

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО,
ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.83

doi: 10.31774/2712-9357-2025-15-4-353-366

**Анализ гидравлики потока при пропуске
через лоток катастрофического сброса Новотроицкого
водохранилища форсированного расхода воды**

Игорь Геннадьевич Литуновский¹, Александр Александрович Ткачев²

^{1, 2}Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова –
филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹gts_i_sm.nimi@mail.ru

²Prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

Аннотация. Цель: выполнение гидравлического анализа потока в лотке при пропуске форсированного расхода воды; формирование выводов о несоответствии полученных параметров актуальным нормативным актам и обоснование принятых проектных решений лотка для обеспечения безопасности и долговечности сооружения. **Материалы и методы.** Исследование основано на численном интегрировании дифференциального уравнения неравномерного движения воды в открытых руслах. Для верификации результатов и демонстрации надежности выводов расчеты выполнены двумя независимыми численными методами: методом конечных разностей В. И. Чарномского (расчет по шагам глубины) и методом стандартных шагов (расчет по шагам длины), рассчитанные в программном модуле на языке Python. **Результаты.** Расчеты, выполненные для форсированного расхода $Q = 260 \text{ м}^3/\text{с}$, показали, что в лотке быстроток формируется кривая спада типа В₂. Скорость потока к концу лотка длиной 159 м достигает 15,73 м/с, а число Фруда превышает 5,0. Касательные напряжения на дне достигают 14 кПа. **Выводы.** Полученные значения скорости и касательных напряжений категорически недопустимы для эксплуатации бетонного гидротехнического сооружения, т. к. многократно превышают пределы его абразивной и кавитационной стойкости. Данные нагрузки негативно влияют на несущую способность и долговечность строительных конструкций, а также могут привести к возникновению чрезвычайной ситуации. Разработанный программный модуль подтвердил корректность вычислений и может быть использован как гибкий инструмент для дальнейшего вариантного проектирования.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, быстроток, гидравлический расчет, неравномерное движение, кривая спада, численный метод, скорость потока

Источник финансирования: инициативная тематика.

Для цитирования: Литуновский И. Г., Ткачев А. А. Анализ гидравлики потока при пропуске через лоток катастрофического сброса Новотроицкого водохранилища форсированного расхода воды // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 4. С. 353–366. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-353-366>.

HYDROTECHNICAL ENGINEERING,
HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

**Analysis of flow hydraulics during forced water discharge
through the chute of the Novotroitsk reservoir excess water capacity**

Igor G. Litunovskiy¹, Aleksandr A. Tkachev²

^{1, 2}Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A. K. Kortunov –
branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹Prof_al@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8060-620X>

²gts_i_sm.nimi@mail.ru

Abstract. Purpose: to perform a hydraulic analysis of the flow in a flume under forced water flow; to draw conclusions about the discrepancy between the obtained parameters and current regulations and to justify the adopted flume design solutions to ensure the safety and durability of the structure. **Materials and methods.** The study is based on the numerical integration of the differential equation of non-uniform water movement in open channels. To verify the results and demonstrate the reliability of the conclusions, the calculations were performed using two independent numerical methods: the finite difference method of V. I. Charnomskii (calculation by depth steps) and the standard steps method (calculation by length steps), calculated in a software module in the Python language. **Results.** The calculations performed for a forced flow of $Q = 260 \text{ m}^3/\text{s}$ showed that a type B₂ recession curve is formed in the chute. The flow rate at the end of the 159-meter-long flume reaches 15.73 m/s, and the Froude number exceeds 5.0. Shear stresses at the bottom reach 14 kPa. **Conclusions.** The obtained rate and shear stress values are categorically unacceptable for the operation of a concrete hydraulic structure, as they significantly exceed its abrasion and cavitation resistance limits. These loads impact negatively the load-bearing capacity and durability of the building structures and can also lead to an emergency. The developed software module confirmed the accuracy of the calculations and can be used as a flexible tool for further alternative design.

Keywords: hydraulic structure, chute, hydraulic calculation, uneven flow, recession curve, numerical method, flow rate

Funding source: initiative theme.

For citation: Litunovskiy I. G., Tkachev A. A. Analysis of flow hydraulics during forced water discharge through the chute of the Novotroitsk reservoir excess water capacity. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2025;15(4):353–366. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-4-353-366>.

Введение. Обеспечение безаварийной эксплуатации напорных гидротехнических сооружений является важной проблемой с точки зрения экономического развития сельского хозяйства и предотвращения экологических катастроф. Подавляющее количество ГТС, введенных в эксплуатацию в XX в., сейчас находятся в ограниченно работоспособном или аварийном состояниях и требуют проведения работ по реконструкции или капитальному ремонту [1, 2]. Водосбросные сооружения – неотъемлемая часть гидроузлов, необходимая для пропуска паводковых вод.

В статье рассматривается катастрофический сброс в составе гидроузла Новотроицкого водохранилища. Ключевым элементом сооружения является быстроток, расположенный между секцией затворов и водобойным колодцем, гидравлический режим в котором ключевым образом влияет на безопасную эксплуатацию ГТС. Устройство быстROTOКОВ на крутых уклонах связано с риском развития высоких скоростей потока, что приводит к повреждению поверхности или разрушению бетона конструкций [3], а также создает избыточную кинетическую энергию, требующую сложных и дорогостоящих систем гашения.

