

УДК 626.824-52

UDC 626.824-52

05.00.00 Технические науки

Technical Sciences

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЛИНЕЙНО  
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПОПУСКОВ  
СБРОСНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ  
ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩА**

**HYDRAULIC DESIGN OF LINEARLY  
DISTRIBUTED RELEASES OF STORED WATER  
DISCHARGES**

Иваненко Юрий Георгиевич  
д-р техн. наук, профессор кафедры  
«Водоснабжение и использование водных  
ресурсов»  
SPIN-код автора: 2715-4838  
E-mail: [pavodok37@gmail.com](mailto:pavodok37@gmail.com)  
*Новочеркасский инженерно-мелиоративный  
институт имени А.К. Кортунова ФГБОУ ВО  
Донской ГАУ, Новочеркасск, Россия*

Ivanenko Yury Georgievich  
Dr.Sci.Tech., Professor of the chair “Water supply and  
water resources use”  
SPIN-code: 2715-4838  
E-mail: [pavodok37@gmail.com](mailto:pavodok37@gmail.com)  
*Novocherkassk Engineering Meliorative Institute named  
after A.K.Kortunov, FSBEI HE Donskoi SAU,  
Novocherkassk, Russia*

Ткачёв Александр Александрович  
д-р техн. наук, профессор кафедры  
«Гидротехническое строительство»  
SPIN-код автора: 4732-0239  
E-mail: [gts\\_i\\_sm.nimi@mail.ru](mailto:gts_i_sm.nimi@mail.ru)  
*Новочеркасский инженерно-мелиоративный  
институт имени А.К. Кортунова ФГБОУ ВО  
Донской ГАУ, Новочеркасск, Россия*

Tkachev Aleksandr Aleksandrovich  
Dr.Sci.Tech., Professor of the chair “Hydraulic  
Engineering construction”  
SPIN-code: 4732-0239  
E-mail: [gts\\_i\\_sm.nimi@mail.ru](mailto:gts_i_sm.nimi@mail.ru)  
*Novocherkassk Engineering Meliorative Institute named  
after A.K.Kortunov, FSBEI HE Donskoi SAU,  
Novocherkassk, Russia*

Гурин Константин Георгиевич  
к.т.н., профессор кафедры «Водоснабжение и  
использование водных ресурсов»  
SPIN-код автора: 9483-0262  
E-mail: [gurin-knstantin@rambler.ru](mailto:gurin-knstantin@rambler.ru)  
*Новочеркасский инженерно-мелиоративный  
институт имени А.К. Кортунова ФГБОУ ВО  
Донской ГАУ, Новочеркасск, Россия*

Gurin Konstantin Georgievich  
Candidate of Tech.Sci, Professor of the chair “Water  
supply and water resources use”  
SPIN-code: 9483-0262  
E-mail: [gurin-knstantin@rambler.ru](mailto:gurin-knstantin@rambler.ru)  
*Novocherkassk Engineering Meliorative Institute named  
after A.K.Kortunov, FSBEI HE Donskoi SAU,  
Novocherkassk, Russia*

Иваненко Дмитрий Юрьевич  
аспирант  
E-mail: [pavodok37@gmail.com](mailto:pavodok37@gmail.com)  
*Новочеркасский инженерно-мелиоративный  
институт имени А.К. Кортунова ФГБОУ ВО  
Донской ГАУ, Новочеркасск, Россия*

Ivanenko Dmitry Yurevich  
postgraduate  
E-mail: [pavodok37@gmail.com](mailto:pavodok37@gmail.com)  
*Novocherkassk Engineering Meliorative Institute named  
after A.K.Kortunov, FSBEI HE Donskoi SAU,  
Novocherkassk, Russia*

Цель настоящей работы заключается в разработке методов гидравлического расчета экстремальных расходов и глубин воды в критических створах водотоков, отводящих воду от водосбросных сооружений, для принятого закона регулирования линейно распределенных попусков сбросных расходов воды из водохранилищ. Задача регулирования линейно распределенных попусков сбросных расходов воды из водохранилищ основана на гидравлическом расчете процесса распространения и трансформации длинных волн, описываемых уравнениями Сен-Венана. Эти уравнения нелинейны и в общем случае не имеют точного решения. Для получения приближенных решений их линеаризуют. Установлено, что задача интегрирования этих уравнений предполагает

