

Пропускная способность промывного тракта водозаборного сооружения для деривационных ГЭС в зимнем режиме эксплуатации

*Д.т.н., профессор Н.П. Лавров;
аспирант А.В. Шпилов*;*

*ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»;
к.т.н., доцент Г.И. Логинов,
ГОУ ВПО «Кыргызско-Российский Славянский университет»*

: водозаборное сооружение; промывной тракт; физическое моделирование; пропускная способность; шуга; зимний водозабор

Сегодня одним из важнейших направлений энергетической политики России является переход от традиционной модели развития единой энергетической системы с преобладанием крупных источников генерации к согласованной работе объектов большой и малой гидроэнергетики в регионах РФ [1]. В рамках указанного направления энергетической политики актуальной задачей является разработка и исследование современных конструкций водозаборных сооружений для малых деривационных ГЭС на горных реках.

В данной статье приведены результаты физического моделирования процессов зимнего режима эксплуатации водозаборного сооружения деривационной ГЭС (ВСДГ), построенного в 2008 г. на реке Иссык-Ата (Киргизская Республика, Чуйская область).

Изучением кинематической структуры горных потоков, в том числе на участках водозабора, занимались исследователи G. Zolezzi, R. Repetto, M. Tubino, V. Nikora, M. Todorov и др. [2–4]. Однако эти исследования затрагивали проблему пропускной способности регулируемых участков речных русел преимущественно в теплое время года.

Исследования пропускной способности промывного тракта ВСДГ, авторами конструкции которого являются Н.П. Лавров и Г.И. Логинов, частично были проведены ранее, и их результаты представлены в монографии [5]. Необходимость дальнейших исследований зимнего режима работы данного сооружения вызвана шуго-ледовыми затруднениями в зиму 2008–2009 гг., повлекшими за собой остановку сооружения и Иссык-Атинской деривационной ГЭС на 14 дней.

Одной из задач исследования было определение пропускной способности элементов промывного тракта ВСДГ как для чистой воды, так и для двухфазного потока (вода+шуга). Большинство работ, посвященных вопросам движения двухфазных потоков, затрагивают вопросы их математического моделирования при напорных течениях [6, 7]. Фрагменты описания движения безнапорного двухфазного потока (вода+шуга) авторам удалось найти лишь в работе [8]. Работ по исследованию зимнего режима водозаборных сооружений на данный момент также крайне мало [9]. Описаний исследования пропускной способности водосливов, являющихся основным препятствием при пропуске двухфазного потока на водозаборных сооружениях в зимний период эксплуатации, авторам обнаружить не удалось.

Рассматриваемые экспериментальные исследования пропускной способности отверстий промывного тракта ВСДГ производилось в 2012 г. на модельной русловой установке Кыргызско-Российского Славянского Университета в масштабе 1:20. Исследуемый промывной тракт ВСДГ представляет собой канал между наносозащитным порогом и речным пролетом, в концевой части которого устроено боковое придонное отверстие зимнего водозабора, а в торцевой части тракта расположен сдвоенный затвор для сброса шуги. Физическое моделирование производилось по критерию гравитационного подобия Фруда с соблюдением автомодельности по критерию Рейнольдса. Подробное описание конструкции ВСДГ приведено в монографии [5], а вид водозаборного сооружения и его модели представлен на рисунке 1.

Гидравлическое моделирование шуги было выполнено с использованием частиц полиэтилена, как материала, близкого по плотности ко льду, по методике, предложенной А.Б. Векслером и З.И. Генкиным [10]. Нормированная подача шуги в речной поток в соответствии с имеющимися данными Г.И. Логинова о концентрации шуги в реке Иссык-Ата осуществлялась с помощью специального дозатора сыпучих фракций [5].

Средний диаметр частиц шуги в натуре принимался по данным Г.И. Логинова равным 1.5 см, что соответствует достаточно развитой форме шуги и при пересчете на модель с выполнением условий кинематического подобия гидравлической крупности дает диаметр 2 мм.



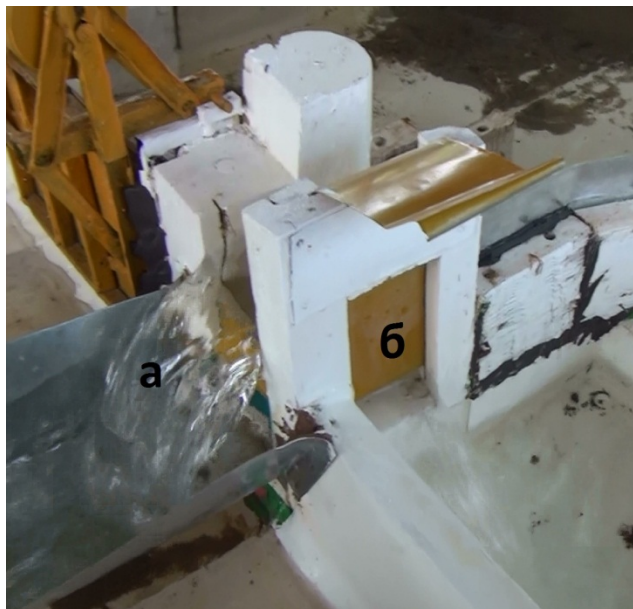
1.

1:20 ()

()

Расходы воды, протекающей из-под полотнища или через гребень затворов, определялись с помощью мерных водосливов Томсона с контролем объемным методом.

