022). Razrabotka kompensatsionnykh meropriyatiy dlya vozmeshcheniya ushcherba vodnym biologicheskim resursam pri otbore vody na orosheniye [Development of compensatory measures to compensate for damage to aquatic biological resources during water withdrawal for irrigation]. *International Agricultural Journal*, vol. 65, no. 2. doi: 10.55186/25876740_2022_6_2_22
13. Yurchenko, I.F., Nosov, A.K. (2014). O kriteriyakh i metodakh kontrolya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii meliorativnogo vodokhozyaistvennogo kompleksa [On the criteria and methods for monitoring the safety of hydraulic structures of the reclamation water management complex]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshayemogo zemledeliya: sbornik nauchnykh trudov* [Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture: collection of scientific papers], no. 53, pp. 158-165.
14. Kuznetsov, E., Khadzhi, A., Motornaya, L., Filimonov, M., Kravchenko, L. (2021). Method of restoring water level of small rivers. *E3S Web of Conferences*, no. 273, p. 050072.
15. Waya, R.K., Limbu, S.M., Ngupula, G.W., Mwita, C.J., Mgaya, Y.D. (2017). Temporal patterns in phytoplankton, zooplankton and fish composition, abundance and biomass in Shirati Bay, Lake Victoria Tanzania. *Lakes Reserve. Res. Manag.*, no. 22 (1), pp. 19-42.

Информация об авторах:

Бандурин Михаил Александрович, доктор технических наук, доцент, Заслуженный изобретатель Российской Федерации, декан факультета гидромелиорации, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0986-8848>, chepura@mail.ru
Приходько Игорь Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства и эксплуатации водохозяйственных объектов, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4855-0434>, prikhodkoigor2012@yandex.ru
Вербицкий Артем Юрьевич, магистрант факультета гидромелиорации, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6930-2662>, artem.verbitsk@yandex.ru

Information about the authors:

Mikhail A. Bandurin, doctor of technical sciences, associate professor, Honored inventor of the Russian Federation, dean of the faculty of hydro-reclamation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0986-8848>, chepura@mail.ru
Igor A. Prikhodko, candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of construction and operation of water facilities, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4855-0434>, prikhodkoigor2012@yandex.ru
Artem Yu. Verbitsky, master student of the faculty of hydro-reclamation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6930-2662>, artem.verbitsk@yandex.ru

