

**05.23.07 Гидротехническое строительство**

Оригинальная статья

УДК 502/504:626.823:532.5

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-60-64

**ФОРМУЛА РАСХОДА ВОДЫ ЧЕРЕЗ ПЛОСКИЙ  
ЩИТОВОЙ ЗАТВОР В ОТКРЫТОМ РУСЛЕ**

**КУШЕР АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник  
econgamk1@gmail.com

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова; 125550, г. Москва,  
ул. Б. Академическая, 44, стр. 2, Россия

*Цель исследований – анализ влияния кинематической структуры подводящего потока на точность измерения расхода воды через плоский щитовой затвор в открытом русле. Для моделирования и анализа потока через щитовой затвор использован разработанный автором программно-вычислительный комплекс DisCo4, основанный на численном решении системы уравнений движения (RANS) и неразрывности методом конечных объемов в трехмерной постановке. По результатам моделирования определено, что установка щитового затвора на тонкой поперечной перегородке русла позволяет существенно уменьшить влияние шероховатости дна подводящего русла на расход воды через затвор. Предложена аналитическая формула расходной зависимости для рассмотренной конструкции с разбросом вычисленных расходов независимо от шероховатости русла в диапазоне отношений высоты отверстия к глубине относительно нижнего края отверстия  $H_g/H < 0.3$  не более 3%.*

**Ключевые слова:** гидрометрическое сооружение, расход воды, расходная характеристика, расчет расходной характеристики, щитовой затвор

**Формат цитирования:** Кушер А.М. Формула расхода воды через плоский щитовой затвор в открытом русле // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 60-64. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-60-64.

© Кушер А.М., 2022

Original article

**FORMULA OF WATER FLOW THROUGH  
THE FLAT SLUICE GATE IN THE OPEN CHANNEL**

**KUSHER ANATOLIY MIKHAILOVICH**, candidate of technical sciences, leading researcher  
econgamk1@gmail.com

All-Russian Research Institute for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Moscow,  
B. Academicheskaya, 44, bld 2, Russia

*The purpose of the research is to analyze the influence of the flow kinematic structure on the measuring accuracy of the water flow through the flat sluice gate in the open channel. For the simulation and analysis of the flow through the sluice gate, the DisCo4 software-computer complex developed by the author was used based on the numerical solution of the system of equations (RANS) and continuity by the finite volume method in the three-dimensional formulation. It was found that installation of the sluice gate on the thin transverse wall can significantly reduce the effect of the channel bottom roughness on the water flow through the gate. The analytical formula for discharge through the flat sluice gate of the considered structure is proposed. Regardless of the channel roughness, the scatter of calculated discharges in the range of ratios of the height of the hole to the depth relative to the lower edge of the hole  $H_g/H < 0.3$  is no more than 3%.*

**Keywords:** hydrometric structure, water flow, water flow rate, calculation of discharge characteristic, sluice gate

**Format of citation:** Kusher A.M. Formula of water flow through the flat sluice gate in the open channel // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – No. 3. – P. 60-64. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-3-60-64.

**Введение.** Как показали экспериментальные и теоретические исследования, гидрометрические характеристики щитового затвора в безнапорном канале с плоским дном зависят от большого числа гидравлических параметров подводящего потока. Теоретической основой большинства исследований потока через щитовой затвор является уравнение Бернулли [1]. В работах N. Rajaratnam'a, A. Roth'a и W.H. Hager'a приведены результаты экспериментальных исследований, в том числе касающиеся влияния высоты отверстия под вертикальным и наклонным щитом на коэффициент вертикального сжатия, скорость и расход в прямоугольном канале с плоским дном [2, 3].

H.D. Cheng, J.A. Liggett and P.L.-F. Liu для расчета потока щитовой затвор и быстроек использовали метод граничных интегральных уравнений (BEM), основанный на решении линейных дифференциальных уравнений, сформулированных в интегральной форме [4]. В работе G. Belaud, L. Cassan, J.-P. Vaume исследовано влияние давления перед стенкой затвора на коэффициенты вертикального сжатия и расхода воды через сооружение [5].