В ходе исследования были определены расходные характеристики затвора зимнего водозабора, сдвоенного затвора промывного тракта и промывного тракта в целом, как при пропуске чистой воды, так и для двухфазного потока (вода+шуга). Вид струи при переливе через сдвоенный затвор промывного тракта (а) и вид затвора зимнего водозабора (б) на модели представлены на рисунке 2.



2.

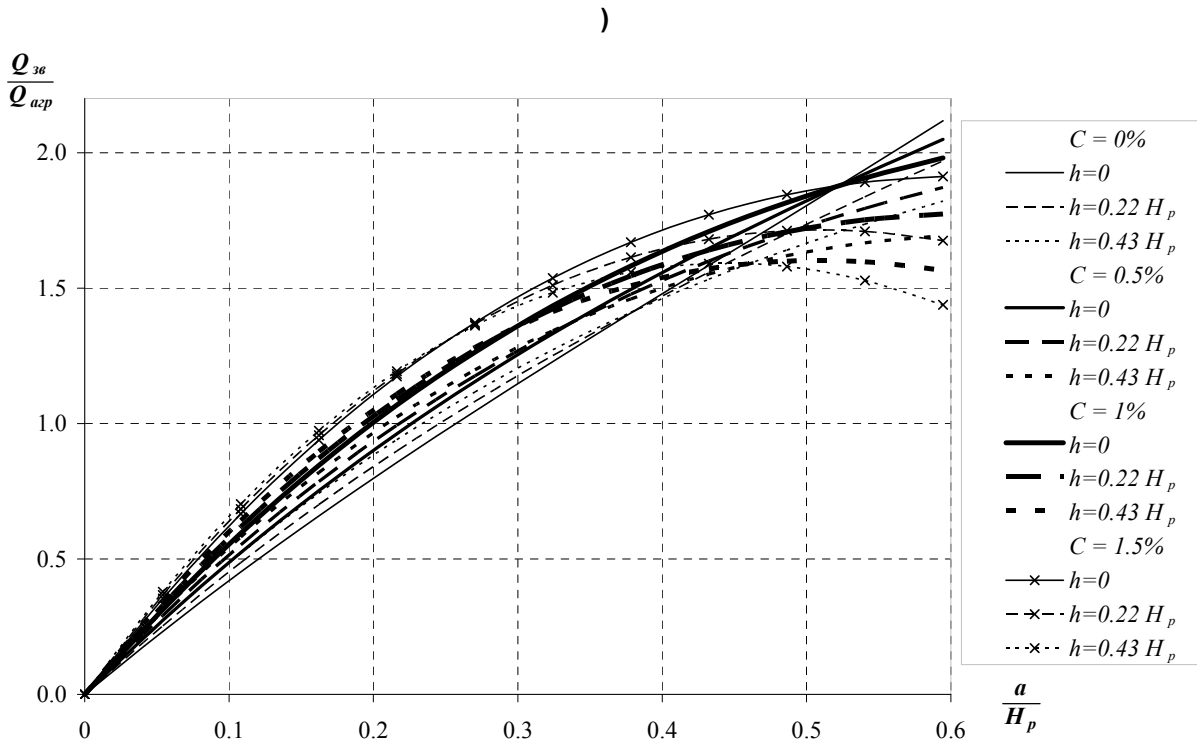
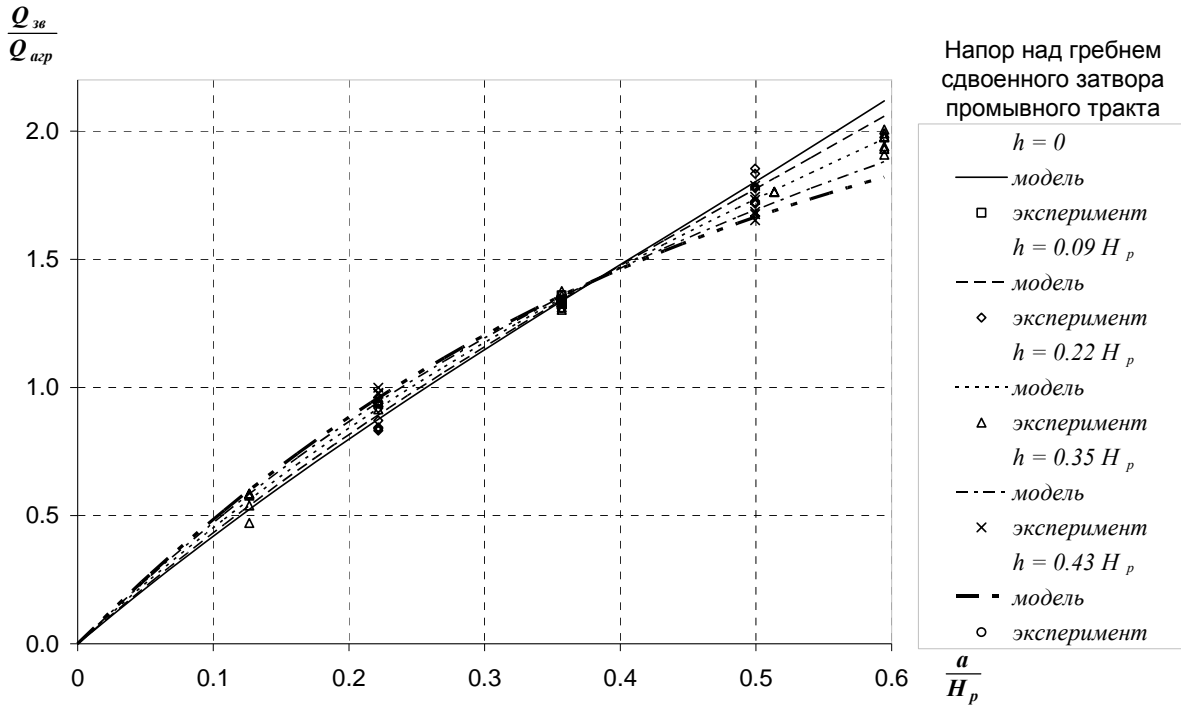
,