В рамках проекта реконструкции сооружения возникла задача определения гидравлического режима работы существующего лотка быстROTOКА, имеющего проектный уклон $i = 0,097$. Цель исследования: гидравлический анализ потока в лотке при пропуске форсированного расхода воды, формирование выводов о несоответствии полученных параметров актуальным нормативным актам¹ [4] и обоснование принятых проектных решений лотка для обеспечения безопасности и долговечности сооружения.

Материалы и методы. Проведен детальный анализ гидравлики бурного потока в быстROTOке при его существующем уклоне 0,097 и пропуске расчетного расхода $Q = 260 \text{ м}^3/\text{с}$, который является форсированным. Основная задача – определить характер кривой свободной поверхности, рассчитать распределение глубин и скоростей по всей длине лотка, оценить конечную скорость потока на входе в гаситель энергии.

Неравномерным называется установившееся движение, при котором гидравлические характеристики и элементы живого сечения изменяются по длине. Исследование основано на численном анализе установившегося, плавно изменяющегося неравномерного движения воды в открытом призм-

¹Водопропускные гидротехнические сооружения (водосбросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования: СП 290.1325800.2016 [Электронный ресурс]: утв. Приказом М-ва стр-ва и жилищ.-комму. хоз-ва Рос. Федерации № 954/пр от 16.12.16: введ. в действие с 17.06.17. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.

матическом русле. Данный тип течения описывается классическим дифференциальным уравнением [5, 6]:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i_0 - i_f}{1 - Fr^2} = \frac{i_0 - \frac{n^2 Q^2}{A^2 R^{4/3}}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g A^3}}, \quad (1)$$

где h – глубина потока;

s – продольная координата;

i_0 – уклон дна;

i_f – уклон трения (гидравлический уклон);

Fr – число Фруда;

n – коэффициент шероховатости по Маннингу;

Q – расход;

A – площадь живого сечения;

R – гидравлический радиус;

α – коэффициент Кориолиса;

B – ширина свободной поверхности;

g – ускорение свободного падения.

Уравнение описывает взаимосвязь между глубиной и расстоянием. Наиболее полным способом решения данного уравнения, получившим широкое применение на практике, считается способ проф. Б. А. Бахметева. Известны также способы академика Н. Н. Павловского, профессоров И. И. Агроскина, В. И. Чарномского, М. М. Скиба и других ученых [7].

Решение уравнения выполнено двумя независимыми численными методами. Таким образом, можно сравнить несколько способов интегрирования, сверить и взаимно верифицировать результаты.

Метод В. И. Чарномского [4]. Данный метод основан на конечно-разностной аппроксимации уравнения энергии для двух соседних сечений. Преимущества данного метода заключаются в использовании при любом

сечении русла, а также в применении прямых расчетов без специализированных таблиц. Расчет ведется по шагам глубины. Задается малое изменение глубины (Δh , м), и для него вычисляется соответствующая длина участка (ΔS , м):

$$\Delta S = \frac{E_2 - E_1}{i_0 - i_{f, \text{ср}}}, \quad (2)$$

где E_1, E_2 – удельные энергии в начальном и конечном сечениях участка, м;
 $i_{f, \text{ср}}$ – средний уклон трения на участке.

Расчет выполняется от начального участка, где глубина принимается равной критической ($h_{\text{кр}}$, м), и продолжается с шагом до конечного участка.

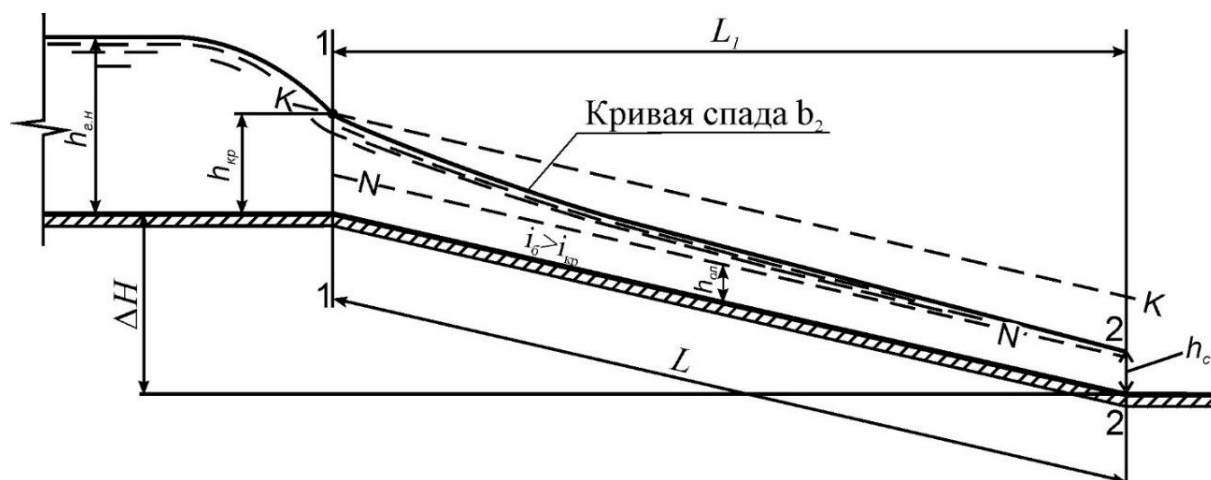
Метод стандартных шагов (Standard Step Method) [8] – итерационный метод, основанный на уравнении энергии. В нем устанавливаются шаги с равными промежутками по длине (ΔS , м), и подбирается методом итерации глубина в конце участка (h_2 , м), которая удовлетворяет уравнению баланса энергии. Данное уравнение является упрощенным вариантом уравнения Бернулли. Преимущество данного метода заключается в возможности разбить лоток на участки и классифицировать его по крутости уклона (крутой или пологий) и типу перехода. На каждом шаге решается нелинейное алгебраическое уравнение, что делает метод вычислительно более сложным, но удобным для получения результатов в заданных створах.

