

## **ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА**

УДК 656.62.052.4:[629/12:532.5]

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.149>

### **Анализ методик определения значения критической скорости судна при заходе в камеру шлюза предельно малой ширины**

**Е.В. Зубкова**<sup>1</sup>

<https://orcid.org/0000-0001-7212-0165>

**А.Н. Клементьев**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

**Аннотация.** Целью работы является оценка точности определения значения критической скорости судна при заходе в камеру шлюза. Приведен анализ аналитических зависимостей по определению значения критической скорости судна при заходе в камеру шлюза, полученных различными авторами ранее в ходе проведения модельных и натурных испытаний. Отмечены основные факторы, влияющие на безопасность процесса захода. Установлено, что величины критической скорости, рассчитанные по различным методикам, дают разброс значений. При этом некоторые из них не позволяют определять значение критической скорости при заходе крупногабаритного судна в шлюз при больших значениях коэффициента стеснения. Указано, что безопасная и эффективная скорость захода в шлюз зависит от скорости потока, обтекающего корпус судна, которая, в свою очередь, определяется высотой поперечной волны перед форштевнем судна (т. е. уклоном свободной поверхности воды). Указанные факторы приводят к выводу о необходимости дальнейшего исследования.

**Ключевые слова:** судно, шлюз, заход судна в камеру шлюза, критическая скорость.

### **Analysis of methods determining the value of the vessel's critical speed when entering the lock chamber minimum width**

**Alexander N. Klementev**<sup>1</sup>

**Evgenia V., Zubkova**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The paper presents an review of analytical dependencies to determine the value of the vessel critical speed when entering the lock chamber. We present the review of analytical dependences for determining the vessel critical speed value when entering the lock chamber, obtained by various authors earlier in the course of model and full-scale tests. The main factors affecting the safety of the approach process are noted. It was established that the critical speed values calculated by various methods give a spread of values. However, some of them do not allow determining the the critical speed value when the vessel enters the lock at high values of the constraint coefficient. It is indicated that the safe and effective speed of entry into the lock depends on the speed of the stream flowing around the vessel hull, which, in turn, is determined by the height of the shear wave in front of the ship's bow (i.e., the

slope of the free surface of the water). These factors lead to the conclusion that further research is necessary.

**Keywords:** ship, lock, ship entry into the lock chamber, critical speed

### Введение

В настоящее время практически исчерпаны все резервы для сокращения времени технических операций шлюзования судов. Поэтому единственный резерв для сокращения времени пропуска судов через шлюзы видится в оптимизации времени процесса входа (выхода) судов в камеру шлюза.

Практические наблюдения показывают, что при заходе в камеру шлюза при минимальных запасах воды под днищем для каждого судна существует определенная допустимая скорость, превышать которую не следует. Эта скорость по условию гидравлических явлений (резкому увеличению скоростей обтекающего корпус судна потока, интенсивному волнообразованию) близка к критическому значению.

Превышение таких скоростей зачастую приводит к возникновению «поршневого эффекта», когда скорость судна резко падает вплоть до остановки и даже возникает смещение судна в обратном направлении. Движение судна вновь восстанавливается, когда разность давления воды в камере шлюза и за ее пределами уменьшится за счет перетекания воды под днищем судна и вдоль бортов. Это влияет на время шлюзования. Подобные явления наблюдаются зачастую в шлюзах предельно малой ширины с коэффициентом стеснения 0,7- 0,8.

Такой эффект можно объяснить тем, что если при движении судна в судоходном канале с постоянным сечением мощности двигателей не хватает для достижения критических значений скорости, то при заходе в камеру шлюза предельно малой ширины крупнотоннажное судно может достигнуть и даже превысить значение первой критической скорости. В этом случае к силе упора движителей прибавляется сила инерции судна, а само значение первой критической скорости на коротком участке движения падает в несколько раз по сравнению с ее значением в подходном канале вследствие резкого увеличения степени стеснения живого сечения и увеличением скоростей обтекания корпуса судна встречным потоком.

### Исследовательская часть

Из теории гидравлики [1] известно, что критическая скорость потока определяется для прямоугольных сечений по выражению:

$$V_{кр} = \sqrt{\frac{g(\Omega_k - \Omega_c)}{B_c}}, \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;

$\Omega_k$  – площадь водного сечения камеры шлюза;

$\Omega_c$  – площадь погруженной части мидельшпангоута судна;

$B_c$  – ширина судна.

Несложные расчеты показывают, что для т/х «Волго-Дон» при заходе в камеры шлюзов Волго-Донского и Волго-Балтийского каналов при статическом запасе воды под днищем судна от 0,4 до 0,9 м значения критической скорости, рассчитанной по формуле (1), находится в пределах 2,6-3,4 м/с.

Хельм в работе [2] предлагает определять значение критической скорости по формуле:

$$V_{кр} = \sqrt{g \frac{\Omega_k - \Omega_c}{\omega_k + \omega_c}}, \quad (2)$$

где  $\omega_k + \omega_c$  – суммарный смоченный периметр камеры шлюза и судна.

Расчеты по формуле (2) для тех же условий дают значения критической скорости 1,6-2,1 м/с.

Анализ натурных и модельных исследований ввода и вывода судна в шлюзах [3-10] позволил авторам сделать вывод, что моделирование по Фруду допустимо и в условиях большого стеснения (0,5-0,8), несмотря на малые скорости движения судна.

Установлено, что для каждого коэффициента стеснения существует своя рациональная скорость движения, которая не должна превышать  $0,95V_{кр}$ , что позволяет оптимизировать время маневра. Также следует учитывать влияние судоходного сооружения и судна на скорость распространения волны.

При этом скорость распространения судовой волны и скорость судна связаны соотношением:

$$V_c = k\sqrt{gR_r}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние судоходного сооружения и судна на скорость распространения волны.

$R_r$  – гидравлический радиус.

$$R_r = \frac{\Omega_k - \Omega_c}{\omega_k + \omega_c}$$

При тех же запасах воды под днищем величины гидравлического радиуса достигают значений 0,26-0,43.

В настоящее время известно много других работ с методиками расчета определения значения критических скоростей при движении судов в судоходных каналах и шлюзах.

Наиболее известной является зависимость, предложенная Г. И. Сухомелом [11]:

$$V_{кр} = \sqrt{8 \cos^3 \frac{1}{3} (\pi + \arccos k) \cdot \sqrt{gH_0}}, \quad (4)$$

$$k = 1 - \frac{\Omega_c}{\Omega_k},$$

Где

$H_0$  – начальная глубина в камере шлюза.

С.С. Кирьяков в работе [12] предлагает значение критической скорости определять по выражению

$$V_{кр} = \sqrt{8 \cos^3 \frac{1}{3} \left( \pi + \arccos \frac{k}{M} \right) \cdot \sqrt{gMH_0}} \quad (5)$$

Данная зависимость дополнительно учитывает влияние и средневзвешенного коэффициента трения  $M = (1/k)^{0,5}$ .

На рис.1 приведены графические зависимости, рассчитанные по формулам (4,5) для определения значений критической скорости в виде функции  $V_{кр} = f(k, H_0)$ .