The purpose of the article is to develop methods for hydraulic design of extreme discharges and water depths in critical gage lines of waterways diverting water from spillways for the accepted law to regulate linearly distributed releases of stored water discharges. The task of control for linearly distributed releases of stored water discharges is based on hydraulic design for the process of propagation and transformation of long waves described with Saint Venant equations. These equations are nonlinear and have no accurate solution in general case. To get approximate solutions they are linearized. It is established that the task of integration for these equations supposes to get their preliminary solution in the form of complete integral. Applying the complete integral theory we get analytical solution that describe the process of transformation for one direction waves moving in

предварительное получение их общего решения в виде полного интеграла. С применением теории полного интеграла получены аналитические решения, которые описывают процесс трансформации волн одного направления, движущихся в бесконечно длинном призматическом канале полуограниченной протяженности с начальным равномерным режимом течения воды. Приведен пример расчета изменений расхода воды и глубины потока в двух фиксированных створах нижнего бьефа гидроузла на расстоянии 5000 и 10000 м от начального створа. Гидравлический расчет осуществлен по выведенным в работе аналитическим формулам и принятому в качестве образца классическому методу характеристик, который рассматривается как аналоговый. Сравнение результатов расчетов по двум методам позволило определить максимальную относительную погрешность, которая для расчетных расходов воды и глубин не превышает 3,5 %. Внедрение разработанного метода гидравлического расчета линейно распределенных пусков сбросных расходов на водотоках, отводящих воду от водосбросных сооружений, позволит оптимизировать холостые и нетехнологические сбросы воды из водохранилищ

Ключевые слова: ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ, ЧАСТНЫЕ ПРОИЗВОДНЫЕ, ИНТЕГРИРОВАНИЕ, ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ, СБРОСНЫЕ РАСХОДЫ, ВОДОХРАНИЛИЩЕ, ГИДРОУЗЕЛ

infinitely long prism canal of semi-bounded extent with initial uniform regime of water flow. An example of changes in both water discharge and flow depths in two fixed downstream gage lines of hydraulic works at the distance of 5000 and 10000 m from the initial gage line is presented. Hydraulic design was carried out according to the derived analytical formulas accepted as an example classical method of characteristics that is considered as analogous. Comparison of the design results on two methods allowed to determine the maximum relative error that does not exceeds 3,5 % for the design discharges and water depths. Introduction of the developed method for hydraulic design of linearly distributed releases of discharges in waterways diverting water from spillways will make it possible to optimize idle and non-technological stored water discharges

Keywords: DIFFERENTIAL EQUATION, INDIVIDUAL DERIVATIVES, INTEGRATION, HYDRAULIC DESIGN, DISCHARGES, RESERVOIR, HYDRAULIC WORKS

DOI: 10.21515/1990-4665-125-013

## Введение.

Гидравлический расчет расходов и глубин воды водотоков в нижних бьефах гидроузлов, осуществляющих пуски сбросных расходов воды из водохранилищ, представляет собой сложный процесс, основанный на применении закона регулирования режима водоподачи. Одновременное прямое измерение гидравлических характеристик в контролируемых створах водотоков затруднено даже при установившемся режиме течения воды. Из-за отсутствия проверенных и практически осуществимых методов измерения расходов и глубин воды в расчетных створах водотоков в настоящее время ощущается недостаток данных для уверенного прогнозирования экстремальных значений расходов и глубин воды в нижних бьефах гидроузлов [1–4].

Цель настоящей работы заключается в разработке методов гидравлического расчета экстремальных расходов и глубин воды в критических створах водотоков, отводящих воду от водосбросных сооружений, для принятого закона регулирования линейно распределенных попусков сбросных расходов воды из водохранилищ.

### Постановка и решение задачи

Задача регулирования линейно распределенных попусков сбросных расходов воды из водохранилищ основана на гидравлическом расчете процесса распространения и трансформации длинных волн, описываемых уравнениями Сен-Венана [4]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2U \frac{\partial Q}{\partial x} - (U^2 - C^2) B \frac{\partial H}{\partial x} - g\omega \left( i_0 - \frac{U^2}{C_{ш}^2 R} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial H}{\partial t} = 0, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $t$  – время, с;  $U$  – средняя скорость течения воды в сечении, м/с;  $x$  – пространственная координата, м;  $C$  – скорость распространения начального возмущения, м/с;  $B$  – ширина водотока по урезу воды, м;  $H$  – глубина потока, м;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\omega$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $i_0$  – уклон дна водотока;  $C_{ш}$  – коэффициент Шези, м<sup>0,5</sup>/с;  $R$  – гидравлический радиус, м.