-

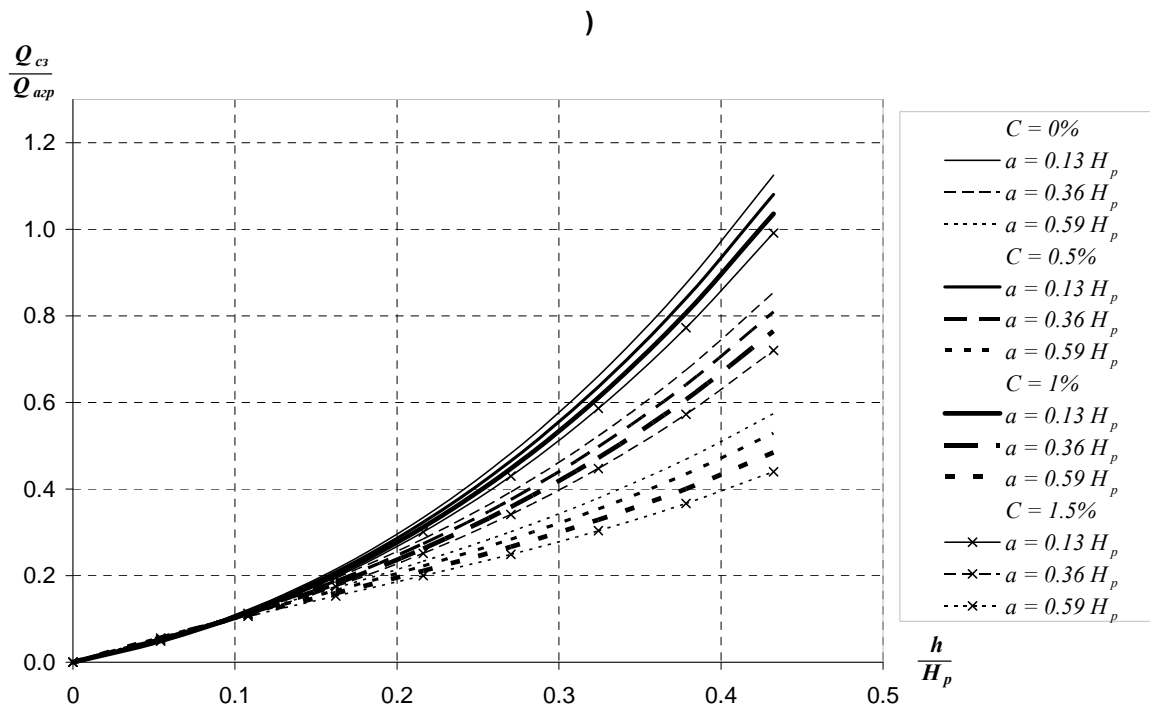
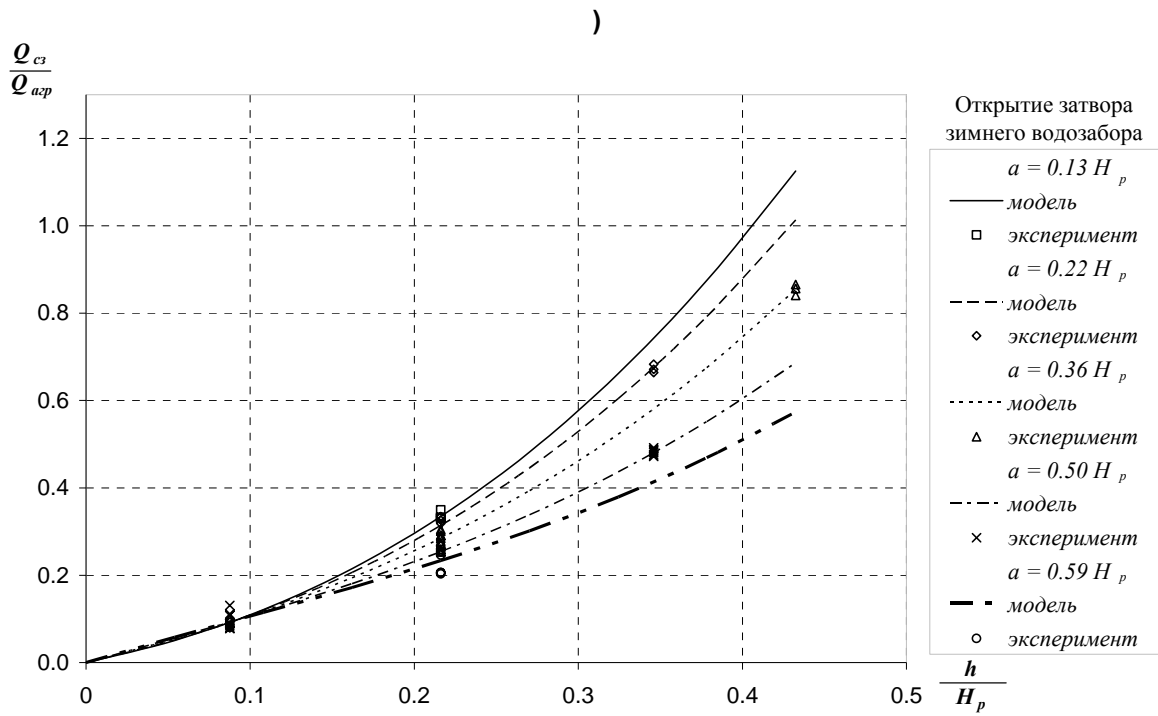
()

