DOI: https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.328

УДК 532.59+627.8

ОБ ИНТЕГРИРОВАНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ПОСТЕПЕННО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА В ОТКРЫТОМ РУСЛЕ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ ПРИ ПРОРЫВЕ ПЛОТИНЫ

Стриганова М.Ю., Шаталов И.М., Самедов С.А., Щербакова М.К., Недашковская И.В., Рабченя В.С.

Цель. Выбор научно-технически обоснованного метода интегрирования уравнений неустановившегося постепенно изменяющегося движения потока в открытом русле в условиях высокогорья при прорыве плотины.

Методы. Методы приближенного интегрирования дифференциальных уравнений.

Результаты. Предложено использование конечно-разностного метода интегрирования дифференциальных уравнений (метода характеристических уравнений С.А. Христиановича) для неустановившегося постепенно или плавно изменяющегося движения в условиях высокогорья при прорыве плотины.

Область применения исследований. Предложенное решение уравнений неустановившегося постепенно изменяющегося движения в условиях высокогорья при прорыве плотин можно использовать при решении практических задач по определению основных параметров волны перемещения и зон вредного воздействия на прилегающую к высокогорью территорию.

Ключевые слова: плотина, высокогорье, неустановившееся движение, волна перемещения, параметры волны, скорость потока (волны), глубина потока (волны), время перемещения, длина распространения.

(Поступила в редакцию 2 июня 2020 г.)

Введение

Решение задачи о неустановившемся движении потока жидкости в открытом русле, как правило, заключается в интегрировании системы двух уравнений: уравнения баланса расхода (т. е. уравнения неразрывности постепенно или плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле) и уравнения динамического равновесия (т. е. дифференциального уравнения постепенно или плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле).

В работе [1] эта система уравнений представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial Q}{\partial l} + \dfrac{\partial \omega}{\partial t} = 0, \\ \left(i - AQ^2\right)g = \dfrac{g}{B}\dfrac{\partial \omega}{\partial l} + \alpha_0 \dfrac{\partial v}{\partial t} + \alpha v \dfrac{\partial v}{\partial l}. \end{cases} \quad (1)$$

где Q – объемный расход воды, м^3/с; ω – площадь живого сечения, м^2; v – средняя скорость, м/с; l – длина рассматриваемого участка, м; t – момент времени, с; i – уклон свободной поверхности воды; A – удельное сопротивление русла, с^2/м^2; AQ^2 – уклон трения $i_{тр}$; B – ширина русла по поверхности потока, м; α_0 – коэффициент Буссинеска; α – коэффициент Кориолиса.

Учитывая, что $Q = v\omega$, и введя обозначение $(i - AQ^2)g = E$, перепишем систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \omega}{\partial t} + \omega \dfrac{\partial v}{\partial l} + v \dfrac{\partial \omega}{\partial l} = 0, \\ E = \dfrac{g}{B} \dfrac{\partial \omega}{\partial l} + \alpha_0 \dfrac{\partial v}{\partial t} + \alpha v \dfrac{\partial v}{\partial l}. \end{cases} \tag{2}$$

В результате решения системы уравнений определяются две основные функции: $Q = f_1(l,t)$ и $\omega = f_2(l,t)$. Зная эти функции, в практических расчетах можно определить основные параметры (или характеристики) потока: среднюю скорость – $v = f_3(l,t)$ и глубину – $h = f_4(l,t)$ в любом створе потока и далее построить мгновенный профиль свободной поверхности потока или волны перемещения.

Приведенная система уравнений является системой нелинейных дифференциальных уравнений гиперболического типа, обладающих двумя совокупностями характеристик.

Интегрирование системы уравнений (2) в общем случае представляет достаточно большие трудности, поэтому в инженерной практике широкое применение нашли методы приближенного интегрирования этих уравнений.

Рассмотрим один из методов решения уравнений (2) с учетом возможности использования компьютерных технологий.

Так как система уравнений (2) относится к классу уравнений гиперболического типа с двумя совокупностями характеристик, эту систему уравнений можно заменить уравнениями соответствующих им характеристик, которые могут быть решены методами приближенного интегрирования. Исследование системы уравнений неустановившегося движения потока в открытом русле и решения их методом характеристических уравнений впервые было проведено С.А. Христиановичем [2].

И.М. Бернадский, В.А. Архангельский и другие разработали методику решения дифференциальных уравнений неустановившегося движения жидкости в открытых руслах способом конечных разностей для определенных значений временных отрезков (мгновений при $t = const$). Такой метод в расчетной практике получил название метода мгновенных режимов, хотя более уместно его назвать методом мгновенных фрагментов (или ситуаций).