В качестве граничных условий на внешних границах рассматриваемого водотока применяются функции изменения расходов или глубин во времени в виде  $Q(t)$  и  $H(t)$  или зависимости вида  $Q=f(H)$ . Во внутренних узлах рассматриваются условия равенства глубин, баланса расходов и др.

В качестве начального условия принимается состояние гидравлического режима, близкое к установившемуся.

Дифференциальные уравнения (1) и (2) – нелинейные и в общем

случае не имеют точного решения. Для получения приближенных решений эти уравнения линеаризуют [5–7].

Разложим значения расхода и глубины на составляющие в виде:

$$H = H_0 + \Delta H, \quad Q = Q_0 + \Delta Q, \quad (3)$$

где  $\Delta H$  – малое возмущение глубины потока, м;  $\Delta Q$  – малое возмущение расхода воды, м<sup>3</sup>/с.

Уравнения возмущенного течения запишем в виде:

$$\frac{\partial \Delta Q}{\partial t} + 2U_0 \frac{\partial \Delta Q}{\partial x} - (U_0^2 - C_0^2) B_0 \frac{\partial \Delta H}{\partial x} + \frac{2gi_0}{U_0} \Delta Q - (2gi_0 - i_0 C_0^2 \Phi) B_0 \Delta H = 0, \quad (4)$$

$$B_0 \frac{\partial \Delta H}{\partial t} + \frac{\partial \Delta Q}{\partial x} = 0, \quad (5)$$

где параметры с индексом «0» отвечают режиму невозмущенного течения воды. Их наименования и единицы измерения приведены выше;

$\Phi$  – параметр, определяемый элементами невозмущенного течения и зависящий от формы поперечного сечения русла.

Можно определить, в частности, для трапецеидального сечения [1]:

$$\Phi = (1 + 2y) \left[ \frac{2\sqrt{1+m^2}}{b + 2H_0\sqrt{1+m^2}} - \frac{b + 2mH_0}{(b + mH_0)H_0} \right], \quad (6)$$

где  $y$  – показатель степени в формуле Шези, зависящий от величины коэффициента шероховатости и гидравлического радиуса;  $m$  – заложение откоса;  $b$  – ширина русла по дну.

В уравнениях (4), (5) параметры  $\Delta H$  и  $\Delta Q$  носят название малых возмущений глубины и расхода и отвечают режиму возмущенного течения. Они характеризуют изменение глубины и расхода относительно начального положения.

Преобразуем дифференциальное уравнение (4) к виду:

$$\frac{\partial \Delta Q}{\partial t} + 2U_0 \frac{\partial \Delta Q}{\partial x} - (U_0^2 - C_0^2) B_0 \frac{\partial \Delta H}{\partial x} = -\bar{\Pi} [\Delta Q - (U_0 \mp C_0) B_0 \Delta H], \quad (7)$$

где  $\bar{\Pi}$  – параметр, определяемый по зависимости:

$$\bar{\Pi} = \frac{(\beta \frac{\Delta \bar{Q}}{B_0 \Delta H} - \gamma)}{[\frac{\Delta \bar{Q}}{B_0 \Delta H} - (U_0 \mp C_0)]}; \quad (8)$$

$$\beta = \frac{2gi_0}{U_0}, \quad \gamma = (2gi_0 - i_0 C_0^2 \Phi), \quad C_0 = \sqrt{g \frac{\omega_0}{B_0}} \text{ – параметры формы русла;}$$

$\Delta \bar{Q}$  и  $\Delta \bar{H}$  – осредненное значение возмущений по расходу и глубине потока на участке дифференцирования.

Произведем подстановку вида:

$$\Delta Q = (U_0 \mp C_0) B_0 \Delta H - \frac{K}{\bar{\Pi}} e^{-\bar{\Pi} t} - \frac{P}{\bar{\Pi}} e^{-\frac{\bar{\Pi} x}{(U_0 \pm C_0)}}, \quad (9)$$

где  $K, P$  – постоянные;

$e$  – основание натурального логарифма,  $e = 2,718$ ;

Система уравнений (5), (7) приводится к одному дифференциальному уравнению в частных производных первого порядка относительно функции  $\Delta Q$ :

$$\frac{\partial \Delta Q}{\partial t} + (U_0 \mp C_0) \frac{\partial \Delta Q}{\partial x} = K e^{-\bar{\Pi} t}. \quad (10)$$

Общим решением дифференциального уравнения (10) является соотношение в виде полного интеграла:

$$\Delta Q = \Phi[x - (U_0 \mp C_0)t] - \frac{K}{\bar{\Pi}} e^{-\bar{\Pi} t} + C, \quad (11)$$

где функция  $\Phi$  и постоянный параметр  $C$  определяются из граничных условий [8].