,()

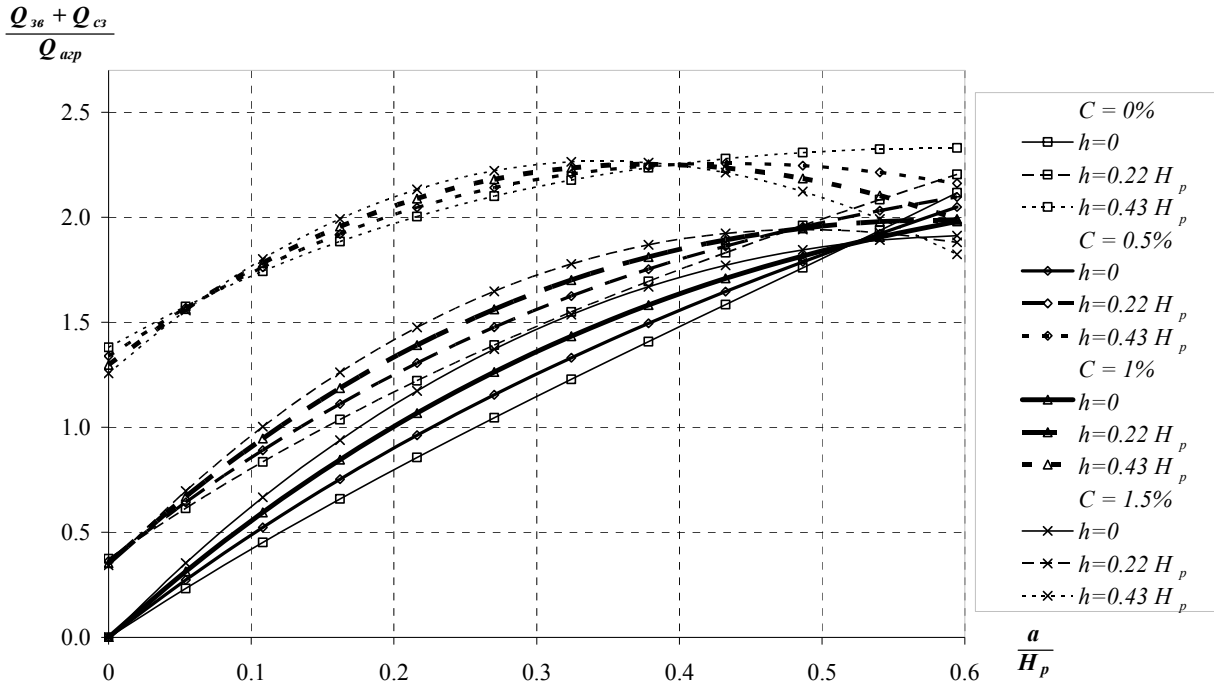
Величины измеренных расходов и результаты их статистической обработки в виде кривых, построенных по данным статистической модели, приведены на рисунках 3, 4 и 5.



3.



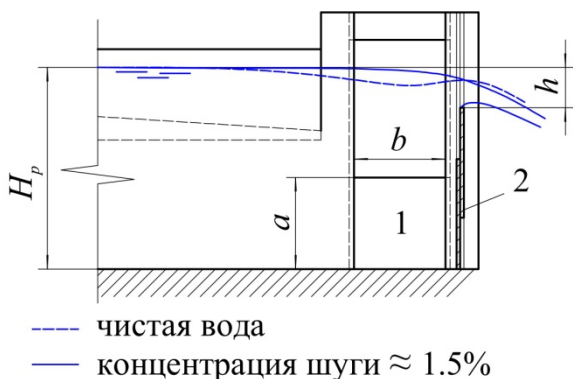
4.



5.

На рисунках 3, 4 и 5 приняты следующие обозначения: $Q_{зв}$ – расход при истечении из-под затвора зимнего водозабора; $Q_{сз}$ – расход при переливе через гребень сдвоенного затвора промывного тракта; $Q_{агр}$ – расход одного гидроагрегата ГЭС ($1.6 \text{ м}^3/\text{с}$); a – открытие затвора зимнего водозабора; h – напор над гребнем сдвоенного затвора промывного тракта; H_p – глубина воды в или расчетный напор в верхнем бьефе ВСДГ (1.85 м); C – объемная концентрация шуги в промывном тракте сооружения.

Ранее многочисленными экспериментальными исследованиями было установлено, что введение в поток твердых частиц приводит к возрастанию потерь напора и коэффициента трения [11, 12]. Здесь мы не учитываем узкие области значений концентраций, в которых наблюдается противоположная картина, связанная с возникновением неньютоновской природы поведения смесей [10]. Следуя данной логике, при увеличении концентрации шуги C должны уменьшаться и расходы через водопропускные отверстия, что подтверждается картиной, приведенной на рисунке 4б. Однако по кривым на рисунке 3б мы наблюдаем обратную картину: несмотря на увеличение концентрации шуги в промывном тракте, расход истечения из-под бокового затвора зимнего водозабора для большего диапазона открытий увеличивается. Для объяснения данного эффекта обратимся к рисунку 6.



6.