В теоретических исследованиях коэффициент вертикального сжатия струи на выходе затвора  $\varepsilon$  изменяется в диапазоне  $\varepsilon = 0.590...0.611$ ; в экспериментальных исследованиях  $\varepsilon = 0.580...0.630$ . Это приводит к 10%-ному разбросу значений коэффициента расхода [6]. Численное моделирование потока через щитовой затвор в безнапорном канале с плоским дном при эквивалентной шероховатости русла  $k = 0.0025$  и  $k = 0.03$  показало зависимость расхода воды от шероховатости дна русла [7]. Предельное различие значений расхода имеет место при малых соотношениях  $H_g/h$  ( $H_g$  – высота отверстия под щитовым затвором,  $h$  – глубина ВБ).

В работе представлены результаты анализа кинематической структуры потока по данным численного моделирования потока через щитовой затвор и предложена аналитическая формула расхода воды для предложенной конструкции затвора.

**Материалы и методы.** Для численного моделирования потока через щитовой затвор использован разработанный автором специализированный программно-вычислительный комплекс DisCo4 для расчета гидрометрических конструкций, основанный на численном решении системы уравнений движения (RANS)

и неразрывности методом конечных объемов в трехмерной постановке [8].

Проверка достоверности результатов вычислений в режиме расчета щитового затвора выполнена сравнением с результатами расчета по данным В. Ведерникова для коэффициентов вертикального сжатия  $\varepsilon$  [9]. Краевые условия: на входе подводящего канала в первом цикле – гидростатическое давление; во втором – средняя скорость; на выходе – режим свободного истечения в атмосферу. Моделью турбулентности является  $k$ - $\varepsilon$ -модель. Для ускорения вычислительного процесса включен режим сглаживания свободной поверхности потока в ВБ, что аналогично применению успокоительных бонов для выравнивания свободной поверхности в реальных условиях. Векторные графики полей скорости вычислены с применением многоплатформенного приложения Gnuplot. Параметры модели: ширина подводящего и отводящего канала  $B = 0.5$  м; высота отверстия под щитовым затвором  $H_g = 0.05...0.4$  м. Шероховатость стенок русла принята равной  $n = 0.014; 0.019; 0.021$  (бетон затертый – бетон грубый). Отсюда согласно формуле G. Garbrecht'a

$$k = (8.41 \cdot n \cdot g^{0.5})^6; \quad (1)$$

высота выступов эквивалентной шероховатости  $k = \sim 0.0025...0.03$  (м) [10].

**Результаты и их обсуждение.** Расход воды через щитовой затвор в открытом канале с плоским дном зависит от профиля скорости в подводящем канале, определяемого шероховатостью стенок русла. При равной глубине верхнего бьефа расход воды через отверстие под щитом в канале с гладким дном больше, чем в шероховатом русле. На рисунках 1, 2 представлены поля скоростей при донной шероховатости  $k = 0.0025$  и  $k = 0.015$ . Значения скорости в отверстии под щитовым затвором в открытом канале с плоским дном зависят от профиля скорости в подводящем канале.

При практически равных скоростях потока в верхней части отверстия непосредственно перед щитом и под ним продольная скорость в придонной области выше в канале с более гладким дном, вследствие чего возникает различие расходов, особенно существенное при малой высоте отверстия под затвором. Например, при соотношении  $H_g/H = 0.25/0.6 = 0.4$  ( $H_g$  – высота отверстия под щитом,  $H$  – глубина ВБ) величина расхода

через щитовой затвор в канале с шероховатостью дна  $k = 0.0025$  на 7.9% больше, чем в канале с шероховатостью  $k = 0.03$ . На рисунке 3 показан пример расходной кривой в канале с плоским дном при высоте отверстия под щитом  $H_g = 0.1$  м.