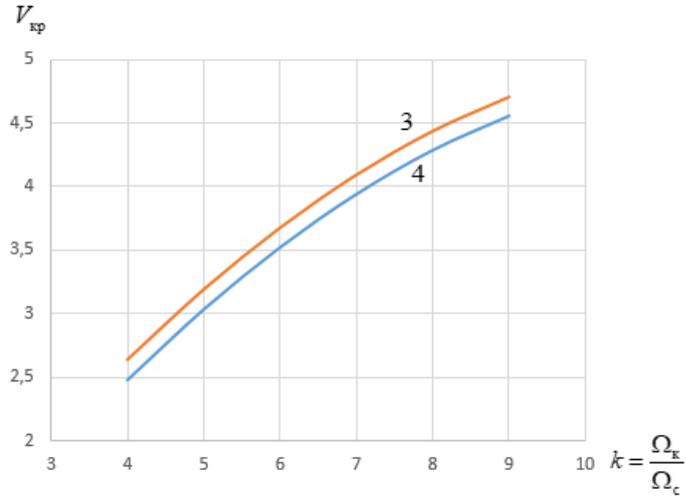


Рис.1. Графические зависимости для определения критической скорости при заходе в камеру шлюза

Приведенные графические зависимости дают удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных испытаний. Однако, следует отметить, что при значениях коэффициента стеснения менее 3 значения критической скорости по приведенным графическим зависимостям, не определяются.

В работе [13] значение критической скорости определяется по зависимости:

$$V_{кр} = \sqrt{6 \cos \frac{\pi + \varphi}{3} - 2(1-k)} \cdot \sqrt{g \frac{\Omega_k}{B}}, \quad (6)$$

где  $\varphi = \arccos(1-k)$ ;  $k = \frac{\Omega_c}{\Omega_k}$ .

Для упрощения расчетов критическую скорость предлагается определить с помощью графика на рис.2, найдя по пунктирной кривой при известном коэффициенте стеснения  $k$  число Фруда  $Fr_1$  и, затем  $V_{кр1}$ .

$$V_{кр1} = Fr_1 \sqrt{g \frac{\Omega_k}{B}}.$$

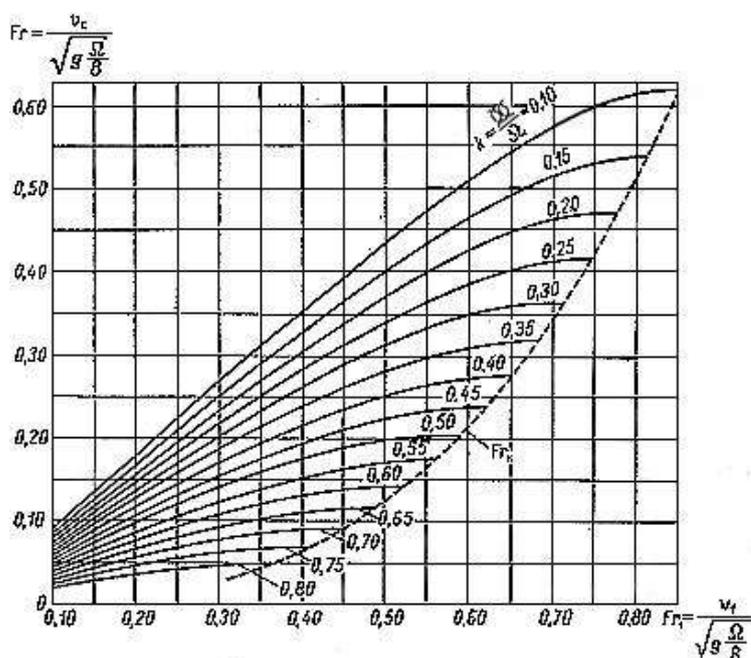


Рис.2. График для определения критической скорости движения

Однако, как видно из рис.2, при значении коэффициента стеснения  $k$  больше 0,8, величина критической скорости не определяется.

В работе [14] авторами предложена методика определения значений критической скорости при заходе судна в шлюз с использованием вспомогательных графиков (рис.3,4), которые позволяют упростить и ускорить расчеты, в следующем виде.

В качестве предельной величины скорости захода судна в камеру шлюза рекомендовано принимать скорость равную  $V_{\text{зах}} < 0,9V_{\text{кр1}}$ , при превышении которой резко возрастают сопутствующие гидравлические явления, вызывающие падение скорости и увеличение динамической посадки судна.

Значение критической скорости предлагается определять по зависимости:

$$V_{\text{кр1}} = Fr_{\text{к}} \sqrt{2gH_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где  $H_{\text{п}}$  – глубина на пороге шлюза;

$k$  – коэффициент стесненности.

Для определения  $V_{\text{кр1}}$  можно воспользоваться вспомогательным графиком 3. Для ускорения практических расчетов - графиком 4.

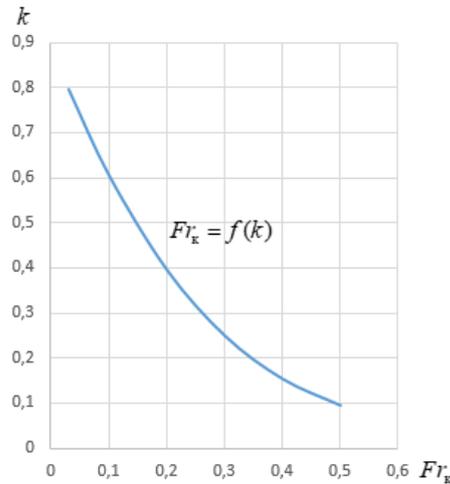


Рис.3. График зависимости величины  $Fr_k$  от коэффициента стесненности  $k$

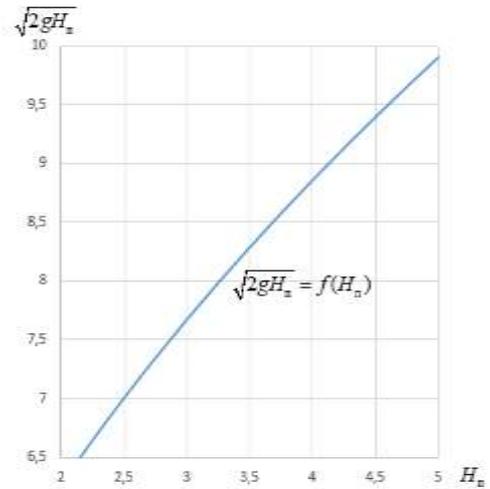


Рис. 4. Зависимость  $\sqrt{2gH_{к}}$  от  $H_{к}$

**Результаты расчетов**

Значения критической скорости, рассчитанной по формулам (1-7) для случая предельного стеснения в камере шлюза ( $k=0,7-0,82$ ) для т/х «Волго-Дон» приведены в табл.1

Таблица 1

**Значения критической скорости при заходе в шлюз**

$k = \frac{\Omega_c}{\Omega_k}$	Формула					
	1	2	4	5	6	7
0,82	2,60	1,60	0,26	0,28	0,51	0,26
0,77	2,95	1,80	0,38	0,40	0,62	0,44
0,70	3,40	2,10	0,57	0,60	0,73	0,61

**Заключение**

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл.1, показывает, что они имеют расхождение в значениях критической скорости.

Очевидно, что только знание критической скорости не определяет безопасность выполнения маневра захода судна в камеру шлюза.

Характер движения судна определяется соотношением между скоростью судна и скоростью обтекающего его потока, вызванного уклоном свободной поверхности воды и увеличением сопротивления воды движению.

Именно по этой причине автором работы [15] предложено определять значение критической скорости с учетом скорости потока, обтекающего корпус судна в зависимости от уклона поверхности воды по формуле:

$$V_{кр} = \sqrt{gH_0} - V_{обт}, \tag{8}$$

где  $V_{обт}$  – скорость обтекающего потока.

В связи с вышеизложенным, для выработки практических рекомендаций судоводителям необходимо продолжить исследования по выбору безопасной и

эффективной скорости захода в камеру шлюза с учетом влияния отмеченных факторов.