Применив теорию полного интеграла, будем искать решение, которое описывает процесс трансформации волны одного направления, движущейся в бесконечно длинном призматическом канале с начальным равномерным режимом течения воды [9, 10].

Пусть граничное условие в створе возмущения задается в виде:

$$\Delta Q(0, t) = \xi \cdot t, \quad (12)$$

где  $\xi$  – постоянный параметр.

Подставив выражение (12) в уравнение полного интеграла (11), получим:

$$\xi \cdot t = -\Phi[(U_0 \mp C_0)t] - \frac{K}{\Pi} e^{-\bar{\Pi}t} + C. \quad (13)$$

В уравнениях (9)–(13) все обозначения и единицы измерения приведены выше.

Уравнение (13) продифференцируем по независимой переменной  $t$ :

$$\xi = -\Phi(U_0 \mp C_0) + K e^{-\bar{\Pi}t}. \quad (14)$$

Из (14) найдем выражение для  $t$ :

$$t = -\frac{1}{\bar{\Pi}} \ln \left| \frac{\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)}{K} \right|. \quad (15)$$

Исключив из двух соотношений: (13) и (15) переменную  $t$ , получим:

$$\begin{aligned} -\frac{\xi}{\bar{\Pi}} \ln \left| \frac{\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)}{K} \right| &= \frac{\Phi(U_0 \mp C_0)}{\bar{\Pi}} \ln \left| \frac{\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)}{K} \right| - \\ &-\frac{[\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)]}{\bar{\Pi}} + C. \end{aligned} \quad (16)$$

Из соотношения (16) определяется значение постоянного параметра  $C$ .

Подставив соотношение (16) в уравнение (11), найдем:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Phi[x - (U_0 \mp C_0)t] - \frac{K}{\bar{\Pi}} e^{-\bar{\Pi}t} - \frac{\xi}{\bar{\Pi}} \ln \left| \frac{\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)}{K} \right| - \\ &-\frac{\Phi(U_0 \mp C_0)}{\bar{\Pi}} \ln \left| \frac{\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)}{K} \right| + \frac{[\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)]}{\bar{\Pi}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Продифференцируем соотношение (17) по параметру  $\Phi$  и полученное выражение приравняем к нулю:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta Q}{\partial \Phi} = & [x - (U_0 \mp C_0)t] - \frac{\xi(U_0 \mp C_0)}{\Pi[\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)]} - \\ & - \frac{(U_0 \mp C_0)}{\Pi} \ln \left| \frac{\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)}{K} \right| - \\ & - \frac{\Phi(U_0 \mp C_0)^2}{\Pi[\xi + \Phi(U_0 \mp C_0)]} + \frac{(U_0 \mp C_0)}{\Pi} = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Из выражения (18) определим параметр  $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{K}{(U_0 \mp C_0)} e^{\frac{\bar{\Pi}[x - (U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}} - \frac{\xi}{(U_0 \mp C_0)}. \quad (19)$$

Подставив соотношение (19) в выражение (17), получим искомое решение в виде:

$$\Delta Q = \frac{K}{\Pi} e^{\frac{\bar{\Pi}[x - (U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}} - \frac{K}{\Pi} e^{-\bar{\Pi}t} - \frac{\xi[x - (U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}. \quad (20)$$

Глубина воды определяется из соотношения (9) следующим образом:

$$\begin{aligned} B_0 \Delta H = & \frac{K}{\Pi(U_0 \mp C_0)} e^{\frac{\bar{\Pi}[x - (U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}} - \frac{\xi[x - (U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)^2} + \\ & + \frac{P}{\Pi(U_0 \mp C_0)} e^{\left[ \frac{-\bar{\Pi}x}{(U_0 \pm C_0)} \right]}. \end{aligned} \quad (21)$$

Связь между постоянными параметрами  $K$  и  $P$  находится из граничных условий:

$$\Delta Q = 0, \Delta H = 0 \text{ при } t=0, x=0. \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) в соотношения (20) и (21), найдем:

$$P = -K.$$

Соотношения (20) и (21) можно преобразовать к виду:

$$\Delta Q = \frac{K}{\Pi} e^{\frac{\bar{\Pi}[x - (U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}} - \frac{K}{\Pi} e^{-\bar{\Pi}t} - \frac{\xi[x - (U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}, \quad (23)$$

$$B_0 \Delta H = \frac{K}{\bar{\Pi}(U_0 \mp C_0)} e^{\frac{\bar{\Pi}[x-(U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}} - \frac{\xi[x-(U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)^2} - \frac{K}{\bar{\Pi}(U_0 \mp C_0)} e^{\frac{-\bar{\Pi}x}{(U_0 \pm C_0)}}. \quad (24)$$