Основная часть

В реальных условиях высокогорья при прорыве плотины происходит относительно постепенное опорожнение водохранилища, при котором наблюдается падение уровня воды в водохранилище, уменьшение расхода воды в начальном створе и увеличение расхода в конечном сечении прямой отрицательной волны перемещения [1].

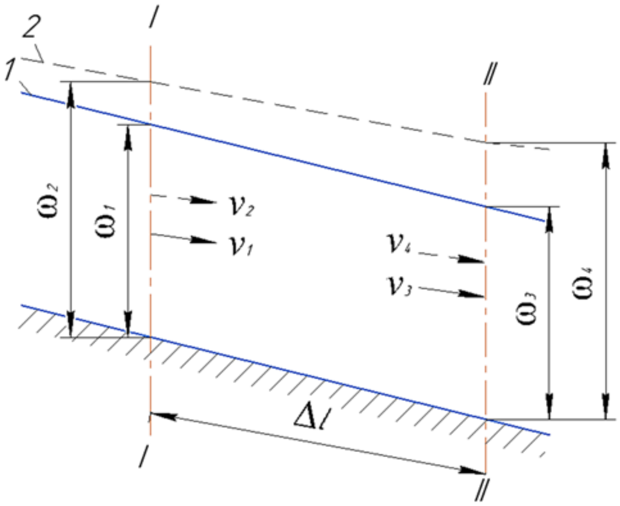
Движение воды в теле такой волны перемещения хорошо описывается двумя дифференциальными уравнениями баланса расхода и уравнением динамического равновесия [2].

Для численного (с использованием компьютерных технологий) решения системы уравнений (2) для условий высокогорья при прорыве плотины предлагается использовать метод характеристических уравнений С.А. Христиановича [2], при этом движение воды в теле волны перемещения будем считать постепенно или плавно изменяющимся.

Рассмотрим более подробно метод характеристических уравнений С.А. Христиановича, дополнив его моделированием волн на мелкой воде методом частиц [3].

На схеме движения потока (рис. 1) позиция *1* соответствует свободной поверхности в момент времени t_1, а позиция *2* – в момент времени t_2. Рассмотрим неустановившееся движение потока воды между сечениями I-I и II-II на бесконечно малом расстоянии Δl.

Представим неустановившееся постепенно или плавно изменяющееся движение в виде параллельных прямолинейных отрезков линий тока (см. рис. 1). Допустим, что в области решения системы уравнений (2) задан отрезок некоторой кривой линии тока функцией $l = l(t)$ и значения функций $v = v(l,t)$ и $\omega = \omega\ (l,t)$.



1 – начальное положение поверхности волны перемещения в момент времени *t*;
2 – конечное положение поверхности волны перемещения в момент времени $t + \Delta t$
Рисунок 1. – Отрезок некоторой кривой линии тока

Тогда для каждой точки этой кривой (точки представляют собой частицы движущейся жидкости) $l = l(t)$ можно записать:

$$\begin{cases} \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{\partial v}{\partial l}\dfrac{dl}{dt} + \dfrac{\partial v}{\partial t}, \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{\partial \omega}{\partial l}\dfrac{dl}{dt} + \dfrac{\partial \omega}{\partial t}, \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \dfrac{\partial v}{\partial t} = \dfrac{dv}{dt} - \dfrac{\partial v}{\partial l}\dfrac{dl}{dt}, \\ \dfrac{\partial \omega}{\partial t} = \dfrac{d\omega}{dt} - \dfrac{\partial \omega}{\partial l}\dfrac{dl}{dt}. \end{cases} \tag{3}$$

Подставив значения $\dfrac{\partial v}{\partial t}$ и $\dfrac{\partial \omega}{\partial t}$ в систему (2), после простейших преобразований будем иметь:

$$\begin{cases} \omega\dfrac{\partial v}{\partial l} + \left(v - \dfrac{dl}{dt}\right)\dfrac{\partial \omega}{\partial l} = -\dfrac{d\omega}{dt}, \\ \left(\alpha v - \alpha_0\dfrac{dl}{dt}\right)\dfrac{\partial v}{\partial l} + \dfrac{g}{B}\dfrac{\partial \omega}{\partial l} = E - \alpha_0\dfrac{dv}{dt}. \end{cases} \tag{4}$$