#### Литература

1. Басин, А.М. Гидродинамика судов на мелководье / А.М. Басин и [др.]. – Ленинград: Судостроение, 1976 – 319 с. – Текст : непосредственный.
2. Helm K. Einfluss der verschiedenen Flachwasserprofile auf Wieldstand und Vorfrieb von Binnenschiffen mit Rechnungsbeispiele für die Bindwasserstrasse der Klasse IV «Hansa» Zentralorgan für Schifffahrt. Schiffhafen. Hamburg. Nr. 11. 1965.
3. Похабов, В.И. Анализ результатов экспериментальных исследований движения судов в судоходных сооружениях / В.И. Похабов, Е.И. Адерихина, Ю.В. Бочаров. – Текст : непосредственный // ЦБНИИ ДРТ «Наука и техника на речном транспорте». – 1996. – №9. – С.1-9.
4. Кирьяков, С.С. Анализ результатов исследования ввода и вывода судов в шлюзах / С.С. Кирьяков, В.И. Похабов, Е.И. Адерихина. – Текст : непосредственный // ЦБНИИ ДРТ «Наука и техника на речном транспорте». – 1996. – №4. – С.12-18.
5. Кирьяков, С.С. Анализ натурных исследований ввода и вывода судов в шлюзах / С.С. Кирьяков, В.И. Похабов, Е.И. Адерихина, Ю.В. Бочаров – Текст : непосредственный // ЦБНИИ ДРТ «Наука и техника на речном транспорте». – 1996. – №10. – С.11-20.
6. Результаты лабораторных исследований движения судна в сверхограниченных фарватерах / В.И. Похабов. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов МИИВТа. Серия: «Повышение надежности механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений». – 1996. – №10. – С.139-159.
7. Экспериментальные лабораторные исследования ввода и вывода судов в камерах судопропускных сооружений / С.С. Кирьяков, В.И. Похабов, С.Ю. Третьяк. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов МИИВТа. Серия: «Эксплуатация водных путей и гидротехнических сооружений». – 1992. – №11. – С.42-69.
8. Tothill I. T. Ships in restricted channels. A correlation of more tests, field measurements and theory, Ottawa, 1966.
9. Schale E. Stromungsmessungen in einem Stillwassercanal trap formigen Querschnitts. «Schiff und Hafen». N 5, 1968, 20
10. Windsor I. Hydraulic assistance on the Welland ship. Waterways and Harbors Div. Proc. Civil Engrs. No.1, 1968, p. 94
11. Сухомел, Г.И. Исследование движения судов по ограниченным фарватерам / Г.И. Сухомел, В.М. Засс, Л.И. Янковский. – Киев, АН УССР, 1956. – 163 с. – Текст : непосредственный.
12. Кирьяков С.С. Исследование дополнительных осадок и скоростей при входе и выходе судов в шлюзах. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ЛИИВТ, – 1971. – 245 с. – Текст : непосредственный.
13. Временные строительные нормы. Указания по проектированию судоходных каналов. Приказ Минречфлота РСФСР ВСН 3-70. [Утверждены 01.01.1972г.]. – Текст : непосредственный.
14. Клементьев, А.Н. Рекомендации по маневрированию судов в зоне судоходных гидротехнических сооружений Волжского бассейна. / А.Н. Клементьев, П.Н. Токарев. – Горький, 1992. – 78 с. – Текст : непосредственный.
15. Fuehrer M. Der Einfluss der örtlichen Stromungsverhältnisse Umgehung von Schiffen auf die Wechselbeziehungen zwischen Schiffen Kanal. «Schriftenzeile Wasserund Grundbau». H., 11 Berlin. 1964.

#### References

1. Basin, A.M. Hidrodinamika sudov na melkovod'e / A.M. Basin i [dr.]. – Leningrad: Sudostroenie, 1976 – 319 s. – Tekst : neposredstvennyj.
2. Helm K. Einfluss der verschiedenen Flachwasser profile auf Wieldstand und Vorrieb von Binnenschiffen mit Rechnungsbeispiele für die Bindwasserstrasse der Klasse IV «Hansa» Zentralorgan für Schifffahrt. Schiffhafen. Hamburg. Nr. II. 1965.

3. Pohabov, V.I. Analiz rezul'tatov eksperimental'nyh issledovanij dvizheniya sudov v sudohodnyh sooruzheniyah / V.I. Pohabov, E.I. Aderihina, YU.V. Bocharov. – Tekst : neposredstvennyj // CBNII DRT «Nauka i tekhnika na rechnom transporte». –1996.– №9. – S.1-9.
4. Kir'yakov, S.S. Analiz rezul'tatov issledovaniya vvoda i vyvoda sudov v shlyuzah / S.S. Kir'yakov, V.I. Pohabov, E.I. Aderihina. – Tekst : neposredstvennyj // CBNII DRT «Nauka i tekhnika na rechnom transporte». –1996. – №4. –S.12-18.
5. Kir'yakov, S.S. Analiz naturnykh issledovanij vvoda i vyvoda sudov v shlyuzah / S.S. Kir'yakov, V.I. Pohabov, E.I. Aderihina, YU.V. Bocharov – Tekst : neposredstvennyj // CBNII DRT «Nauka i tekhnika na rechnom transporte». –1996. – №10. –S.11-20.
6. Rezul'taty laboratornykh issledovanij dvizheniya sudna v sverhgranichennykh farvaterah / V.I. Pohabov. – Tekst : neposredstvennyj //Sbornik nauchnykh trudov MIVTa. Seriya: «Povyshenie nadezhnosti mekhanicheskogo oborudovaniya sudohodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij». – 1996. – №10. –S.139-159.
7. Eksperimental'nye laboratornye issledovaniya vvoda i vyvoda sudov v kamerah sudopropusknykh sooruzhenij / S.S. Kir'yakov, V.I. Pohabov, S.YU. Tret'yak. – Tekst : neposredstvennyj //Sbornik nauchnykh trudov MIVTa. Seriya: «Ekspluatatsiya vodnykh putej i gidrotekhnicheskikh sooruzhenij». –1992. – №11. –S.42-69.
8. Tohill I. T. Ships in restricted channels. A correlation of more tests, field measurements and theory, Ottava, 1966.
9. Schale E. Stromungsmessungen in einem Stillwassercanal trap formigen Querschnitts. «Schiff und Hafen». H 5, 1968, 20
10. Windsor I. Hydraulic assistance on the Welland schip. Waterways and Harbors Div. Proc. Civil Engrs. No.1, 1968, p. 94
11. Suhomel, G.I. Issledovanie dvizheniya sudov po ogranichennym farvateram / G.I. Suhomel, V.M. Zass, L.I. Yankovskij. – Kiev, AN USSR, 1956. – 163 s. – Tekst : neposredstvennyj.
12. Kir'yakov S.S. Issledovanie dopolnitel'nykh osadok i skorostej pri vhode i vyhode sudov v shlyuzah. //Dissertatsiya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. LIVT, – 1971. – 245 s. – Tekst : neposredstvennyj.
13. Vremennye stroitel'nye normy. Ukazaniya po proektirovaniyu sudohodnykh kanalov. PrikazMinrechflota RSFSR VSN 3-70. [Utverzheny 01.01.1972g.]. – Tekst :neposredstvennyj.
14. Klement'ev, A.N. Rekomendacii po manevrirovaniyu sudov v zone sudohodnykhidrotekhnicheskikh sooruzhenij Volzhskogobassejna. / A.N. Klement'ev, P.N. Tokarev. – Gor'kij, 1992. – 78 s. – Tekst : neposredstvennyj.
15. FuehrerM. Der Einflussderortlichen Stromungsverhaltnisse Umgedungvon Schiffenauf diewechselbeziehungenzwischen Schiffon Kanal. «Schriftenzelne Wasserund Grundbau». H., IIBerlin. 1964.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Зубкова Евгения Владимировна**, аспирант кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf\_sbs@vsuwt.ru

**Клементьев Александр Николаевич**, д.т.н., профессор, профессор кафедры судовождения и безопасности судоходства, Волжский государственный университет водного транспорта» (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kaf\_sbs@vsuwt.ru

**Evgenia V., Zubkova**, Graduate student of the Department of navigation and safety shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

**Alexander N. Klementev**, Tech Scs. Dr., Professor of the Department of navigation and safety shipping, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951

Статья поступила в редакцию 25.12.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.