Постоянный параметр  $K$  определяется из граничных условий:

$$\Delta Q = 0, \Delta H = 0, t = T, x = (U_0 \pm C_0)T, \quad (25)$$

где  $T$  – время распространения начального возмущения до расчетного створа  $x$ , вычисляется по формуле:

$$T = \frac{x}{(U_0 \pm C_0)}. \quad (26)$$

Подставляем выражение (25) в соотношение (23) или (24) и находим:

$$P = \pm \frac{2\xi \bar{\Pi} C_0 T}{(U_0 \mp C_0) \left( e^{\pm \frac{2\bar{\Pi} C_0 T}{(U_0 \mp C_0)}} - e^{-\bar{\Pi} T} \right)}. \quad (27)$$

Введем соотношение (27) в выражения (23) и (24). После чего можно определить:

$$\Delta Q = -\frac{\xi}{(U_0 \mp C_0)} [x - (U_0 \mp C_0)t] \pm 2\xi C_0 T \frac{\left( e^{\frac{\bar{\Pi}[x-(U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}} - e^{-\bar{\Pi}t} \right)}{\left( e^{\pm \frac{2\bar{\Pi} C_0 T}{(U_0 \mp C_0)}} - e^{-\bar{\Pi}T} \right)}, \quad (28)$$

$$B_0 \Delta H = -\frac{\xi}{(U_0 \mp C_0)^2} [x - (U_0 \mp C_0)t] \pm 2\xi C_0 T \frac{\left( e^{\frac{\bar{\Pi}[x-(U_0 \mp C_0)t]}{(U_0 \mp C_0)}} - e^{\frac{-\bar{\Pi}x}{(U_0 \pm C_0)}} \right)}{\left( e^{\pm \frac{2\bar{\Pi} C_0 T}{(U_0 \mp C_0)}} - e^{-\bar{\Pi}T} \right)}. \quad (29)$$

Соотношения (28) и (29) являются точными решениями уравнений (4), (7), удовлетворяющими также граничному условию (12). Сетка координат для полученных решений является прямоугольной. В соотношениях (28), (29) берется верхний знак, если направление движения возмущения совпадает с направлением течения воды в водотоке. В противном случае берется знак нижний. Параметр  $\bar{\Pi}$  определяется из уравнения (8), рассматриваемого в виде:

$$\bar{\Pi} = \frac{(\beta \frac{(\bar{Q} - Q_0)}{B_0(\bar{H} - H_0)} - \gamma)}{[\frac{(\bar{Q} - Q_0)}{B_0(\bar{H} - H_0)} - (U_0 \mp C_0)]}, \quad (30)$$

где  $\bar{Q}$  и  $\bar{H}$  – средние значения расхода и глубины на расчетном участке, которые рассчитываются следующим образом:

$$\bar{Q} = \frac{Q_k + Q_0}{2},$$

$$\bar{H} = \frac{H_k + H_0}{2},$$

где  $Q_k$  – расход воды, определяемый из краевого условия (13) при значении  $t = t_k$ , м<sup>3</sup>/с;  $H_k$  – глубина воды, соответствующая расходу, определяемому из краевого условия (13) при значении  $t = t_k$ , м;  $Q_0$  – начальное значение расхода на расчетном участке, м<sup>3</sup>/с;  $H_0$  – начальное значение глубины на расчетном участке, м.

### **Внедрение и оценка эффективности**

Аналитические решения (28) и (29), полученные из предположения изменения расхода в створе возмущения по линейному закону (12), могут быть обобщены для реальных гидрографов попусков. В этом случае кривую гидрографа с любой степенью точности заменяют линейно аппроксимирующей ломаной линией. Зная решение нестационарной задачи для одной ступени, можно получить суммарное решение для всех ступеней.

Разработанный метод гидравлического расчета экстремальных расходов и глубин воды в критических створах водотоков, отводящих воду от водосбросных сооружений, для принятого закона регулирования линейно распределенных попусков сбросных расходов воды из водохранилищ обеспечивает:

- универсальность, заключающуюся в возможности определения

расходов и глубин воды в фиксированных створах при любых режимах неустановившегося, медленно изменяющегося режима течения воды;

- возможность повышения точности определения расходов и глубин воды. Это достигается использованием в качестве расчетных формул соотношений, являющихся точными аналитическими решениями уравнений неустановившегося, плавно изменяющегося режима течения воды.