Откуда легко получить

$$\begin{cases} \left[\left(v - \dfrac{dl}{dt}\right)\left(\alpha v - \alpha_0\dfrac{dl}{dt}\right) - \dfrac{g\omega}{B}\right]\dfrac{\partial v}{\partial l} = \left(E - \alpha_0\dfrac{dv}{dt}\right)\left(v - \dfrac{dl}{dt}\right) + \dfrac{g}{B}\dfrac{d\omega}{dt}, \\ \left[\left(v - \dfrac{dl}{dt}\right)\left(\alpha v - \alpha_0\dfrac{dl}{dt}\right) - \dfrac{g\omega}{B}\right]\dfrac{\partial \omega}{\partial l} = -\left(\alpha v - \alpha_0\dfrac{dl}{dt}\right)\dfrac{d\omega}{dt} - \omega\left(E - \alpha_0\dfrac{dv}{dt}\right). \end{cases} \tag{5_α}$$

В условиях высокогорья в водотоках всегда наблюдается быстрое течение воды, называемое бурным. Бурный поток движется в развитом турбулентном режиме, для которого коэффициенты Кориолиса и Буссинеска можно принимать равными 1,0. В этом случае систему уравнений (9) можно записать в более компактном виде, удобном для анализа и последующего решения.

$$\begin{cases} \left[\left(v-\dfrac{dl}{dt}\right)^2-\dfrac{g\omega}{B}\right]\dfrac{\partial v}{\partial l}=\left(E-\dfrac{dv}{dt}\right)\left(v-\dfrac{dl}{dt}\right)+\dfrac{g}{B}\dfrac{d\omega}{dt}, \\ \left[\left(v-\dfrac{dl}{dt}\right)^2-\dfrac{g\omega}{B}\right]\dfrac{\partial \omega}{\partial l}=-\left(v-\dfrac{dl}{dt}\right)\dfrac{d\omega}{dt}-\omega\left(E-\dfrac{dv}{dt}\right). \end{cases} \tag{5}$$

Системы уравнений (5_α) и (5) можно применять для расчета неустановившегося постепенно или плавно изменяющегося движения в открытых руслах произвольной формы поперечного сечения. Такие русла называются непризматическими, и для них должно соблюдаться условие $\omega = f(l;\ h)$, где ω – площадь живого сечения потока; l – длина потока; h – глубина потока.

Однако в условиях высокогорья при растекании бурного потока его глубина значительно меньше его ширины B (т. е. $B>>h$) и поперечное или живое сечение такого потока близко к прямоугольной форме. Прямоугольное сечение, равно как и любое другое сечение правильной формы (например, трапецеидальное, треугольное, овальное, параболическое и т. д.) относится к призматическим руслам, для которых $\omega = f(h)$ и $\partial\omega/\partial l = 0$. Учитывая это для условий высокогорья при прорыве плотины, можем записать:

$$-\left(\alpha v-\alpha_0\frac{dl}{dt}\right)\frac{d\omega}{dt}-\omega\left(E-\alpha_0\frac{dv}{dt}\right)=0, \tag{6_α}$$

$$-\left(v-\frac{dl}{dt}\right)\frac{d\omega}{dt}-\omega\left(E-\frac{dv}{dt}\right)=0. \tag{6}$$

С физической точки зрения производная dl/dt является скоростью распространения фронта (тела) волны перемещения, причем эта волна перемещения имеет два направления (прямое и обратное), для определения которых можно записать следующие уравнения, приведенные в [2]:

$$\left(dl/dt\right)_1 = v+\sqrt{g\omega/B} \quad \text{и} \quad \left(dl/dt\right)_2 = v-\sqrt{g\omega/B}. \tag{7}$$

Подставив выражения (7) в уравнение (6) получим формулы для определения скоростей распространения фронта (тела) прямой и обратной волны перемещения:

$$dv=-\sqrt{\frac{g}{B\omega}}d\omega+Edt \quad \text{и} \quad dv=+\sqrt{\frac{g}{B\omega}}d\omega+Edt. \tag{8}$$

В обозначениях

$$v+\sqrt{g\omega/B}=a_1 \quad \text{и} \quad v-\sqrt{g\omega/B}=a_2 \tag{9}$$

(7) перепишется в виде

$$\left(dl/dt\right)_1=a_1 \quad \text{и} \quad \left(dl/dt\right)_2=a_2. \tag{10}$$

Для любого элементарного участка Δl постепенного или плавно изменяющегося движения в конечных разностях систему уравнений (10) запишем в виде:

$$\begin{cases} \Delta l_1 = a_1\Delta t_1, \\ \Delta l_2 = a_2\Delta t_2. \end{cases} \tag{11}$$

Уравнения системы (11) для мгновенных режимов или фрагментов времени t_1, t_2, … являются уравнениями прямых линий на элементарном участке кривой Δl с постоянными угловыми коэффициентами a_1 и a_2, т. к. в любой зафиксированный момент времени общее неустановившееся движение является установившимся, при котором значения Q, ω, v являются постоянными величинами.