Received 25.12.2021; published online 23.03.2021.

УДК 627.15

DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.153>

## **Математическая модель и алгоритмизация процесса решения задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через Нижегородский низконапорный гидроузел**

**А.Н. Ситнов<sup>1</sup>**

**С.О. Агеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

<sup>2</sup>*Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей, г. Нижний Новгород, Россия.*

**Аннотация.** Введение мероприятий по внутрисуточному регулированию стока поступающих с Нижегородской ГЭС расходов и их сброса через водослив Нижегородского низконапорного гидроузла требует конкретного алгоритма действий диспетчеров создаваемого гидроузла. При этом возникают серьезные трудности при прогнозировании водного режима во времени: как показали предыдущие исследования, имеется большая неравномерность и нерегулярность сбросов воды не только в течение одних суток, но и в одни и те же периоды каждых суток, а также недели, месяца, года. В работе проведен анализ граничных условий при введении мероприятий по регулированию стока, разработаны математическая модель и алгоритм решения задачи внутрисуточного регулирования, описывающий последовательность действий для решения задачи «сглаживания» подаваемых расходов в нижний бьеф Нижегородского низконапорного гидроузла. Реализация предложенных мероприятий осуществляется по трехступенчатому (или двухступенчатому) графику регулирования расхода и уровня воды. Предлагаемые мероприятия позволят улучшить гидравлические и гидрологические условия нижнего бьефа Нижегородского низконапорного гидроузла, при которых за счет более равномерного и щадящего режима попусков воды будут достигнуты необходимые глубины для судоходства, а также созданы условия для смягчения эрозионных процессов на нижележащем участке.

**Ключевые слова:** Нижегородский низконапорный гидроузел, нижний бьеф, неравномерность сбросов воды, расходы воды, суточный гидрограф, транспортный попуск, математическая модель, граничные условия, алгоритм регулирования стока, колебание уровней воды, кривые свободной поверхности воды, переформирование русла.

## **Mathematical model and algorithmic process of solving the problem of the intra-day regulation of discharge of water through the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex**

**Alexander N. Sitnov<sup>1</sup>**

**Sergey O. Ageev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*The Administration of The Volga Pool of Internal Waterways, Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Introduction of measures for intra-day of regulating incoming water flow rates from the Nizhny Novgorod HPP and their discharge through the spillway of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex requires a specific algorithm for dispatcher

actions of the created hydraulic system. At the same time, there are serious difficulties in predicting the water regime in time. As previous studies have shown there is a large unevenness and irregularity of water discharges not only during one day, but also in the same periods of every day, as well as week, month, and year. This article analyzes the boundary conditions when introducing measures of regulating runoff, develops a mathematical model and an algorithm for solving the problem of intraday regulation, describing the sequence of actions for solving the problem of "smoothing" the flow rates supplied to the lower stream of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. The implementation of the proposed measures is carried out according to a three-stage (or two-stage) schedule for regulating the flow rate and water level. The proposed measures will improve the hydraulic and hydrological conditions of the downstream reach of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex by which the necessary depths for navigation will be created. Conditions have also been made to mitigate erosion processes

**Keywords:** Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex, the downstream reach, water discharges irregularity, water flow rates, the daily hydrograph, transport release, mathematical model, boundary conditions, discharge control algorithm, water level fluctuation, free water surface curves, channel reshaping.

### Введение

Проведенные исследования, отраженные в работах [1, 2, 3], показали высокую неравномерность сбрасываемых расходов с Нижегородской ГЭС (ННГЭС). Режим прохождения расходов воды через створ низконапорного гидроузла будет в основном соответствовать режиму сбросов с ННГЭС, не улучшая условий судоходства в нижнем бьефе по сравнению с существующим состоянием и может повлечь интенсивное переформирование дна реки ниже створа Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ).

Данную неравномерность предлагается сгладить введением внутрисуточного регулирования поступающих с ННГЭС расходов при их сбросе через створ ННГУ, тем самым улучшить судоходное состояние участка реки, расположенного в нижнем бьефе ННГУ (от ННГУ до р.п. Работки (место выклинивания подпора Чебоксарского водохранилища при отметке 63,0 м БС). В работах [4, 5, 6] обоснована необходимость, возможность и целесообразность регулирования стока на водосливе ННГУ путем подачи в нижний бьеф (НБ) ННГУ более равномерного расхода воды в течение суток.

### Методические особенности регулирования стока через ННГУ

Решение задачи сведено к трансформации суточного гидрографа ННГЭС в суточный гидрограф ННГУ с учетом наложенных ограничений [7], целью которых является минимизация отклонений интервальных расходов воды через ННГУ  $Q_i$  от среднесуточного расхода  $Q_{сут}$ :

$$Q_i^{ННГУ} X_{Qi} - \bar{Q}_{сут}^{ННГЭС} \rightarrow \min, \forall i, \quad (1)$$

где  $i$  – период регулирования,  $i = \overline{1, n}$ ;

$Q_i^{ННГУ}$  – расход воды через створ ННГУ в  $i$  – ом периоде, м<sup>3</sup>/с;

$X_{Qi}$  – переменная, показывающая возможность подачи расхода  $Q$  через ННГУ в  $i$  – ом периоде;

$\bar{Q}_{сут}^{ННГЭС}$  – среднесуточный расход через створ ННГЭС в плановые сутки, м<sup>3</sup>/с.

Расходы  $i$  – ого периода регулирования стока лежат в области изменения расходов ННГУ  $i$  – ого периода от минимальных  $Q_{imin}^{ННГЭС}$  до максимальных  $Q_{imax}^{ННГЭС}$ .

$$(Q_i^{ННГУ} \in Q_{imin}^{ННГЭС} \div Q_{imax}^{ННГЭС})$$

Математическая модель решения задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через ННГУ имеет следующие граничные условия (ГУ)

Граничное условие 1 (ГУ.1). Соблюдение условия транзитности: объем суточного стока, проходящего через Городецкий гидроузел с его корректировкой на потребление и приток воды на водохранилище, должен соответствовать объему стока, сбрасываемого через ННГУ.

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{\text{ННГУ}} t_i X_{Qi} = V_{\text{сут}}^{\text{ННГЭС}} \pm \Delta V_{\text{сут}}, \quad (2)$$

где  $t_i$  – продолжительность  $i$ -х периодов в плановых сутках;

$V_{\text{сут}}^{\text{ННГЭС}}$  – суточный объем сброса воды с ННГЭС;

$\Delta V_{\text{сут}}$  – суточный объем стока, зависящий от приточности водохранилища, потребления воды на осуществление шлюзования и т.д.

Граничное условие 2 (ГУ.2). Расход воды, сбрасываемый в нижний бьеф ННГУ, не должен быть ниже транспортного попуска  $Q_{\text{ТП}}$ , принятого равным  $1140 \text{ м}^3/\text{с}$  [8]. Этим планируется обеспечить глубины в нижнем бьефе ННГУ не ниже гарантируемых без дополнительного комплекса путевых работ.

$$Q_i^{\text{ННГУ}} X_{Qi} \geq Q_{\text{ТП}}, \forall i, \quad (3)$$

Для выполнения ограничения ГУ.2 требуются дополнительные объемы воды, которых в плановых сутках нет, поскольку накопление воды для обеспечения транспортного попуска происходит в период, следующий за «провальным» (ночные и утренние часы). В этой связи объем должен накапливаться раньше и переходить с предыдущих суток на плановые и с плановых на последующие. Накопление данных объемов будет связано с незначительным повышением уровня воды на водохранилище, образованном ННГУ.