Основные задачи при расчете лотка быстротока (рисунок 1) [4, 9]:

- установление характера кривой свободной поверхности неравномерного движения в лотке;
- расчет неравномерного движения воды в лотке и определение глубины в конце лотка, необходимой для расчета скорости выходной части.

Исходные данные для расчета: расчетный расход $Q = 260 \text{ м}^3/\text{с}$; длина лотка быстротока $L = 159,0 \text{ м}$; ширина лотка $b = 15,3 \text{ м}$ (вариант без учета разделительной стенки); проектный уклон дна $i_0 = 0,097$; коэффици-

ент шероховатости для бетона (по Маннингу) $n = 0,015$; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,1$.



1 – 1 – сечение на начальном участке быстротока; 2 – 2 – сечение на конечном участке быстротока; N – N – линия нормальных глубин, K – K – линия критических глубин; L – длина быстротока, м; L_1 – длина горизонтальной проекции быстротока, м; ΔH – высота быстротока, м; $h_{г.н.}$ – высота напорного горизонта, м; $h_{кр.}$ – высота линии критических глубин, м; $h_{н.л.}$ – высота линии нормальных глубин, м; h_c – высота напора на конечном участке быстротока, м; i_0 – фактический уклон быстротока; $i_{кр.}$ – критический уклон быстротока

1 – 1 – cross-section at the initial section of the chute; 2 – 2 – cross-section at the final section of the chute; N – N – normal depth line, K – K – critical depth line; L – chute length, m; L_1 – chute horizontal projection length, m; ΔH – chute height, m; $h_{г.н.}$ – pressure horizon height, m; $h_{кр.}$ – critical depth line height, m; $h_{н.л.}$ – the normal depth line height, m; h_c – head height at the final section of the chute, m; i_0 – chute actual slope; $i_{кр.}$ – chute critical slope

Рисунок 1 – Расчетная схема лотка быстротока

Figure 1 – Calculation scheme of the chute flume

Результаты и обсуждение. Поскольку проектный уклон i_0 ($0,097$) $>$ $i_{кр.}$ ($0,002225$), лоток является крутым. Это означает, что нормальная глубина ($0,93$ м) меньше критической ($3,19$ м), а поток в лотке будет бурным (сверхкритическим). Так как поток поступает в лоток из входной части, где глубина близка к критической ($h_{вх} \approx h_{кр.}$), то по длине лотка будет формироваться кривая спада типа B_2 (в англоязычной литературе S_2), асимптотически стремящаяся к нормальной глубине. В таблице 1 приведены результаты пошагового расчета гидравлических характеристик методом В. И. Чарномского. Для более полного гидравлического анализа потока дополним таб-

лицу результатами вычисления числа Фруда Fr и касательных напряжений на дне лотка τ .

Таблица 1 – Расширенные результаты расчета гидравлических характеристик быстротока ($i = 0,097$)

Table 1 – Extended results of calculation of chute hydraulic characteristics ($i = 0.097$)

Длина от начала лотка L , м	Глубина потока h , м	Скорость потока V , м/с	Число Фруда Fr	Удельная энергия E , м	Касательное напряжение на дне τ , Па
0,0	3,19	5,33	0,95	4,781	1585
0,5	2,89	5,88	1,11	4,828	1928
1,6	2,69	6,32	1,23	4,927	2217
4,8	2,39	7,11	1,47	5,224	2822
8,5	2,19	7,76	1,68	5,566	3364
14,3	1,99	8,54	2,05	6,078	4088
23,1	1,79	9,49	2,41	6,843	5040
29,3	1,69	10,06	2,62	7,359	5659
47,4	1,49	11,40	3,16	8,783	7268
79,9	1,29	13,17	3,92	11,019	9687
107,7	1,19	14,28	4,46	12,623	11400
153,6	1,09	15,59	5,06	14,717	13580
159,0	~1,08	~15,73	~5,14	~14,961	~13890

Для более глубокого анализа представим их в расширенной и визуализированной форме в виде графика (рисунок 2), в котором наглядно отражены изменения глубины и скорости потока по всей длине быстротока.