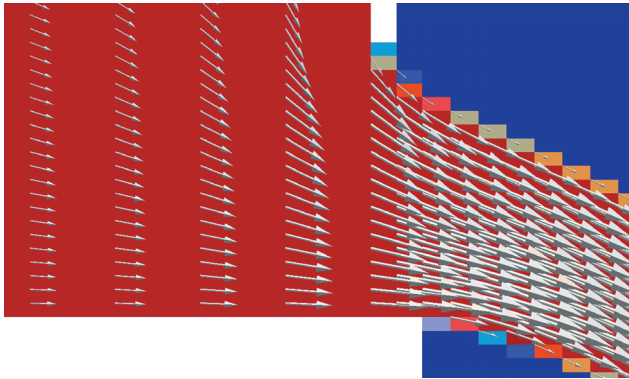


Рис. 1. Поле скоростей потока вблизи щитового затвора в канале с плоским дном при шероховатости дна  $k = 0.0025$

Fig. 1. Flow velocity field near the sluice gate in a channel with a flat bottom at bottom roughness  $k = 0.0025$

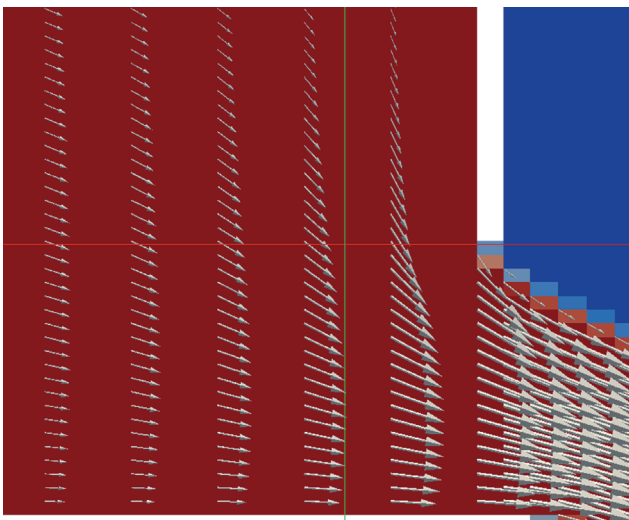


Рис. 2. Поле скоростей потока вблизи щитового затвора в канале с плоским дном при шероховатости дна  $k = 0.015$

Fig. 2. Flow velocity field near the sluice gate in a flat bottom channel with bottom roughness  $k = 0.015$

Установка щитового затвора на поперечную перегородку русла позволяет существенно нивелировать влияние шероховатости дна на расход воды через щитовой затвор. В этом случае продольная компонента скорости под щитом зависит практически только от скорости в ядре подводящего потока. Независимо от шероховатости русла поле скоростей в области щитового затвора имеет вид, представленный на рисунке 4 ( $H_s$  – высота порога;  $H_g$  – высота отверстия).

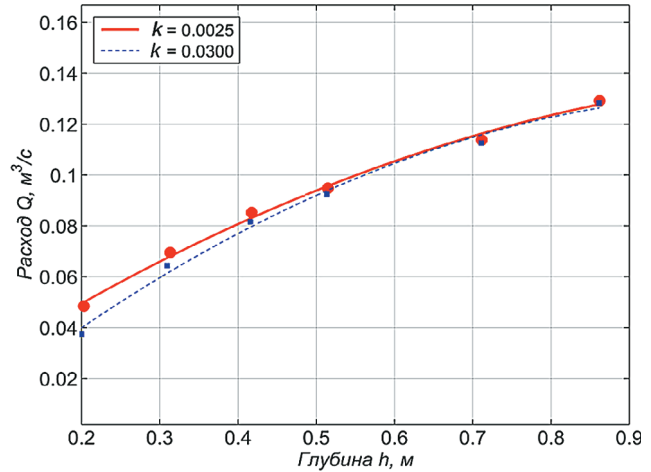


Рис. 3. Расходная зависимость щитового затвора в канале с плоским дном:  $H_g = 0.1$