Внедрение разработанного метода на водотоках с применением аналитических решений дифференциальных уравнений Сен-Венана позволит оптимизировать процессы водоизмерения и минимизировать холостые и нетехнологические сбросы воды.

Рассмотрим пример расчета по разработанному методу. При сбросе воды из водохранилища изменение расхода в начальном створе ( $x = 0$ ) нижнего бьефа гидроузла подчиняется закону (12):

$$Q=520+0,05t; \quad 0 \leq t \leq 3600 \text{ с.}$$

Рассчитаем изменения расхода воды и глубины потока в фиксированных створах  $x = 5000$  м и  $x = 10000$  м, если в начальный момент в призматическом русле реки на расчетном участке наблюдался режим течения, близкий равномерному. Морфометрические характеристики и гидравлические параметры на расчетном участке реки, соответствующие равномерному режиму течения, следующие:  $Q = 520$  м<sup>3</sup>/с;  $U_0 = 0,912$  м/с;  $H_0 = 3,799$  м;  $m = 0$ ;  $b = 150,0$  м;  $n = 0,02$ ;  $i_0 = 0,00006$ ;  $y = 1/6$ .

По приведенным выше формулам определим параметры  $C_0$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\bar{P}$ ,  $\Phi$ :

$$C_0 = \sqrt{g \frac{\omega_0}{B_0}}, \quad C_0 = \sqrt{9,81 \times 3,799} = 6,687 \text{ м/с,}$$

$$\beta = \frac{2gi_0}{U_0}, \beta = \frac{2 \times 9,81 \times 0,00006}{0,912} = 0,001,$$

$$\Phi = \left(1 + 2\frac{1}{6}\right) \left[ \frac{2}{(150 + 2 \times 3,799)} - \frac{150}{150 \times 3,799} \right] = -0,334,$$

$$\gamma = (2gi_0 - i_0 C_0^2 \Phi), \gamma = (2 \times 9,81 \times 0,00006 + 0,00006 \times 6,687^2 \times 0,334) = 0,00192,$$

$$\bar{\Pi} = 0,000017.$$

По формуле (26) вычислим время распространения начального возмущения до расчетного створа:

$$T = \frac{10000}{0,912 + 6,687} = 1425 \text{ с.}$$

Изменения расходов воды и глубин потока во времени в фиксированных створах рассчитываются по формулам (28) и (29). Результаты расчетов приведены на рисунках 1 и 2.