На графике наглядно видно, как глубина потока резко уменьшается на начальном участке лотка быстротока, а затем спад глубины замедляется, стремясь к отметке 0,93 м. Скорость, наоборот, стремительно увеличивается и на 30-м метре она превышает 10 м/с, а в конечном участке достигает катастрофического значения 15,73 м/с.

Аналитический график (рисунок 3) показывает, как быстро поток переходит в состояние интенсивного бурного течения ($Fr > 5$). Значения в 13–14 кПа (таблица 1) могут привести к эрозивному разрушению бетона быстротока [10–12].

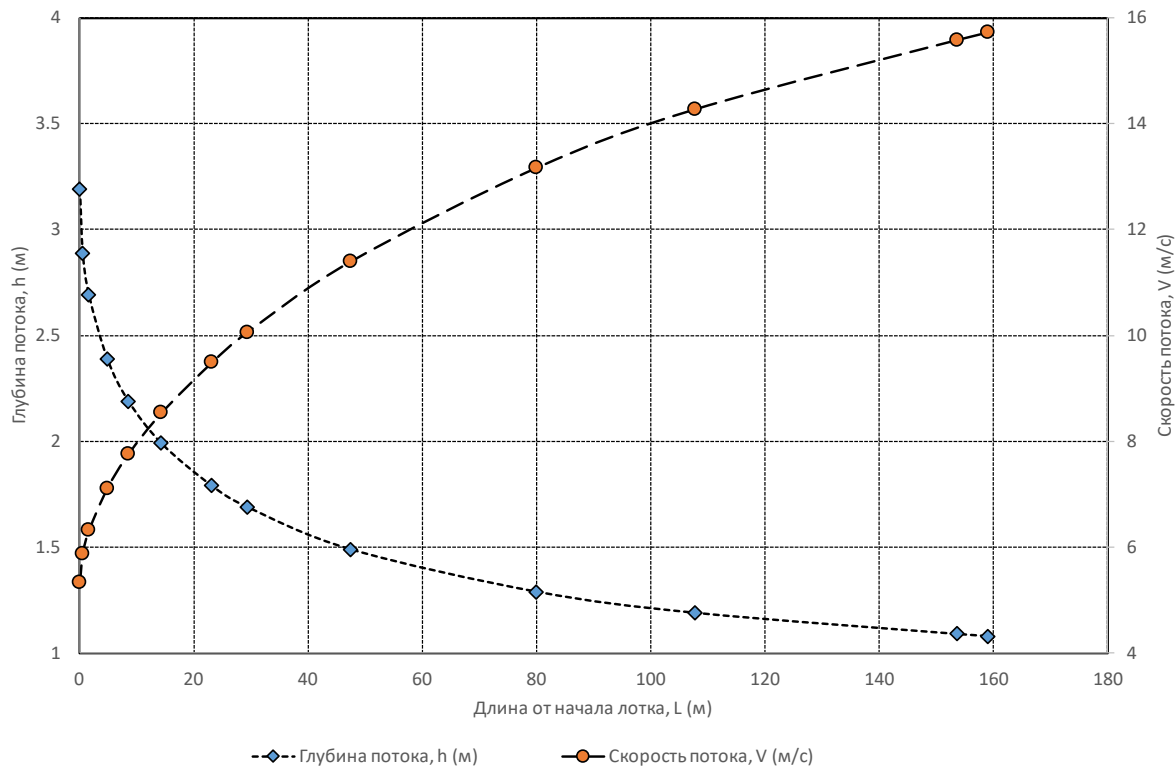


Рисунок 2 – Профили глубин и скоростей по длине быстротoka
Figure 2 – Depth and velocity profiles along the chute length