Fig. 3. Flow rate dependence of the sluice gate in a flat bottom channel ( $H_g = 0.1$ )

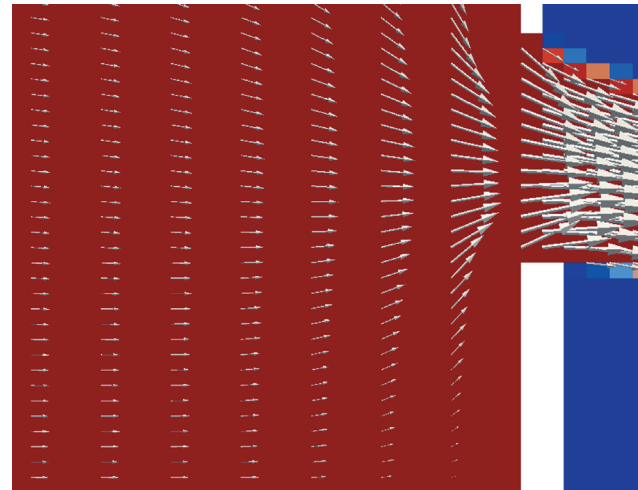


Рис. 4. Поле скоростей вблизи щитового затвора, установленного на поперечной стенке:  $H_s = 0.05$  м;  $H_g = 0.05$  м

Fig. 4. Velocities field near the sluice gate installed on the transverse wall ( $H_s = 0.05$  м,  $H_g = 0.05$  м)

Для количественной оценки расхода через щитовой затвор, установленный на пороге (на поперечной стенке), выполнена серия из 216 расчетов в диапазоне соотношений  $H_g/h = 0.05...0.3$  при высоте поперечной стенки  $0.05...0.4$  м и шероховатости русла  $k = 0.0025$  и  $k = 0.03$ . В качестве примера в таблице приведены типичные значения расхода воды через щитовой затвор, установленный на поперечной стенке в канале шириной  $B = 0.5$  м при  $H_s = 0.1$  м;  $H_g = 0.40$  м. Здесь  $k_{in}$ ,  $k_{str}$  – высота выступов эквивалентной шероховатости подводящего русла и сооружения (стенки и, собственно, щита);  $H_s$  – высота поперечной стенки;  $H_g$  – высота отверстия;  $X_{contr}$ ,  $H_{contr}$  – координата отсчета и уровень

верхнего бьефа (вблизи передней грани затвора);  $h$  – глубина относительно дна отверстия под щитом;  $Q_{\text{calc}}$  – расход воды,  $\delta Q$  – относительное различие расходов при равной глубине потока на входе расчетной области.

Результаты расчетов показали, что при соотношении  $H_g/h < 0.3$  различие расходов в гладком и шероховатом русле не превышает 3%. С учетом практической идентичности конфигурации поля скоростей и слабой зависимости от шероховатости русла полученная аналитическая формула для расхода через

щитовой затвор независимо от шероховатости русла:

$$\frac{Q}{B} = 0.83 \cdot h^{0.57} \cdot H_g^{0.93} \cdot g^{0.5}, \quad (2)$$

где  $Q/B$  – удельный расход;  $h$  – глубина относительно дна отверстия под щитом;  $H_g$  – высота отверстия;  $g$  – ускорение свободного падения. Система единиц – СИ.

На рисунке 5 приведены результаты расчета расхода через щитовой затвор в гладком и шероховатом русле ( $k = 0.0025 \dots 0.03$ ) и кривая вышеуказанной «эмпирической» зависимости.