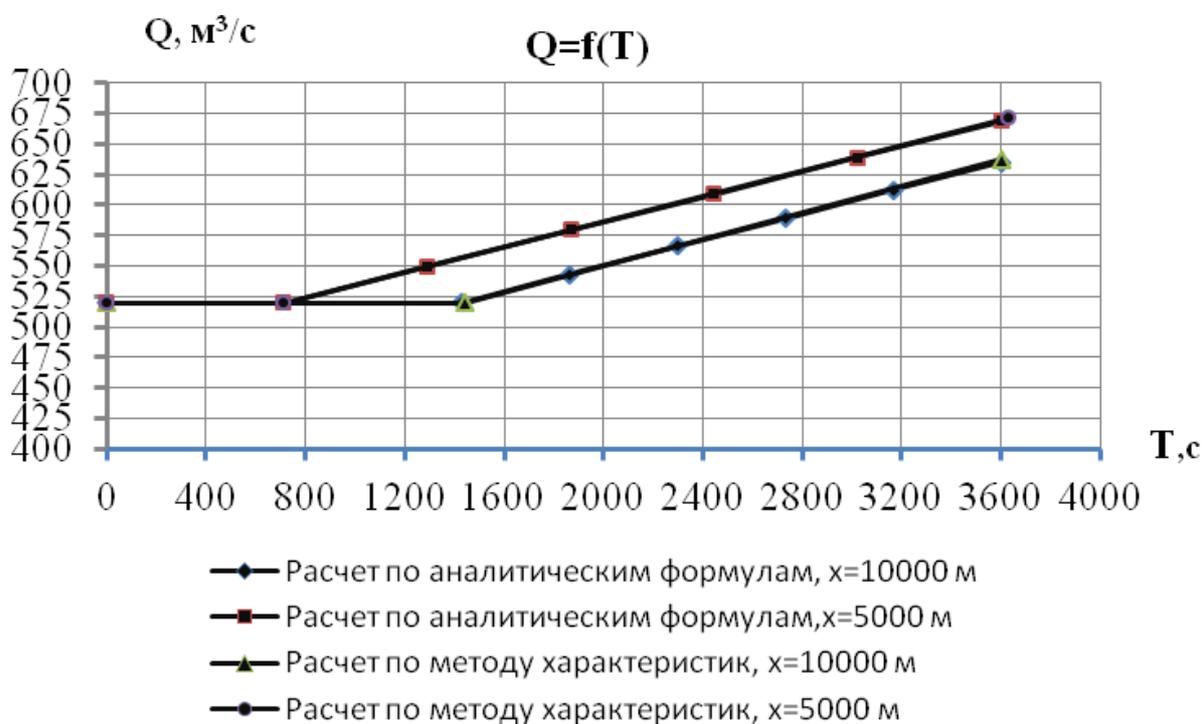


Рис. 1. График изменения расходов воды в зависимости от времени в фиксированных створах

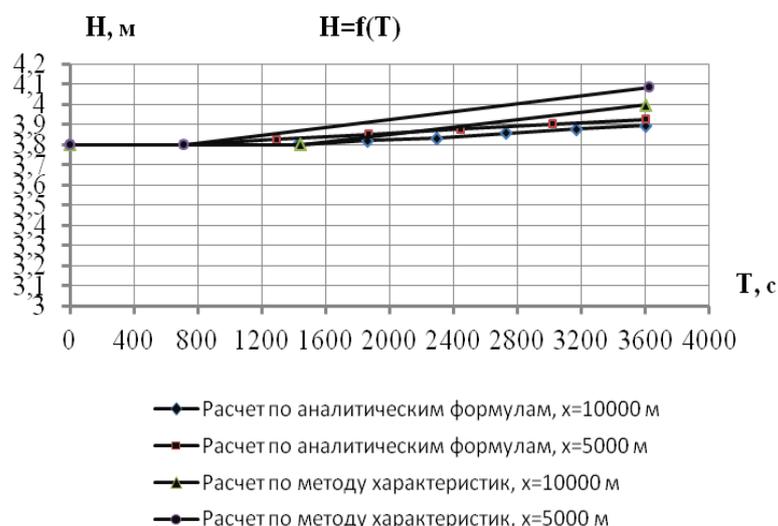


Рис. 2. График изменения глубин воды в зависимости от времени в фиксированных створах

Расчеты выполнены по выведенным в работе аналитическим формулам (28), (29) и методу характеристик, который рассматривается как аналоговый. Сравнение результатов расчетов по двум методам позволило определить максимальную относительную погрешность, которая для расчетных расходов воды и глубин не превышает 3,5 %.

### Заключение

1. В результате исследований разработан метод гидравлического расчета экстремальных расходов и глубин воды в критических створах водотоков, отводящих воду от водосбросных сооружений, для принятого закона регулирования линейно распределенных попусков сбросных расходов воды из водохранилищ с использованием аналитических решений дифференциальных уравнений Сен-Венана.

2. По полученным аналитическим решениям проведены расчеты изменений расхода воды и глубины потока в двух фиксированных створах нижнего бьефа гидроузла: на расстоянии 5000 и 10000 м от начального створа. При этом аналоговым методом был принят метод характеристик. Сравнение результатов расчетов по двум методам позволило определить максимальную относительную погрешность, которая для расчетных

расходов воды и глубин не превысила 3,5 %.

3. Внедрение разработанного метода гидравлического расчета линейно распределенных попусков сбросных расходов на водотоках, отводящих воду от водосбросных сооружений, позволит оптимизировать холостые и нетехнологические сбросы воды из водохранилищ.