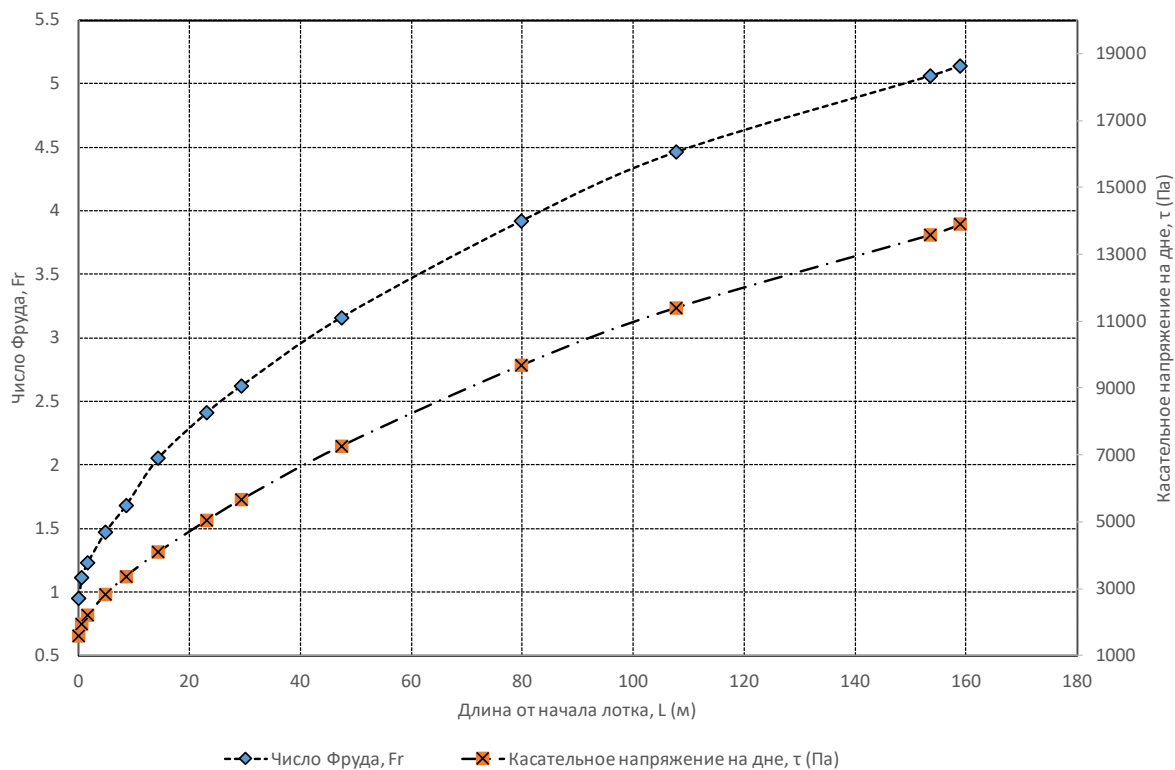


Рисунок 3 – Профиль числа Фруда и касательных напряжений
Figure 3 – Profile of the Froude number and shear stresses

При высоких скоростях (12–15 м/с) и любых неровностях поверхности бетона возникает высокий риск кавитации – образование пузырьков в воде в зонах с пониженным давлением воды и микрогидравлическими ударами при схлопывании этих пузырьков, которые разрушают бетон. Скоростной поток, неся с собой мелкий сор (песок, гальку), будет оказывать абразивное воздействие на поверхность бетона. При этом поток с удельной энергией почти 15 м и скоростью 15,7 м/с потребует для гашения энергии нетиповых, сложных и экономически затратных решений:

- чрезвычайно глубокий водобойный колодец (глубиной более 10–12 м);
- сложную систему гасителей.

Эффективно гасить энергию такой величины в рамках типовых конструктивных решений практически невозможно.

Помимо метода Чарномского, для верификации полученных расчетных результатов выполним сравнение с методом стандартных шагов (Standard Step Method), являющимся альтернативным методом, основанным также на уравнении энергии. Расчет должен дать высокий уровень сходимости для подтверждения правильности расчетов и взаимной верификации этих методов. Для безошибочного и быстрого проведения расчетов на языке Python написана программа, которая реализует²:

- ввод исходных данных (параметров быстротока);
- расчет по методу В. И. Чарномского (расчет по шагам глубины);
- расчет по методу стандартных шагов (расчет по шагам длины);
- результаты расчетов с данными для сравнительного анализа;
- визуализация данных в виде таблиц и графиков.

²Программа расчета оптимальных параметров по пирсам в гасителе: свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2025663675 / Ткачев А. А., Михальчук А. В., Волкова Е. А., Симончук Д. А.; правообладатель Донской ГАУ. Заявка № 2025661618; заявл. 12.05.25; опубл. 29.05.2025, Бюл. № 6. EDN ZQRKZQ.

В таблице 2 представлен сравнительный анализ результатов расчета двумя методами.

Таблица 2 – Сравнительный анализ результатов расчета двумя численными методами

Table 2 – Comparative analysis of calculation results using two numerical methods

Удаление от начала L , м	Глубина (Чарномский), м	Глубина (стандартные шаги), м	Погрешность, %	Скорость (Чарномский), м/с	Скорость (стандартные шаги), м/с
0,0	3,19	3,19	0,0	5,33	5,33
23,1	1,79	1,80	0,56	9,49	9,45
79,9	1,29	1,30	0,77	13,17	13,10
159,0	1,082	1,08	0,01	15,713	15,713

Как видно из таблицы 2, расхождение между двумя независимыми численными методами не превышает 1 %, что свидетельствует о высокой достоверности полученной математической модели. Графически профили свободной поверхности, построенные обоими методами, практически накладываются друг на друга. Графики (рисунки 4, 5) построены с использованием библиотеки `matplotlib.pyplot`, расчеты выполнены с использованием `fsolve` (рисунок 6).