Таблица

Типичные значения расхода воды через щитовой затвор

Table

Typical values of water flow through the sluice gat

Project FreeGate74 $k_{\text{in}} = 0.0025$ , $k_{\text{str}} = 0.0025$ $H_s = 0.1$ ; $H_g = 0.40$ ; $X_{\text{contr}} = 1.49$					Project FreeGate74-2 $k_{\text{in}} = 0.03$ , $k_{\text{str}} = 0.0025$ $H_s = 0.1$ ; $H_g = 0.40$ ; $X_{\text{contr}} = 1.49$				
N	$H_{\text{contr}}$ , М	$h$ , М	$H_g/H$	$Q_{\text{calc}}^1$	$H_{\text{contr}}$ , М	$h$ , М	$H_g/H$	$Q_{\text{calc}}^2$	$\delta Q$ , %
1	0.8840	0.7840	0.5102	0.5166	0.8751	0.7751	0.5161	0.5111	1.08
2	1.0669	0.9669	0.4137	0.5782	1.0634	0.9634	0.4152	0.5746	0.63
3	1.2591	1.1591	0.3451	0.6429	1.2572	1.1572	0.3457	0.6402	0.43
4	1.4539	1.3539	0.2954	0.6998	1.4524	1.3524	0.2958	0.6974	0.33
5	1.6534	1.5534	0.2575	0.7580	1.6510	1.5510	0.2579	0.7560	0.26
6	1.8505	1.7505	0.2285	0.7984	1.8499	1.7499	0.2286	0.7967	0.20

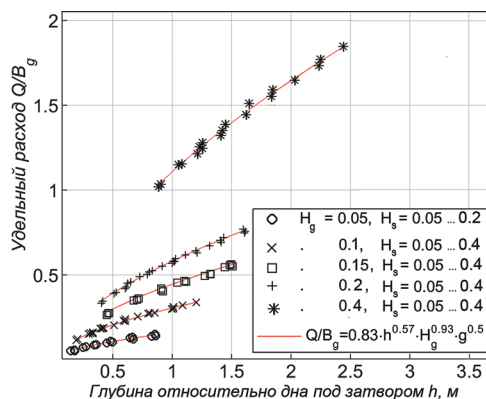


Рис. 5. Результаты расчета расхода через щитовой затвор и кривая аналитической зависимости (2) по данным численного моделирования потока в гладком и шероховатом русле:

$H_s$  – высота стенки под затвором;  
 $H_g$  – высота отверстия

Fig. 5. Results of flow calculation through the sluice gate and analytical dependence curve (2) based on numerical flow simulation data in the smooth and rough channel ( $H_s$  – wall height under the gate;  $H_g$  – hole height)

#### Библиографический список

1. Rajaratnam N. and Subramanya K. Flow Equation for the Sluice Gate // Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 1967. – Vol. 93. – No 9. – Pp. 167-186.

#### Выводы

Установлена зависимость метрологических характеристик щитового затвора от гидравлических параметров потока и шероховатости дна подводящего русла. Результаты численного моделирования показали, что основным фактором, влияющим на расходную характеристику, является форма профиля скоростей перед отверстием щитового затвора.

По результатам исследования предложена конфигурация элементов сооружения, обеспечивающая уменьшение зависимости измеренного расхода от влияния гидравлики потока в подводящем канале.

Разработана аналитическая формула расходной зависимости щитового затвора с предложенной конфигурацией элементов и разбросом вычисленных расходов независимо от шероховатости русла в диапазоне отношений высоты отверстия к глубине относительно нижнего края отверстия  $H_g/H < 0.3$  не более 3%.

#### References

1. N. Rajaratnam and K. Subramanya, "Flow Equation for the Sluice Gate," Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 93, No. 9, 1967, pp. 167-186.

2. **Rajaratnam N.** Free Flow Immediately Below Sluice Gates // Journal of the Hydraulics Division. – 1977. – Vol. 103. – № 4. – Pp. 345-351.

3. **Roth A., Hager W.H.** Underflow of Standard Sluice Gate // Experiments in Fluids. 1999. – Vol. 27. – № 4. – Pp. 339-350.