: 1 – ; 2 –

Шуга, попадающая в промывной тракт, уменьшает расход при переливе через сдвоенный затвор промывного тракта, что приводит к изменению формы и положения кривой свободной поверхности в промывном тракте и увеличению местной глубины. В результате напор над отверстием зимнего водозабора возрастает, что в свою очередь увеличивает расход при истечении из-под этого затвора.

На рисунке 5 представлена расходная характеристика промывного тракта в целом, из которой видно, что присутствие шуги в потоке не оказывает значительного влияния на пропускную способность промывного тракта.

Для сопоставления наших экспериментальных данных с данными М.К.Торопова, приведенными в работах [5, 13, 14], были вычислены коэффициенты расхода при истечении из-под затвора зимнего водозабора и при переливе через сдвоенный затвор промывного тракта. Для затвора зимнего водозабора вычисление коэффициента расхода производилось по следующей известной формуле [15, 16]:

$$\mu_{зв} = \frac{Q_{зв}}{ab\sqrt{2g(H_p - \varepsilon a)}}, \quad (1)$$

где $\mu_{зв}$ – коэффициент расхода при истечении из-под затвора зимнего водозабора; $Q_{зв}$ – расход при истечении из-под затвора зимнего водозабора; a – открытие затвора зимнего водозабора; b – ширина отверстия зимнего водозабора (1 м); g – ускорение свободного падения; H_p – расчетный напор в верхнем бьефе сооружения; ε – коэффициент вертикального сжатия, принимаемый нами приближенно из таблицы 5.5 справочника [16].

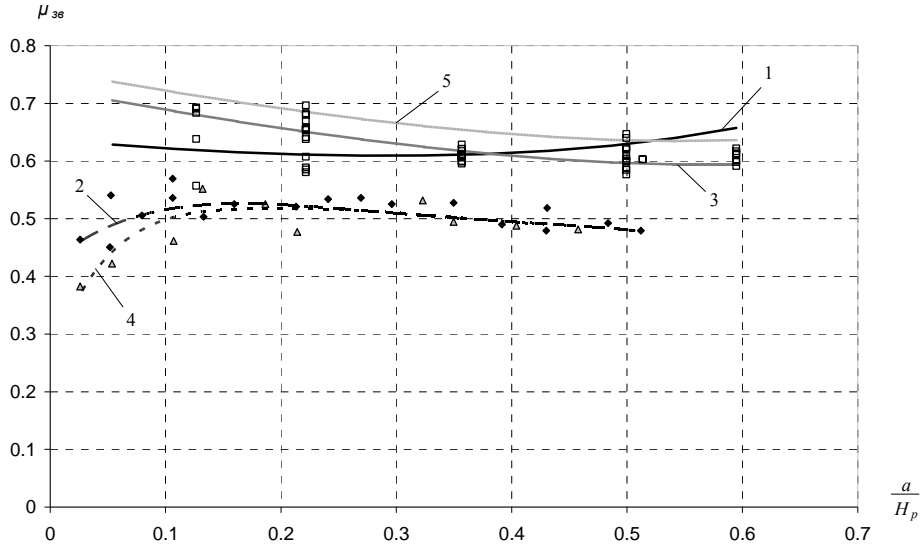
Для неподтопленного истечения через гребень сдвоенного затвора коэффициент расхода определяется по формуле водослива [15, 16]:

$$m = \frac{Q_{сз}}{b\sqrt{2gh_0^{\frac{3}{2}}}} = \frac{Q_{сз}}{b\sqrt{2g\left(h + \frac{\alpha v^2}{2g}\right)^{\frac{3}{2}}}}, \quad (2)$$

где m – коэффициент расхода сдвоенного затвора промывного тракта; $Q_{сз}$ – расход при переливе через сдвоенный затвор промывного тракта; b – ширина промывного тракта (1 м); g – ускорение свободного падения; h – напор над гребнем сдвоенного затвора промывного тракта; α – коэффициент кинетической энергии; v – скорость подхода к сдвоенному затвору промывного тракта.

Кривые, характеризующие величины полученных коэффициентов, представлены на рисунках 7 и 8.

Из рисунка 8 видно, что значения коэффициента расхода $\mu_{зв}$, полученные авторами больше значений, приведенных в работе [5]. В то же время среднее значение коэффициента расхода, полученное авторами, хорошо согласуется со значениями, рекомендованными Н.Н. Павловским для больших отверстий без сжатия по дну, но со значительным влиянием бокового сжатия $\mu = 0.65 \div 0.7$ [16].



7.