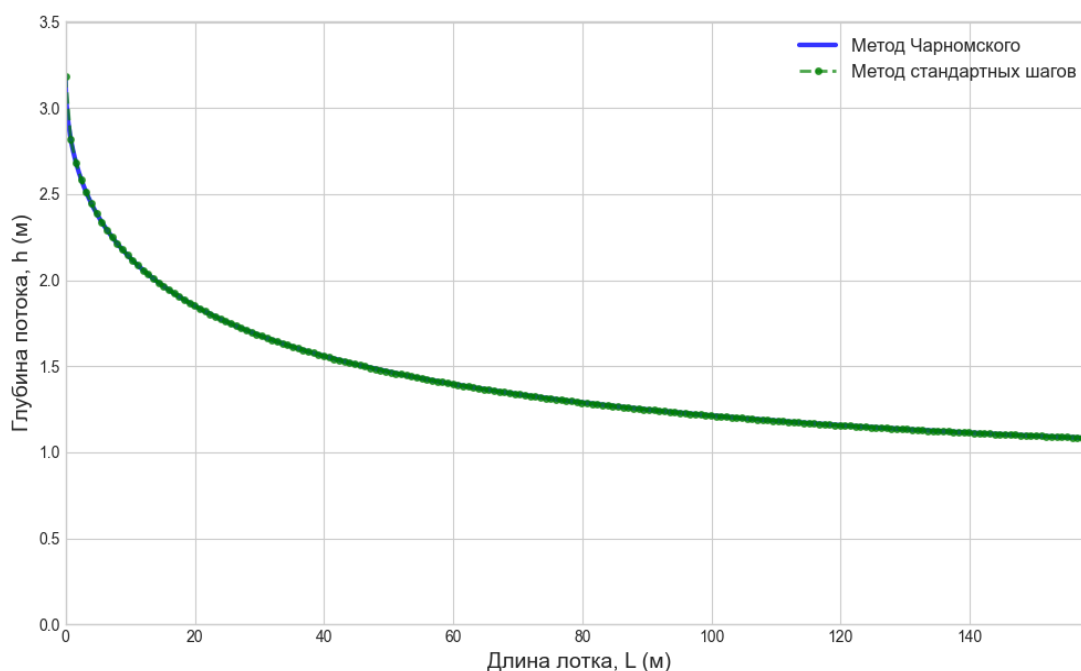


Рисунок 4 – Сравнение профилей глубин
Figure 4 – Comparison of depth profiles

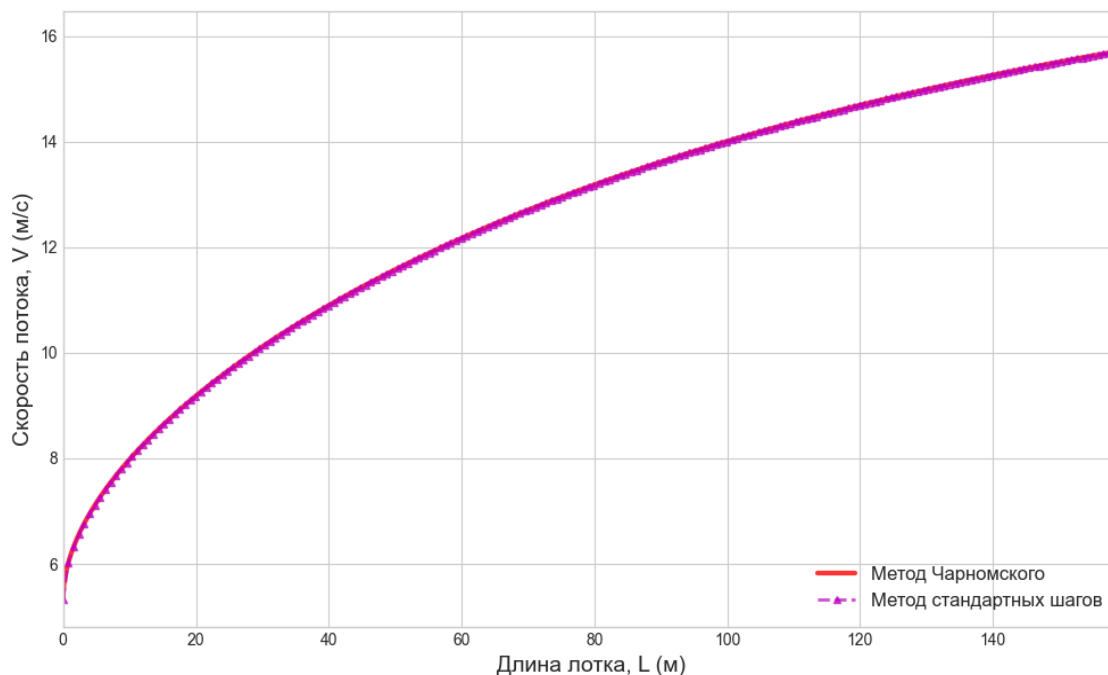


Рисунок 5 – Сравнение профилей глубин
Figure 5 – Comparison of depth profiles

```
h2 = float(h2_scalar)
```

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ В КОНЦЕ БЫСТРОТОКА (L=159 м)			
Параметр	Метод Чарномского	Метод станд. шагов	Отклонение, %
Глубина, h (м)	1.082	1.081	0.01
Скорость, V (м/с)	15.713	15.713	0.01

Вывод: Результаты обоих методов практически идентичны, что подтверждает корректность расчетов.