Граничное условие 3 (ГУ.3). Уровни воды на водохранилище в створе ННГУ должны находиться в диапазоне значений от минимальных ( $68,0 \text{ м БС}$ ) до максимально возможных ( $Z_{\text{пр}}$ ) по условиям ветро-волнового режима, конструктивных параметров затворов ННГУ и др. характеристикам. По проектным решениям с учетом возможного нагона ветровой волны в створе ННГУ повышение уровня воды равно  $0,6 \text{ м}$  [9] при отметке верха затвора  $69,0 \text{ м БС}$  [10]. В работе расчеты выполнялись до отметки  $68,5 \text{ мБС}$ .

$$Z_i^{\text{ННГУ}} X_{Qi} \leq Z_{\text{пр}}, \forall i, Z_i^{\text{ННГУ}} \in 68,0 \div Z_{\text{пр}} \quad (4)$$

где  $Z_i^{\text{ННГУ}}(x)$  – отметка воды в створе верхнего бьефа ННГУ, соответствующая накопленному объему воды с учетом рассчитанных кривых свободной поверхности воды и подаваемых расходов с ННГЭС. Определяется назначенными расходами  $Q_i^{\text{ННГУ}}$ , сбрасываемыми в  $i$  – х периодах через водослив ННГУ.

$Z_{\text{пр}}$  – предельное значение уровня воды.

Переменная  $X_{Qi}$  равна:

$$X_{Qi} = \begin{cases} 1, & \text{если в } i - \text{ом периоде через ННГУ сбрасывается расход } Q; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (5)$$

Для решения задачи исследуется возможность водохранилища для накопления необходимых объемов воды при выполнении ограничений ГУ.2 и ГУ.3, для чего строится совокупность кривых свободной поверхности воды (СПВ) на участке при разных расходах ННГЭС и отметках уровней воды в створе ННГУ [11]. Построение кривых СПВ выполняется по методу Н.Н. Павловского. При расчете кривых СПВ

применяются уравнения неравномерного движения, учитывающие действие силы тяжести и линейные потери напора в условиях зависимости модуля сопротивления от среднего уровня воды на расчетном участке. Результаты расчета представлены в виде кривых СПВ на исследуемом участке (рисунок 1) и в таблицах 2, 3, в которых приведены величины объемов воды в водохранилище, в том числе дополнительных при отметках уровней в диапазоне 68,0 – 68,5 м БС в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС.

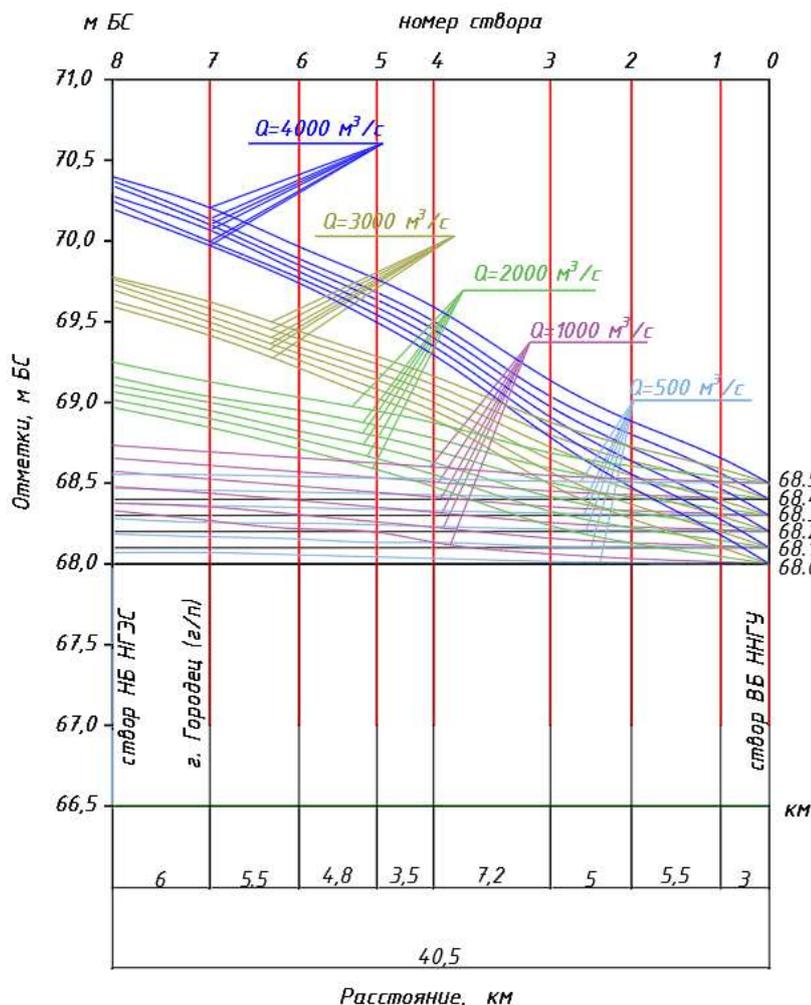


Рис. 1. Кривые свободной поверхности воды на участке ННГУ – ННГЭС

Расчет кривых СПВ, их графическое представление, а также анализ полученных результатов по изменению уровней воды в водохранилище и связанных с этим изменением выработки мощности Нижегородской ГЭС позволяют сделать следующие выводы:

1. При отсутствии регулирования в створе ННГУ (отметка верхнего бьефа (ВБ) ННГУ 68,0 м БС) уровни в створе НБ ННГЭС при расходах 500 - 4000 м³/с повышаются на 8,8 - 219,8 см.

2. При регулировании стока в створе ННГУ (отметка ВБ ННГУ 68,1 - 68,5 м БС) уровни в створе НБ ННГЭС в сопоставимых условиях повышаются на несколько большую величину, чем при отсутствии регулирования. Однако интенсивность

повышения уровня воды (УВ) в створе НБ ННГЭС при увеличении УВ в створе ВБ ННГУ и увеличении входного расхода замедляется. Так, при повышении отметки 68,0 м БС на 10 см в створе ННГУ, в створе ННГЭС по сравнению с «базовыми» условиями, т.е. без регулирования, отметка повышается на 9,7 см при расходе 500 м<sup>3</sup>/с и на 3,2 см при расходе 4000 м<sup>3</sup>/с. Расчеты кривой свободной поверхности показали, что при повышении отметки 68,0 м БС (в качестве примера) на 40 см в створе ВБ ННГУ, в створе ННГЭС по сравнению с «базовыми» условиями отметка повышается на 38,1 см при расходе 500 м<sup>3</sup>/с и на 13,2 см при расходе 4000 м<sup>3</sup>/с.

3. Изменение уровней воды в ВБ и НБ ННГЭС, ВБ ННГУ сказывается на изменении напора и, как следствие, на выработке мощности ННГЭС:

$$N = g \times Q \times H \times \eta_t \times \eta_g \quad (6)$$

где:  $N$  – среднечасовая мощность Нижегородской ГЭС, кВт;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$Q$  – расход, пропускаемый через турбины, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – напор, м;

$\eta_m$  – коэффициент полезного действия (к.п.д.) турбин (принят 0,85);

$\eta_g$  – коэффициент полезного действия (к.п.д.) генераторов (принят 0,96).

Таким образом, с понижением УВ в ВБ ННГЭС (Горьковское водохранилище) в сопоставимых условиях выработка мощности понижается. С повышением отметки УВ в створе ВБ ННГУ выработка мощности также снижается. С повышением расхода через ННГЭС разница в выработке мощности при экспериментальных значениях УВ увеличивается. Ниже в таблице 1 приведены сравнительные показатели снижения мощности Нижегородской ГЭС при сработке Горьковского водохранилища при эксплуатации водохранилища ННГУ в проектных (без регулирования) и предлагаемых (с введением регулирования) условиях.