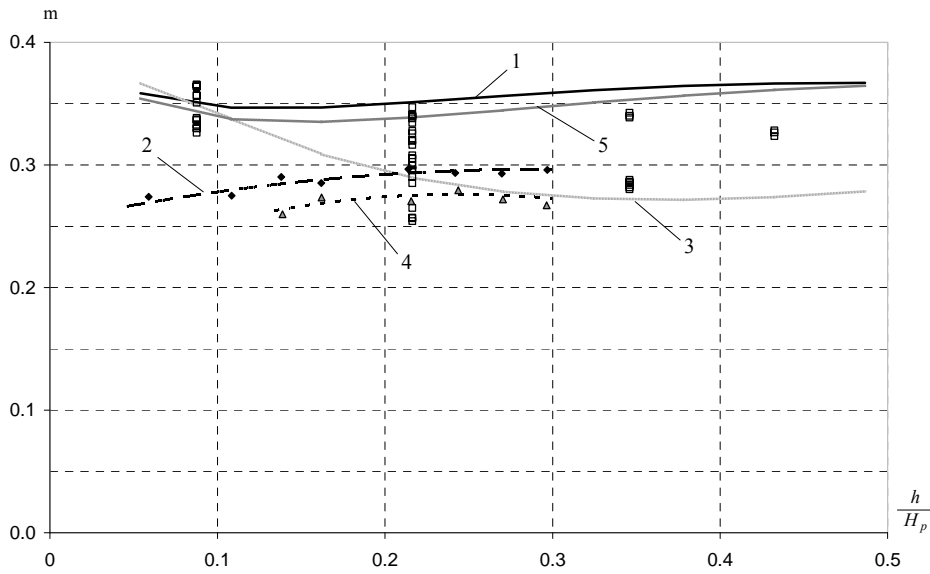
1 -

2 -

5 -

($h=0.3 H_p$); 4 -

$C = 0,5\%$



8.

1 -

..

4 -

; 3 -

..

; 5 -

; 2 -

($a=0.55 H_p$);

$C=1.5\%$

Сопоставление данных М.К. Торопова [5, 14] с данными, полученными авторами, представлено на рисунке 8. Из сопоставления видно, что значения коэффициентов расхода, полученные авторами, выше значений, представленных в работе [5]. Данное обстоятельство может быть связано с разными масштабами моделей, т. к. в [5] также указывается, что при моделировании на модели в масштабе 1:25 наблюдались несколько большие коэффициенты расхода, чем при моделировании на модели в масштабе 1:10. Однако значения, полученные авторами при отсутствии влияния водоприемного отверстия зимнего водозабора, лучше согласуются со значениями коэффициентов $m = 0.32 \div 0.4$, которые можно получить по эмпирическим формулам, приведенным в работе [16].

На рисунке 8 также следует обратить внимание на область $h < 0.1 H_p$, т. к. здесь значения коэффициентов расхода, полученные авторами, несколько завышены, что может быть объяснено возникновением эффекта прилипания струи. Однако на остальных промежутках полученные значения коэффициентов расхода $\mu_{зв}$ и m (рис. 7 и 8) с учетом вышеизложенных доводов представляются вполне достоверными.

Для полноты представления процессов истечения в промывном тракте имеет смысл представить закономерности этих процессов в виде соответствующих гиперповерхностей. Например, уравнения, описывающие гиперповерхности изменения относительного расхода при переливе через сдвоенный затвор промывного тракта ВСДГ и относительного расхода истечения из-под затвора зимнего водозабора соответственно, имеют вид (4) и (5):

$$\frac{Q_{сз}}{Q_{арп}} = h_{ОТН.} [c_1 + h_{ОТН.} (c_2 + c_3 C + c_4 h_{ОТН.}) + a_{ОТН.} (c_5 + c_6 h_{ОТН.})], \quad (4)$$

$$\frac{Q_{зв}}{Q_{арп}} = a_{ОТН.} [c_1 + a_{ОТН.} (c_2 + c_3 a_{ОТН.} + c_4 C + c_5 h_{ОТН.}) + C (c_6 + c_7 h_{ОТН.}) + c_8 h_{ОТН.}], \quad (5)$$

где $\frac{Q_{сз}}{Q_{арп}}$ – отношение расхода при переливе через сдвоенный затвор промывного тракта к

расходу одного гидроагрегата ГЭС; $\frac{Q_{зв}}{Q_{арп}}$ – отношение расхода при истечении из-под затвора

зимнего водозабора к расходу одного гидроагрегата ГЭС; $a_{ОТН.} = \frac{a}{H_p}$ – отношение величины

открытия затвора зимнего водозабора к расчетному напору; $h_{ОТН.} = \frac{h}{H_p}$ – отношение напора

над гребнем сдвоенного затвора промывного тракта к расчетному напору; C – концентрация шуги в промывном тракте, %; $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8$ – коэффициенты влияния.

Значение концентрации шуги в промывном тракте определялось согласно следующей формуле:

$$C = \frac{Q_{ш.зв} + Q_{ш.сз}}{Q_{зв} + Q_{сз}} 100\%, \quad (6)$$

где C – концентрация шуги в промывном тракте, %; $Q_{ш.зв}$ и $Q_{ш.сз}$ – расходы шуги, попавшей под затвор сдвоенного водозабора и прошедшей через гребень сдвоенного затвора промывного тракта соответственно; $Q_{зв}$ и $Q_{сз}$ – расход двухфазного потока при истечении из-под затвора зимнего водозабора и переливе через гребень сдвоенного затвора промывного тракта соответственно.

Значения коэффициентов влияния в формулах (4) и (5) представлены в таблицах 1 и 2.

Коэффициенты влияния определялись методом наименьших квадратов [17–20].

Таблица 1. Значение коэффициентов влияния в формуле (4)

c_1	0.68	± 0.124
c_2	3.97	± 0.697
c_3	-0.48	± 0.083
c_4	2.95	± 0.979
c_5	0.72	± 0.248
c_6	-7.97	± 0.936

Таблица 2. Значение коэффициентов влияния в формуле (5)

c_1	4.44	± 0.187
c_2	-2.66	± 0.792
c_3	1.97	± 0.903
c_4	-3.19	± 1.212
c_5	-5.41	± 1.391
c_6	1.67	± 0.600
c_7	-0.46	± 0.236
c_8	2.06	± 0.595

Статистические модели были выбраны согласно минимуму критерия Х. Акаике [20] из полиномов до третьей степени включительно, а затем были проверены на значимость по критерию Фишера.