Рисунок 6 – Элемент реализации разработки
в виде программы для ЭВМ
Figure 6 – Implementation element of the development
in the form of a computer program

Выводы. Анализ гидравлического воздействия на конструкции быстротока при его фактическом уклоне $i = 0,097$ показал, что в период пропуска форсированного расхода, равного $260 \text{ м}^3/\text{с}$, в лотке появляется интенсивно ускоряющийся бурный поток.

Расчеты, выполненные по двум независимым численным методам, определили, что на конце лотка скорость потока достигает $15,73 \text{ м/с}$, а число Фруда превышает $5,0$. Данное значение скорости при долговременной эксплуатации оказывает чрезвычайно негативное воздействие на железо-

бетонные конструкции быстротока, т. к. приводит к кавитации и абразивному износу поверхностей сооружения.

Фактические конструктивные решения лотка быстротока катастрофического водосброса гидроузла Новотроицкого водохранилища не отвечают современным требованиям норм проектирования¹, создают повышенные нагрузки и опасные воздействия на несущие конструкции водосброса. Требуется разработка специального проекта по реконструкции сооружения, предусматривающего гашение энергии водного потока.

Разработанная программа является гибким, быстрым и надежным вариантом проведения расчетов. Изменив в коде значение исходных данных или проектных параметров, можно быстро получить измененные профили и оценить степень влияния скорректированных величин.

Список источников

1. Актуальные проблемы реконструкции длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений / А. В. Михальчук, И. Г. Литуновский, И. А. Солонина, В. А. Белов // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы Междунар. науч.-практ. интернет-конф., г. Новочеркасск, 21–23 апр. 2025 г. Новочеркасск: Лик, 2025. С. 154–159. EDN: COQZOZ.
2. Актуальные вопросы практических исследований гидротехнических сооружений: монография / А. А. Ткачев [и др.]. Новочеркасск: Лик, 2024. Ч. 2. 209 с. ISBN: 978-5-907708-86-0. EDN: YZUWDT.
3. Конструктивные решения водосбросных сооружений при реконструкции малых прудов / И. Г. Литуновский, А. В. Сафронов, В. О. Антонов, В. И. Меньшиков // Наука и молодёжь: сб. науч. тр. Вып. 10. Инновации в современном агропромышленном комплексе. Новочеркасск, 2023. С. 13–18. EDN: NGERVE.
4. Баев О. А., Шевченко А. В. Совершенствование конструктивных решений водосбросов с центральным размещением рыбопропускных сооружений и закрепленной рисбермой // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2022. № 2(86). С. 13–21. EDN: ITEKUC.
5. Бубнов Д. В., Брянская Ю. В. Гидравлический расчёт быстротока с различными типами шероховатости // Гидротехническое строительство. 2024. № 10. С. 17–22. EDN: KFESUI.
6. Технические решения при реконструкции водосбросного сооружения сифонного типа / Р. С. Мезин, Е. В. Харламов, И. А. Андрос, Р. В. Кувшинчиков // Мелиорация как драйвер модернизации АПК в условиях изменения климата: материалы IV Междунар. науч.-практ. интернет-конф., г. Новочеркасск, 24–26 апр. 2023 г. Новочеркасск: Лик, 2023. С. 104–109. EDN: AVDCTZ.
7. Каньяругендо Л. Оценка влияния зигзагообразной шероховатости на кинематические параметры потока // Природообустройство. 2023. № 3. С. 85–91. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-85-91. EDN: UHBWNT.

8. Energy dissipation and flow characteristics of baffles and sills on stepped spillways / Sh. Li, Ji. Zhang, Ji. Nie, Y. Peng // *Journal of Hydraulic Research*. 2014. Vol. 52, no. 1. P. 140–143. DOI: 10.1080/00221686.2013.856040.

9. Судольский Г. А. Гидравлическое обоснование схемы гашения энергии с помощью диафрагм на тракте строительно-эксплуатационного водосброса Пскемской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. 2020. № 9. С. 5–15. EDN: JZYYQA.

10. Бубнов Д. В., Брянская Ю. В. Расчёт быстроготока с усиленной шероховатостью // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. 2024. Т. 312. С. 3–12. EDN: ERPGTF.

11. Blanc P., Lempérière F. Labyrinth spillways have a promising future // *Hydropower & Dams*. 2001. Vol. 8, iss. 4. P. 129–131.

12. Tabbara M., Chatila J., Awwad R. Computational simulation of flow over stepped spillways // *Computers & Structures*. 2005. Vol. 83, iss. 27. P. 2215–2224. ISSN: 0045-7949. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.005.

References

1. Mikhalchuk A.V., Litunovsky I.G., Solonyna I.A., Belov V.A., 2025. *Aktual'nye problemy rekonstruktsii dlitel'no ekspluatiruyemykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Current problems of long-term reconstruction operated hydraulic structures]. *Melioratsiya kak drayver modernizatsii APK v usloviyakh izmeneniya klimata: materialy Mezhdunar. nauchno-prakt. internet-konferentsii* [Land Reclamation as a Driver of Agro-Industrial Complex Modernization in the Context of Climate Change: Proceed. of the International Scientific and Practical Internet-Conference]. Novocherkassk, Lik Publ., pp. 154-159, EDN: COQZOZ. (In Russian).