### Литература

1. Иваненко, Ю. Г. Гидравлические аспекты устойчивых водных потоков в неразмываемых и размываемых руслах / Ю. Г. Иваненко, А. А. Ткачев, А. Ю. Иваненко. – Новочеркасск: Лик, 2013. – 352 с.
2. Юрченко, И. Ф. Автоматизированное управление водораспределением на межхозяйственных оросительных системах / И. Ф. Юрченко, В. В. Трунин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 2. – С. 178–184.
3. Клишин, И. В. Современные системы управления водораспределением на оросительных системах / И. В. Клишин, В. И. Селюков // Мелиорация и водное хозяйство. – 2006. – № 6. – С. 23.
4. Управление водораспределением на открытых оросительных системах на основе гидрологической информации и агрометеопараметров / В. Н. Щедрин, С. М. Васильев, А. В. Акопян, В. В. Слабунов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. – № 2(34). – С. 152–158.
5. Неймарк, Ю. И. О допустимости линеаризации при исследовании устойчивости / Ю. И. Неймарк // ДАН СССР. – 1959. – Т. 127. – № 5. – С. 961–964.
6. Филиппов, Е. Г. Гидравлика гидрометрических сооружений для открытых потоков / Е. Г. Филиппов. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 288 с.
7. Маковский, Э. Э. Автоматизированные автономные системы трансформации неравномерного стока / Э. Э. Маковский, В. В. Волкова. – Фрунзе: Илим, 1981. – 380 с.
8. Ольгаренко, И. В. Методы теории подобия для решения уравнений Сен-Венана при управлении водораспределением в оросительных системах / И. В. Ольгаренко, О. П. Кисаров, В. И. Ольгаренко // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2012. – № 2. – С. 12.
9. Коваленко, П. И. Автоматизация мелиоративных систем / П. И. Коваленко. – М.: Колос, 1983. – 304 с.
10. Кюнж, Ж. А. Численные методы в задачах речной гидравлики: практическое применение / Ж. А. Кюнж, Ф. М. Холли, А. Вервей: [пер. с англ.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 256 с.
11. Dedrick, A. R. Automatic control of irrigation water delivery to and on-farm in open channels / A. R. Dedrick, D. D. Zimbelman // Principles of designing control systems for water resources and irrigation using modern techniques: Symposium, New Delhi. – New Delhi: ICID, 1981. – P. 113–128.

### References

1. Ivanenko, Ju. G. Gidravlicheskie aspekty ustojchivyh vodnyh potokov v nerazmyvaemyh i razmyvaemyh ruslah / Ju. G. Ivanenko, A. A. Tkachev, A. Ju. Ivanenko. – Novocherkassk: Lik, 2013. – 352 s.
2. Jurchenko, I. F. Avtomatizirovannoe upravlenie vodoraspredeleniem na mezhhozjajstvennyh orositel'nyh sistemah / I. F. Jurchenko, V. V. Trunin // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. – 2012. – № 2. – S. 178–184.
3. Klishin, I. V. Sovremennye sistemy upravlenija vodoraspredeleniem na orositel'nyh sistemah / I. V. Klishin, V. I. Seljukov // Melioracija i vodnoe hozjajstvo. – 2006. – № 6. – S. 23.
4. Upravlenie vodoraspredeleniem na otkrytyh orositel'nyh sistemah na osnove gidrologicheskoy informacii i agrometeoroparametrov / V. N. Shhedrin, S. M. Vasil'ev, A. V. Akopjan, V. V. Slabunov // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. – 2014. – № 2(34). – S. 152–158.
5. Nejmark, Ju. I. O dopustimosti linearizacii pri issledovanii ustojchivosti / Ju. I. Nejmark // DAN SSSR. – 1959. – T. 127. – № 5. – S. 961–964.
6. Filippov, E. G. Gidravlika gidrometricheskikh sooruzhenij dlja otkrytyh potokov / E. G. Fillippov. – L.: Gidrometeoizdat, 1990. – 288 s.
7. Makovskij, Je. Je. Avtomatizirovannye avtonomnye sistemy transformacii neravnomernogo stoka / Je. Je. Makovskij, V. V. Volkova. – Frunze: Ilim, 1981. – 380 s.
8. Ol'garenko, I. V. Metody teorii podobija dlja reshenija uravnenij Sen-Venana pri upravlenii vodoraspredeleniem v orositel'nyh sistemah / I. V. Ol'garenko, O. P. Kisarov, V. I. Ol'garenko // Vestnik Rossijskoj akademii sel'skohozjajstvennyh nauk. – 2012. – № 2. – S. 12.
9. Kovalenko, P. I. Avtomatizacija meliorativnyh sistem / P. I. Kovalenko. – M.: Kolos, 1983. – 304 s.
10. Kjunzh, Zh. A. Chislennye metody v zadachah rečnoj gidravliki: prakticheskoe primenenie / Zh. A. Kjunzh, F. M. Holli, A. Vervej: [per. s angl.]. – M.: Jenergoatomizdat, 1985. – 256 s.
11. Detrick, A. R. Automatic control of irrigation water delivery to and on-farm in open channels / A. R. Detrick, D. D. Zimbelman // Principles of designing control systems for water resources and irrigation using modern techniques: Symposium, New Delhi. – New Delhi: ICID, 1981. – P. 113–128.