Проверка моделей по критерию Фишера не дает оснований сомневаться в адекватности полученных моделей [17]. Проверка остатков по критерию Колмогорова–Смирнова показывает, что их распределение близко к нормальному.

Выводы

1. Показано, что величины коэффициентов расхода, полученные по результатам экспериментов для чистой воды при отсутствии взаимного влияния истечения водоприемного отверстия зимнего водозабора и перелива через гребень сдвоенного затвора промывного тракта, хорошо согласуются с их теоретическими и экспериментальными значениями, приведенными в работах [15, 16]. Данное обстоятельство дает основание полагать, что значения полученных коэффициентов расхода достоверны и при прочих описанных здесь условиях истечения.

2. Выявлено, что величина концентрации шуги в потоке незначительно влияет на пропускную способность промывного тракта в целом, что связано с различным влиянием значения концентрации шуги в промывном тракте ВСДГ на расходные характеристики затвора зимнего водозабора и сдвоенного затвора промывного тракта.

3. Получены уравнения (4, 5), описывающие расходные характеристики сдвоенного затвора промывного тракта и затвора зимнего водозабора в виде гиперповерхности с учетом концентрации шуги в потоке.

4. На данном этапе исследований можно сделать вывод о том, что нормальная эксплуатация шугосброса над сдвоенным затвором промывного тракта возможна при напорах, превышающих величину $0.2H$, где H – глубина потока в верхнем бьефе ВСДГ. Пропускная способность ВСДГ с учетом транспорта шуги будет описана в последующих работах.

Лавров Н.П., Шпилов А.В., Логинов Г.И. Пропускная способность промывного тракта водозаборного сооружения для деривационных ГЭС в зимнем режиме эксплуатации

5. Полученные экспериментальные результаты будут учтены при разработке инструкций по эксплуатации водозаборных сооружений типа ВСДГ, построенных на реке Иссык-Ата (Киргизия) и реке Мерке (Казахстан), а также при проектировании новых водозаборных сооружений на горных реках [21, 22].

1. Грачев И.Д. Итоги Второй Всероссийской конференции «Развитие малой распределительной энергетики в России» // Турбины и дизели. 2012. №6. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/2589>
2. Zolezzi G., Seminara G. Downstream and upstream influence in river meandering // Journal of Fluid Mechanics. 2001. No.438. Pp.183–211.
3. Nikora V. Double-averaging concept for rough-bed open channel and overland flows: Applications // Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. 2007. No.133(8). Pp. 884–895.
4. Zolezzi G., Repetto R., Tubino M., Toropov M. Mathematical modeling of silting in Kugart river, Kyrgyzstan // RCEM. London, 2008. Pp. 1179–1186.
5. Гидротехнические сооружения для малой энергетики горно-предгорной зоны: монография / Под ред. Н.П. Лаврова. Бишкек: Салам, 2009. 504 с.
6. Drew D.A. Mathematical modeling of two-phase flow // Annual Review of Fluid Mechanics. 1983. Vol. 15. Pp. 261–291
7. Stewart B., Wendroff B. Two-phase flow: Models and methods // Journal of Computational Physics. 1984. Vol. 56. Issue 3. Pp. 363–409.
8. Естифеев А.М. Регулирование шугового потока на гидроэлектростанциях. Л.: Госэнергоиздат, 1958. 180 с.
9. Трегуб Г.А., Шаталина И.Н., Павич М.П., Ковалевский С. И., Бакановичус Н. С., Косарев А. А. Способы борьбы с нефтяными примесями и шугой на русловых водозаборах // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2005. Т. 245. С. 220–228.
10. Векслер А.Б., Генкин З.А., Васильева И.М. Условия гидравлического моделирования шуги при ледотермических исследованиях гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1988. Т. 205. С. 12–15
11. Соу С.Л. Гидродинамика многофазных систем. Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 536 с.
12. Brennen C.E. Fundamentals of Multiphases Flows. Pasadena: Cambridge University Press, 2005. 410 p.
13. Лавров Н.П., Логинов Г.И., Торопов М.И. Водозаборное сооружение для деривационной ГЭС на р. Иссык-Ата // Гидротехническое строительство. 2008. № 12. С. 5–9.
14. Торопов М.К. Плотинное водозаборное сооружение из горных рек для малых деривационных ГЭС: Аврореф. дисс. канд. техн. наук. Бишкек: КАУ им. К.И.Скрябина, 2008. 24 с.
15. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 545 с.
16. Справочник по гидравлическим расчетам. Под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1974. 313 с.
17. Норман Н.Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2007. 912 с.
18. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумян Д.К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012. 308 с.
19. Wells D.E., Krakiwsky E.J. The method of least squares: Lecture notes. Department of Survey Engineering: University of New Brunswick. 1978. Vol. 18. 180 p.
20. Akaike H. A new look at the statistical model identification // IEEE transaction on automatic control. 1974. Vol. AC-19. No.6. Pp.716–722.
21. Лавров Н.П., Логинов Г.И., Шипилов А.В. Новые типы водозаборных сооружений для малых ГЭС // Гидротехника XXI век. 2012. №1(8). С. 51–53.
22. Лавров Н.П., Логинов Г.И., Борисенко Д.А., Шипилов А.В. Водозаборный гидроузел для деривационной ГЭС на реке Мерке // Гидротехническое строительство. 2012. №10. С. 37–40.