4. **Cheng A.H.D., Liggett J.A. and Liu P.L.-F.** Boundary Calculations of Sluice and Spillway Flows // Journal of the Hydraulics Division. – 1981. – Vol. 107. – № 10. – Pp. 1163-1178.

5. **Belaud G., Cassan L., Baume J.-P.** Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement // Journal of Hydraulic Engineering. – 2009. – ol. 135, 2009, pp. 1086-1091. ISSN0733-9429

6. **Dae-Geun Kim.** Numerical Analysis of Free Flow Past a Sluice Gate. KSCE Journal of Civil Engineering. – 2007. – March. – Vol. 11. – № 2. – Pp. 127-132.

7. **Кушер А.М.** Анализ факторов, влияющих на пропускную способность щитовых затворов в открытом русле // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные проблемы развития мелиорации и пути их решения». Т. 2. – М.: ВНИИГиМ, 2020. – С. 307-315.

8. **Кушер А.М.** Применение численного моделирования в расчете гидрометрических сооружений в открытых руслах // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Вып. 8. – С. 1008-1015.

9. **Агроскин И.И., Дмитриев Г.Т., Пикалов Ф.И.** Гидравлика. – Изд. 3-е. – М.: Госэнергоиздат, 1954. – 484 с.

10. **Garbrecht G.** Abflussberechnung für Flüsse und Kanäle // Die Wasserwirtschaft, 51. – Jahrgang, 1961. – S. 40-45, 72-77.

#### Критерии авторства

Кушер А.М. выполнил теоретические и практические исследования, на основании которых провел обобщение и написал рукопись. Имеет на статью авторское право и несёт ответственность за плагиат.

Статья поступила в редакцию 11.05.2022

Одобрена после рецензирования 25.05.2022

Принята к публикации 15.06.2022

2. **N. Rajaratnam,** “Free Flow Immediately Below Sluice Gates,” Journal of the Hydraulics Division, Vol. 103, No. 4, 1977, pp. 345-351.

3. **A. Roth, W.H. Hager,** “Underflow of Standard Sluice Gate, Experiments in Fluids, Vol. 27, No. 4, 1999, pp. 339-350. DOI 10.1007/s003480050358

4. **A.H.D. Cheng J.A. Liggett and P.L.-F. Liu,** “Boundary Calculations of Sluice and Spillway Flows,” Journal of the Hydraulics Division, Vol. 107, No. 10, pp. 1163-1178.

5. **G. Belaud, L. Cassan J.-P. Baume.** Calculation of Contraction Coefficient under Sluice Gates and Application to Discharge Measurement. Journal of Hydraulic Engineering, vol. 135, 2009, pp. 1086-1091. ISSN0733-9429

6. **Dae-Geun Kim.** Numerical Analysis of Free Flow Past a Sluice Gate. KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 11, No. 2, March 2007, pp. 127-132.

7. **Kusher A.M.** Анализ факторов, влияющих на пропускную способность щитовых затворов в открытом русле. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы развития мелиорации и пути их решения», т. 2, ВНИИГиМ, М., 2020, с. 307-315.

8. **Kusher A.M.** Применение численного моделирования в расчете гидрометрических сооружений в открытых руслах. Vestnik MGSU, tom 13, vypusk 8, 2018, s. 1008-1015.

9. **Agroskin I.I., Dmitriev G.T., Pikalov F.I.** Gidravlika. Gosenergoizdat, izd. 3, 1954, 484 s.

10. **Garbrecht G.** Abflussberechnung für Flüsse und Kanäle, Die Wasserwirtschaft, 51. Jahrgang, 1961, S. 40-45 und S. 72-77. (Deutsch)

#### Criteria of Authorship

Kusher A.M. carried out theoretical and practical studies, on the basis of which he generalized and wrote the manuscript. Kusher A.M. has a copyright on the article and is responsible for plagiarism.

The article was submitted to the editorial office 11.05.2022

Approved after reviewing 25.05.2022

Accepted for publication 15.06.2022