Таблица 1

**Снижение выработки мощности Нижегородской ГЭС при различных вариантах наполнения Горьковского водохранилища и водохранилища Нижегородского низконапорного гидроузла**

№ п/п	УВ ВБ ННГЭС, мБС	УВ ВБ ННГУ, мБС	Расход с ННГЭС, м <sup>3</sup> /с	Мощность ГЭС, мВт	Разница, мВт	Разница, %
1	84,0	68,0	500	63,648	1,598	2,51
2	83,6	68,0	500	62,05		
3	84,0	68,0	4000	441,696	12,796	2,90
4	83,6	68,0	4000	428,90		
5	84,0	68,5	500	61,744	1,6	2,59
6	83,6	68,5	500	60,144		
7	84,0	68,5	4000	435,264	12,8	2,94
8	83,6	68,5	4000	422,464		

По результатам расчета можно сделать вывод о том, что при сработке Горьковского водохранилища и функционировании водохранилища ННГУ в проектных условиях (отметка ВБ ННГУ 68,0 мБС) мощность ННГЭС снизится не более чем на 3 %.

Введение регулирования по сравнению с проектными условиями (позиции пар 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 таблицы 1) незначительно увеличат потери мощности ГЭС, которая в абсолютном значении составит 3,0-6,4 мВт и относительно до 3 %. Расчет выполнялся для наиболее неблагоприятных условий (при отметке ВБ ННГУ 68,5

мБС), при этом исследования показали, что предлагаемое внутрисуточное регулирование возможно осуществлять при более низких отметках в водохранилище ННГУ, а соответственно, и потери мощности ННГЭС будут меньше. Тем не менее, такие результаты ставят задачу обоснования требуемых расходов воды через гидроагрегаты ГЭС для выработки плановой мощности, что в условиях отсутствия данных по уровням воды в створе НБ ННГЭС (при определении напора) требует разработки эмпирических подходов.

Обеспечение непревышения допустимых уровней воды у гидроузла (ГУ.3), достигается при в определении объемов воды на водохранилище выше бытовой кривой свободной поверхности воды с отметкой 68,0 м БС в створе ННГУ и установлении соответствия между накопленными объемами и отметкой уровня. При этом накопленный объем фиксируется в течение всех суток в зависимости от расходов воды через ННГЭС и ННГУ.

На основании расчетов кривых свободной поверхности воды (рисунок 1) получены объемы воды в водохранилище  $V$  [13], в том числе дополнительные  $\Delta V$  при отметках УВ в створе ННГУ выше проектной ( $Z_{\text{ННГУ}} > 68,0$  м БС) в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС  $Q_{\text{ННГЭС}}$ .

Результаты расчетов сведены в таблицы 2 и 3.

*Таблица 2*

**Объемы воды в водохранилище над отметкой 68,0 м БС при отметках УВ 68,0 - 68,5 м БС в створе ННГУ в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС, млн. м<sup>3</sup>**

$Q_{\text{ННГЭС}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Z_{\text{ННГУ}}, \text{ м БС}$					
	68,0	68,1	68,2	68,3	68,4	68,5
500	1,87	6,19	10,09	14,76	19,02	23,27
1000	7,21	11,18	15,16	19,19	23,18	27,13
2000	24,19	27,49	29,58	32,73	35,89	39,78
3000	41,51	44,21	46,95	49,60	52,43	55,27
4000	61,24	64,10	66,71	69,35	72,12	74,64

*Таблица 3*

**Дополнительные объемы воды в водохранилище при отметках УВ 68,0 - 68,5 м БС в створе ННГУ в зависимости от подаваемых расходов с ННГЭС, млн. м<sup>3</sup>**

$Q_{\text{ННГЭС}}, \text{ м}^3/\text{с}$	$Z_{\text{ННГУ}}, \text{ м БС}$					
	68,0	68,1	68,2	68,3	68,4	68,5
500	0	4,32	8,22	12,88	17,15	21,40
1000	0	3,96	7,95	11,97	15,96	19,91
2000	0	3,30	5,38	8,53	11,70	15,58
3000	0	2,70	5,45	8,09	10,92	13,76
4000	0	2,86	5,48	8,11	10,88	13,40

Полученные результаты показывают, что при отметке ВБ ННГУ 68,5 м БС возможно накопить до 21,40 млн. м<sup>3</sup>. При анализе объемов нехватки воды в провальные часы в навигацию 2017 года получен вывод о том, что для осуществления регулирования достаточно и 12,88 млн. м<sup>3</sup>, то есть регулирование при выполнении ГУ.2 возможно осуществить при превышении уровня воды в водохранилище ННГУ не более чем на 30 см, то есть до отметки 68,30 мБС.

Решение задачи по разработанной математической модели (1) – (5) имеет многовариантный характер и обладает большой трудоемкостью. Результатом анализа способов решения могут являться следующие подходы:

1. Эвристический подход с решением в виде трехступенчатого графика сбросов расходов через ННГУ:

Предложено: по результатам обработки статистических материалов сутки разбить на три периода с 0 – 10 часов, с 10 до 15 часов, с 15 до 24 часов.

В первом периоде назначаются расходы с учетом переходящих объемов воды с предыдущих суток для покрытия нехватки воды в этом периоде и максимальным приближением расхода ННГУ к среднесуточному значению для неперевышения критических объемов. Затем назначаются расходы ННГУ в третьем периоде с учетом накопления переходящего объема воды на следующие сутки и неперевышением критических объемов в периоде и обеспечением транспортного попуска.

Во втором периоде назначаются расходы ННГУ из условия выполнения транзитности стока.

2. Подход с результатом решения в виде двухступенчатого графика сбросов расходов через ННГУ аналогичен первому (в виде трехступенчатого графика) подходу с объединением второго и третьего периода (по возможности).

Для реализации предложенного режима решается задача регулирования стока затворами ННГУ в условиях совпадения моментов регулирования с началом – окончанием принятых параметров по времени и величине расходов в соответствии с их трехступенчатой формой. В случае если запасов воды в водохранилище ННГУ достаточно, второй и третий периоды объединяются, и строится двухступенчатый график.

Укрупненный алгоритм решения задачи регулирования стока в статье представлен в виде последовательности действий (операций), исходя из следующих соображений:

1. Первый этап сводится к получению исходных данных с Нижегородской ГЭС. По плановым часовым выработкам мощности ННГЭС на предстоящие сутки формула (6) и разработанным уравнениям регрессии связи расхода воды и мощности ГЭС с учетом уровней верхнего и нижнего бьефов определяются часовые расходы, поступающие с ННГЭС. Расчет проводится для всей вариации суточных мощностей и по получившимся значениям строится суточный гидрограф ГЭС.

2. Внутрисуточное регулирование величины сбрасываемых расходов через ННГУ возможно в ситуациях, когда избытком объемов воды над среднесуточным значением покрывается их недостаток в «провальные» (ночные – утренние) часы. В связи с тем, что «провальные» расходы предшествуют избыточным и временные рамки текущих суток не позволяют использовать накопившиеся объемы воды на покрытие дефицитов, нужно заранее создавать для этого необходимый запас.

В ситуации малой водности внутрисуточное регулирование может не решить вопрос обеспечения необходимого транспортного попуска, а лишь в определённой степени ослабить негативное влияние «провальных» попусков через ННГЭС. Обеспечение транспортного попуска в таких ситуациях возможно за счет накопления воды в предыдущие периоды большей водности с максимальным приближением момента накопления запаса воды к маловодному периоду. Так, по результатам анализа стока через ННГЭС в навигацию 2017 г. дефицит (избыток) воды на покрытие транспортного попуска в ночные - утренние часы составил: за май ÷ июнь - избыток 20 - 55 млн. м<sup>3</sup>, за август ÷ ноябрь - дефицит 4 - 6 млн. м<sup>3</sup>. Проведённые расчеты с выполнением требований неперевышения предельных уровней воды в створе ННГУ показали, что переходящий запас составляет около 10 млн. м<sup>3</sup>.