**Александр Владимирович Шипилов, Санкт-Петербург, Россия
Тел. моб.: +7(921)388-44-27; эл. почта: a.shipilov@yahoo.com*

© Лавров Н.П., Шипилов А.В., Логинов Г.И., 2013

Лавров Н.П., Шипилов А.В., Логинов Г.И. Пропускная способность промывного тракта водозаборного сооружения для деривационных ГЭС в зимнем режиме эксплуатации

doi: 10.5862/MCE.39.7

Discharge capacity of sluiceway channel of water intake structure for diversion power plant in winter

N.P. Lavrov;

A.V. Shipilov,

Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia

G.I. Loginov,

Kyrgyz-Russian Slavic University, Bishkek, Kyrgyzstan

Saratov State Technical University of Yuri Gagarin, Saratov, Russia

+7(921)388-44-27; e-mail: a.shipilov@yahoo.com

Key words

water intake structure; sluiceway channel; physical modeling; brash ice; winter water withdrawal

Abstract

The paper presents results of research hydraulic processes at the intake structures of diversion power plants in winter.

On the basis of the physical modeling results the flow characteristics of sluiceway channel of water intake on the river Issyk-Ata, Kyrgyzstan were determined. Statistical models of discharges of elements of sluiceway channel with their mutual influence were obtained, using the methods of experimental design and data analysis. The influence of the concentration of brash ice on the sluiceway channel and its elements is described.

The comparison of experimental data with data obtained by other authors before is made by comparing flow coefficients. Recommendations for normal operation of ice pass at sluiceway track channel of water intake structure for diversion power plant are given.

References

1. Grachev I.D. *Turbiny i dizeli*. 2012. No.6. [Online resource]. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/2589> (rus)
2. Zolezzi G., Seminara G. Downstream and upstream influence in river meandering. *Journal of Fluid Mechanics*. 2001. No.438. Pp.183–211.
3. Nikora V. Double-averaging concept for rough-bed open channel and overland flows: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*. 2007. No.133(8). Pp. 884–895.
4. Zolezzi G., Repetto R., Tubino M., Toropov M. Mathematical modeling of silting in Kugart river, Kyrgyzstan. *RCEM*. London, 2008. Pp. 1179–1186.
5. *Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya dlya maloy energetiki gorno-predgornoy zony* [Hydraulic facilities for alternative power engineering of mountain-foothill terrain] Edited by N.P. Lavrova. Bishkek.: Salam, 2009. 504 p. (rus)
6. Drew D.A. Mathematical modeling of two-phase flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1983. Vol. 15. Pp. 261–291.
7. Stewart B., Wendroff B. Two-phase flow: Models and methods. *Journal of Computational Physics*. 1984. Vol. 56. Issue 3. Pp. 363–409.
8. Estifeyev A.M. *Regulirovaniye shugovogo potoka na gidroelektrostantsiyakh* [Frazil flow regulation by hydro power plants]. Leningrad: Gosenergoizdat, 1958. 180 p. (rus)
9. Tregub G.A., Shatalina I.N., Pavchich M.P., Kovalevskiy S.I., Bakanovichus N.S., Kosarev A.A. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneyeva*. 2005. Vol.245. Pp. 220–228 (rus)
10. Veksler A.B., Genkin Z.A., Vasilyeva I.M. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneyeva*. 1988. Vol. 205. Pp. 12–15 (rus)
11. Sou S.L. *Gidrodinamika mnogofaznykh system* [Hydrodynamics of multiphase systems. Translation from English]. Moscow: Mir, 1971. 536 p. (rus)
12. Brennen C.E. *Fundamentals of Multiphases Flows*. Calif. Inst. Of Tech.: Cambridge University Press, 2005. 410 p.

Lavrov N.P., Shipilov A.V., Loginov G.I. Discharge capacity of sluiceway channel of water intake structure for diversion power plant in winter

13. Lavrov N.P., Loginov G.I., Toropov M.I. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2008. No.12. Pp. 5–9 (rus)
14. Toropov M.K. *Plotinnoye vodozabornoye sooruzheniye iz gornyykh rek dlya malykh derivatsionnykh GES* [Dam's intake structures for mountain rivers for alternative diversion power plants. Abstract of a PhD thesis]. Bishkek: KAU im. K.I.Skryabina, 2008. 24 p. (rus)
15. Girgidov A.D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika): uchebnik dlya vuzov* [Fluid mechanics (Hydraulics): tutorial for high schools]. Third edition, revised and enlarged. SPb: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 545 p. (rus)
16. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Reference for hydraulics calculation]. Edited by P.G. Kiseleva. Moscow: Energiya, 1974. 313 p. (rus)
17. Normam N.R., Smit G. *Prikladnoy regressionnyy analiz* [Applied regression analysis, Translation from English]. Moscow: Izdatelskiy dom «Vilyams», 2007. 912 p. (rus)
18. Kryanev A. V., Lukin G. V., Udumyan D. K. *Metricheskiy analiz i obrabotka dannykh* [Metrical analysis and data processing]. Moscow: Fizmatlit, 2012. 308 p. (rus)
19. Wells D.E., Krakiwsky E.J. *The method of least squares: Lecture notes*. Department of Survey Engineering: University of New Brunswick. 1978. Vol. 18. 180 p.
20. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE transaction on automatic control*. 1974. Vol. AC-19. No.6. Pp. 716–722.
21. Lavrov N.P., Loginov G.I., Shipilov A.V. *Hydraulic Engineering. The XXI-st century*. 2012. No.1(8). Pp.51–53. (rus)
22. Lavrov N.P., Loginov G.I., Borisenko D.A., Shipilov A.V. *Power Technology and Engineering*. 2012. No.10. Pp. 37–40. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 60–69