2. Tkachev A.A. [et al.], 2024. *Aktual'nye voprosy prakticheskikh issledovaniy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: monografiya* [Actual Issues of Practical Research of Hydraulic Structures: monograph]. Novocherkassk, Lik Publ., part 2, 209 p., ISBN: 978-5-907708-86-0, EDN: YZUWDT. (In Russian).

3. Litunovsky I.G., Safronov A.V., Antonov V.O., Menshikov V.I., 2023. *Konstruktivnye resheniya vodosbrosnykh sooruzheniy pri rekonstruktsii malykh prудov* [Design solutions for spillway structures during the reconstruction of small ponds]. *Nauka i molodozh': sb. nauch. tr. Vyp. 10. Innovatsii v sovremennom agropromyshlennom komplekse* [Science and Youth: Collection of Scientific Papers. Iss. 10. Innovations in the Modern Agro-Industrial Complex]. Novocherkassk, pp. 13-18, EDN: NGEPE. (In Russian).

4. Baev O.A., Shevchenko A.V., 2022. *Sovershenstvovanie konstruktivnykh resheniy vodosbrosov s tsentral'nym razmeshcheniem rybopropusknykh sooruzheniy i zakreplennoy risbermoy* [Improvement of construction solutions for spillways with a central placement of fish passage and a fixed apron]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(86), pp. 13-21, EDN: ITEKUC. (In Russian).

5. Bubnov D.V., Bryanskaya Yu.V., 2024. *Gidravlicheskiy raschot bystrotoka s razlichnymi tipami sherokhovatosti* [Hydraulic calculation of a rapid flow with different types of roughness]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 10, pp. 17-22, EDN: KFESUI. (In Russian).

6. Mezin R.S., Kharlamov E.V., Andros I.A., Kuvshinchikov R.V., 2023. *Tekhnicheskie resheniya pri rekonstruktsii vodosbrosnogo sooruzheniya sifonnogo tipa* [Technical solutions for the reconstruction of a siphon-type spillway structure]. *Melioratsiya kak drayver modernizatsii APK v usloviyakh izmeneniya klimata: materialy Mezhdunar. nauchno-prakt. internet-konferentsii* [Land Reclamation as a Driver of Agro-Industrial Complex Modernization in the Context of Climate Change: Proceed. of the International Scientific and Practical Internet-Conference]. Novocherkassk, Lik Publ., pp. 104-109, EDN: AVDCTZ. (In Russian).

7. Kanyarugendo L., 2023. *Otsenka vliyaniya zigzagoobraznoy sherokhovatosti na kine-*

matische parametry potoka [Evaluation of the influence of zigzag roughness on kinematic flow parameters]. *Prirodooobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 85-91, DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-85-91, EDN: UHBWNT. (In Russian).

8. Li Sh., Zhang Ji., Nie Ji., Peng Y., 2014. Energy dissipation and flow characteristics of baffles and sills on stepped spillways. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 52, no. 1, pp. 140-143, DOI: 10.1080/00221686.2013.856040.

9. Sudol'skiy G.A., 2020. *Gidravlichesкое обоснование skhemy gasheniya energii s pomoshch'yu diafragm na trakte stroitel'no-ekspluatatsionnogo vodosbroso Pskemskoy GES* [Hydraulic justification of the scheme of energy dissipation using orifices plates on the construction and operational tunnel of the Pskem HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 9, pp. 5-15, EDN: JZYYQA. (In Russian).

10. Bubnov D.V., Bryanskaya Yu.V., 2024. *Raschot bystrotoka s usilennoy shero-khovatost'yu* [Calculation of fast current with increased roughness]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. Ye. Vedeneva* [Bullet. of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev], vol. 312, pp. 3-12, EDN: ERPGTF. (In Russian).

11. Blanc P., Lempérière F., 2001. Labyrinth spillways have a promising future. *Hydropower & Dams*, vol. 8, iss. 4, pp. 129-131.

12. Tabbara M., Chatila J., Awwad R., 2005. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers & Structures*, vol. 83, iss. 27, pp. 2215-2224, ISSN: 0045-7949, DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.005.

Информация об авторах

И. Г. Литуновский – аспирант, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета (346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, д. 111), gts_i_sm.nimi@mail.ru;

А. А. Ткачев – заведующий кафедрой, доктор технических наук, доцент, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета (346428, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, д. 111), Prof_al@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8060-620X.

Information about the authors

И. Г. Литуновский – Postgraduate Student, Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A. K. Kortunov – branch of the Don State Agrarian University (346428, Rostov Region, Novocherkassk, Pushkinskaya Street, 111), gts_i_sm.nimi@mail.ru;

А. А. Ткачев – Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A. K. Kortunov – branch of the Don State Agrarian University (346428, Rostov Region, Novocherkassk, Pushkinskaya Street, 111), Prof_al@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8060-620X.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.08.2025; одобрена после рецензирования 17.12.2025; принята к публикации 22.12.2025.

The article was submitted 12.08.2025; approved after reviewing 17.12.2025; accepted for publication 22.12.2025.