В условиях большой водности регулирование целесообразно для снижения амплитуды колебания уровня воды НБ ННГУ с учетом неперевышения критических значений объемов воды на водохранилище ННГУ.

Для обоснования переходящих объемов воды анализируются статистические ряды ее нехватки, определяется обеспеченность этой нехватки методами математической статистики и теории вероятностей [12].

3. По предложенным выше подходам решается задача назначения величины сбрасываемого через ННГУ расхода воды в  $i$ -х периодах.

### Результаты

Решение задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через ННГУ апробировано на конкретных гидрологических материалах участка нижнего бьефа ННГЭС и в качестве примера приведены гидрографы и графики колебания уровней воды на 10.10.2017 г. (рисунки 2, 3). При этом на рисунке 2 представлены решения по трехступенчатому регулированию уровня воды (которое планируется осуществлять в более критических ситуациях с целью снижения отметки уровня накопленной воды в верхнем бьефе ННГУ). Однако учитывая, что входные расходы воды с ННГЭС на конкретные сутки (на 10.10.2017 г.) и объемы накопленной воды для осуществления регулирования не превышают предельных отметок уровня воды в верхнем бьефе ННГУ (граничное условия (ГУ.3) выполняется), возможно ввести (для упрощения решений по эксплуатации) двухступенчатое регулирование, пример регулирования которого представлен на рисунке 3.

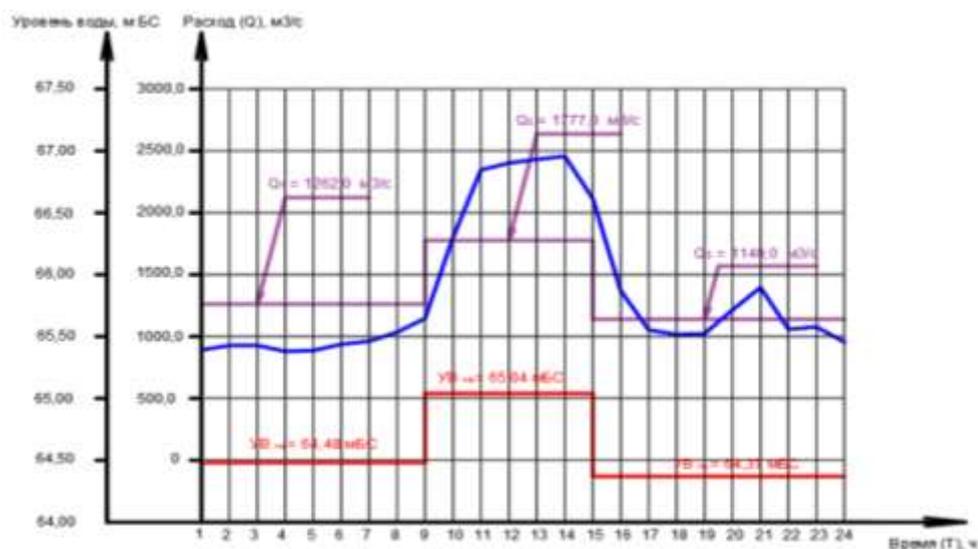


Рис. 2. График хода расходов ННГЭС, ННГУ и уровней воды нижнего бьефа ННГУ при суточном регулировании на примере 10.10.2017 г. (трехступенчатый график регулирования стока)

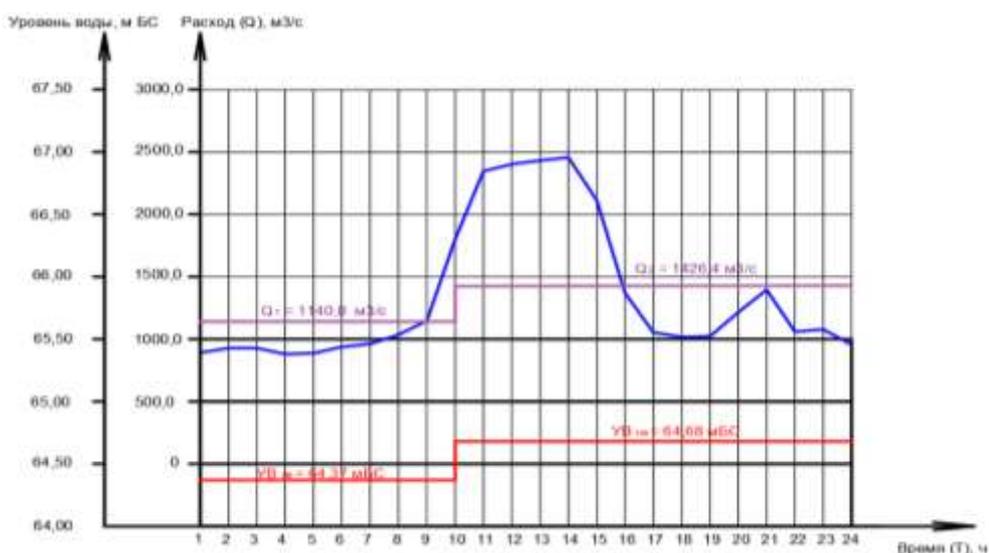


Рис. 3. График хода расходов ННГЭС, ННГУ и уровней воды нижнего бьефа ННГУ при суточном регулировании на примере 10.10.2017 г. (двухступенчатый график регулирования стока)

Оценивая параметры хода расходов и уровней воды в бьефах ННГУ, возможно сделать вывод о достижении введением внутрисуточного регулирования их более сглаженного характера в сравнении с проектными условиями (без регулирования).

### Заключение

Таким образом, при введении мероприятий по регулированию входных расходов на водосливе ННГУ по разработанной модели решаются следующие задачи:

1. В периоды «провальных» расходов, поступающих с Нижегородской ГЭС (ниже значений транспортного пускa) путем подачи накопленного объема воды можно достичь повышения отметок уровня воды и, соответственно, глубин участка, что позволит в комплексе с диспетчерским регулированием движения флота улучшить условия судоходства в нижнем бьефе низконапорного гидроузла.

2. Подача в НБ ННГУ более равномерных расходов снизит интенсивность негативного влияния осветленного потока на русловые деформации участка реки [14, 16, 17]. Работой [15] оценен эффект с точки зрения устойчивости НБ ННГУ при снижении амплитудных характеристик таких параметров как расход и уровень воды, скорость течения и сделан вывод о весьма положительном эффекте предложенных решений при минимальных эксплуатационных затратах.

### Литература

1. Агеев, С.О. Анализ проблемных вопросов безопасности судоходства на участке Городец – Нижний Новгород до и после строительства Нижегородского низконапорного гидроузла / С.О. Агеев, М.А. Матюгин // Труды конгресса «Великие реки - 2017». Вып. 6. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с.1-4.
2. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Проектная документация. Этап проектных работ. Корректировка материалов инженерных изысканий по замечаниям ФАУ «Главгосэкспертиза России». Инженерно-гидрометеорологические изыскания. Откорректированный отчет -ООО «ВОЛГАЭНЕРГОПРОЕКТ», 2017. –174 с.

3. Агеев, С.О. Анализ изменений навигационных расходов через Нижегородскую ГЭС в навигацию 2017 года и рекомендации по улучшению водного режима участка р. Волги ниже створа Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ) / С.О. Агеев // Труды конгресса «Великие реки - 2018». Вып. 7. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. – с. 1 - 7.
4. Агеев, С.О. Регулирование сброса воды на неразмываемой модели в состоянии подпора / С.О. Агеев, А.Н. Ситнов // Труды конгресса «Великие реки - 2019». Вып. 8. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2019. – с. 1 - 5.
5. Агеев, С.О. Обоснование целесообразности суточного регулирования стока низконапорным гидроузлом. / С.О. Агеев // Научные проблемы водного транспорта. Вестник ВГАВТ. Вып. 62. - Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – с. 136 - 146.
6. Агеев, С.О. Результаты расчета параметров суточного регулирования стока в створе низконапорного гидроузла и оценка его эффективности. / С.О. Агеев // Морской регистр, 2020. – с. 136 - 146.
7. Агеев, С.О. Методические подходы решения вопросов поддержания безопасных условий судоходства в нижнем бьефе Нижегородского низконапорного гидроузла/ С.О. Агеев, А.Н. Ситнов // Труды конгресса «Великие реки - 2020». Вып. 8. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020. – с. 1 – 5.
8. Ситнов, А.Н. Обоснование параметров обеспеченности водохозяйственных балансов и режима работы водохранилища Нижегородского низконапорного гидроузла / А.Н. Ситнов, Н.В. Кочкурова, Д.А. Мильцын // Вестник ВГАВТ. Вып. 50. - Н. Новгород: Изд–во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 23-31.
9. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Этап проектных работ. Моделирование гидравлических режимов р. Волги на участке от Нижегородской ГЭС до г. Н. Новгород. Отчет 0715-000-ГИД4-1.1.01/09.14 - ОАО «ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ЭНЕГЕТИКИ ПОВОЛЖЬЯ», 2015. – 76 с.
10. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Проектная документация. Этап 2. 16-ти пролётная водосбросная плотина с 6-ти пролётным водосбросом-регулятором, с сопряжениями, эксплуатационной автодорогой по гребню, подкрановыми путями, подводящим и отводящим каналами. 001-РР-2-1.01/06.17. -ООО «ВОЛГАЭНЕРГОПРОЕКТ», 2017. – 129 с.
11. Агеев, С.О. Расчет кривых свободной поверхности воды в водохранилище ННГУ с целью обоснования резервного объема воды для осуществления регулирования / С.О. Агеев, А.Н. Ситнов, В.В. Агеева, Ю.А. Градинар // X Всероссийский фестиваль науки [Электронный ресурс]: сборник докладов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2020. – с. 40 – 44 с.
12. The Theory of Storage. By P. A. P. Moran (Methuen's Monographs on Applied Probability and Statistics). [Pp. 111. London: Methuen and Co. Ltd. New York: Wiley and Sons, Inc., 1959. 13s. 6d.]
13. S. Dutta. Determination of Reservoir Capacity Using Linear Programming / S. Dutta // VIT University, Vellore, Tamil Nadu, India, 2015 – s. 9549 - 9556.
14. Habel, M. Dynamics of the Vistula River chane nel deformations downstream of the Włocławek Reservoir. Wyd. UKW w Bydgoszczy. 2013. S. 138.
15. Агеев, С.О. Мероприятия по снижению негативного воздействия на нижний бьеф нижегородского низконапорного гидроузла / С.О. Агеев, А.Н. Ситнов, В.В. Агеева, Ю.А. Градинар // Труды 5-й всероссийской научной конференции «ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА» («ВОЛГА 2020»). Выпуск 3. - Н. Новгород: Изд–во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2020 – с. 1-5.
16. Graf WL, Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American riversl, Geomorphology/ 79, 2006 - s. 336–360.
17. Simon A. Adjunsment and recovery of unstable alluvial channels: identification and approaches for engineering management// Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 20. 1995.

#### References:

1. Ageev S.O., Matyugin M.A. «Analysis of the problematic issues of shipping safety on the Goro-dets-Nizhny Novgorod section before and after the construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydraulic system»V sbornike: Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-

- promyshlennogo foruma «Velikie reki-2017». Web. 07 Sep. 2019 < <http://www.вф-пека-море.рф/> >
2. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Project documentation. Stage of design work. Hydrometeorological engineering surveys. Corrected report /Volgaenergoproekt. –Samara, 2017 – 174 p.
  3. Ageev, S.O. «Analysis of changes in navigation costs through the Nizhny Novgorod Hydroelectric Power Station in the navigation of 2017 and recommendations for improving the water regime of the r. Volga below the alignment of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex (NNSU)» V sbornike: Trudy 20-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2018»
  4. Ageev, S.O. « Regulation of water on nerazmyvaemoy models able to Prop» V sbornike: Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2019»
  5. Ageev, S.O. «Drain regulation of low-headed hydraulic unit» Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta 62 (2020): p. 136–146.
  6. Ageev, S.O. « Results of calculation of daily flow regulation parameters in the range of a low-pressure hydraulic unit and its efficiency evaluation» Research bulletin by russian maritime register of shipping (2020): p. 136 - 146
  7. Ageev, S.O. «Methodological approaches to solving the safety conditions of navigation in the lower beef of the nizhny novgorod lowpressure hydraulic unit» V sbornike: Trudy 20-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2020»
  8. Sitnov, A.N. «Substantiation of the parameters of the supply of water balances and the operation mode of the reservoir of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex» Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta 50 (2017): p. 23–31
  9. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Stage of design work. Modeling of hydraulic regimes of the Volga river on the section from the Nizhny Novgorod hydroelectric power station to the city of Nizhny Novgorod / Volga region energy engineering center, 2015 – 76 p.
  10. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Project documentation. Stage 2. 16-span spillway dam with 6-span spillway regulator, with interfaces, operational highway along the ridge, crane tracks, supply and discharge channels /Volgaenergoproekt, 2017 – 129 p.
  11. Ageev, S.O. «Calculation of free water surface curves in the reservoir of the UNN state university for the purpose of justification reserve volume of water for regulation»
  12. The Theory of Storage. By P. A. P. Moran (Methuen's Monographs on Applied Probability and Statistics). [Pp. 111. London: Methuen and Co. Ltd. New York: Wiley and Sons, Inc., 1959. 13s. 6d.]
  13. S. Dutta. Determination of Reservoir Capacity Using Linear Programming / S. Dutta // VIT University, Vellore, Tamil Nadu, India, 2015 – s. 9549 - 9556.
  14. Habel, M. Dynamics of the Vistula River channel deformations downstream of the Włocławek Reservoir. Wyd. UKW w Bydgoszczy. 2013. S. 138.
  15. Ageev, S.O. « Interventions to reduce the negative impact on the downstream reach of the nizhegorodskiy low head hydropower plant»
  16. Graf WL, Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers, Geomorphology/ 79, 2006 - s. 336–360.
  17. Simon A. Adjustment and recovery of unstable alluvial channels: identification and approaches for engineering management// Earth Surface Processes and Landforms. Vol. 20. 1995.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ситнов Александр Николаевич**, профессор, д.т.н., заведующий кафедрой водных путей и гидротехнических сооружений, Волжский государственный университет водного транспорта 603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: stnv1952@rambler.ru.

**Агеев Сергей Олегович**, главный геолог

**Alexander N. Sitnov**, Doctor in Engineering Science, head of the Department of waterways and hydraulic structures, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st, Nizhny Novgorod, 603951, Russia

**Sergey O. Ageev**, Chief geologist (deputy chief)

(заместитель начальника) службы главного маркшейдера, Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей (ФБУ «Администрация Волжского бассейна»), 603001 г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, д. 21 «Б», e-mail: gg6258@yandex.ru. of the service of the chief surveyor, The Administration Of The Volga Pool Of Internal Waterways, 21 «B», Rozhdestvenskaya st, Nizhniy Novgorod, 603001

Статья поступила в редакцию 22.01.2021; опубликована онлайн 23.03.2021.  
Received 22.01.2021; published online 23.03.2021.