При интегрировании в конечных разностях в координатной плоскости (l, t) для любого заданного отрезка кривой $l = l(t)$ можно записать расчетные уравнения (11) в следующем виде:

$$\begin{cases} l_m - l_a = a_1(t_m - t_a), \\ l_m - l_b = a_2(t_m - t_b), \end{cases} \tag{12}$$

где l_a, t_a, l_b, t_b – координаты точек (частиц жидкости) в пределах кривой $l = l(t)$, в которых известны (или заданы) функции (или значения) v и ω; l_m, t_m – неизвестные координаты точек (частиц жидкости) кривой $l = l(t)$, представляющей собой линию тока неустановившегося движения потока воды.

Представим уравнения (8) определения скоростей распространения фронта (тела) волны перемещения (прямой и обратной) в конечных разностях:

$$\begin{cases} v_m - v_a = -\sqrt{\dfrac{g}{B\omega}}(\omega_m - \omega_a) + E_1(t_m - t_a), \\ v_m - v_b = +\sqrt{\dfrac{g}{B\omega}}(\omega_m - \omega_b) + E_2(t_m - t_b), \end{cases} \tag{13}$$

где v_a, v_b и ω_a, ω_b – начальные скорости распространения и площади живого сечения волны перемещения; v_m и ω_m – текущая скорость распространения и площадь живого сечения волны перемещения (прямой и обратной).

Для решения практических задач и компьютерного моделирования неустановившегося постепенно или плавно изменяющегося движения воды в условиях высокогорья в виде волны перемещения прямой или обратной, положительной или отрицательной наиболее применим метод конечных приращений [2]. Подобный метод был использован Томпсоном для расчета прямоугольных русел, который с некоторыми дополнениями и изменениями можно распространить на русла произвольной формы поперечного сечения.

Рассмотрим русло произвольной формы поперечного сечения (см. рис. 1). Разделим это русло на элементарные участки Δl, в пределах которых площадь живого сечения $\Delta\omega$ будет изменяться постепенно (или плавно). Рассмотрим конкретный элементарный участок, в начальном сечении которого, как и в последующих сечениях, параметры неустановившегося потока (глубины h, скорости v, площади живых сечений ω и т. д.) известны в данный момент времени t и в последующие отрезки времени Δt. Предположим, что на рисунке 1 линия *1* соответствует положению свободной поверхности волны перемещения в начальный момент времени t; а линия *2* – это положение свободной поверхности той же волны по истечении отрезка времени Δt, т. е. в момент времени $t+\Delta t$.

Определим средние значения параметров неустановившегося потока в любом его сечении для отрезка времени Δt:

$$\begin{cases} \overline{\omega} = \left(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4\right)/4, \\ \overline{B} = \left(B_1 + B_2 + B_3 + B_4\right)/4, \\ \overline{R} = \left(R_1 + R_2 + R_3 + R_4\right)/4, \\ \overline{v} = \left(v_1 + v_2 + v_3 + v_4\right)/4, \\ \overline{C} = \left(C_1 + C_2 + C_3 + C_4\right)/4, \end{cases} \tag{14}$$

где ω – площадь живого сечения, м^2; v – средняя скорость, м/с; B – ширина русла по поверхности потока, м; R – гидравлический радиус, м; C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с.
В системе уравнений (1) неустановившегося постепенно или плавно изменяющегося движения уклон трения $i_{тр}$ = AQ^2 на элементарном участке потока Δl можно выразить из уравнения Шези $i_{тр} = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}}$. С учетом того что для призматического русла $\frac{\partial\omega}{\partial l} = 0$ и $i = i_0 - \frac{\partial h}{\partial l}$, где i_0 – уклон дна водотока, уравнение движения системы (1) представимо в виде:

$$i_0 = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}} + \frac{\partial h}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha v}{g}\frac{\partial v}{\partial l}, \tag{15$_\alpha$}$$

$$i_0 = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}} + \frac{\partial h}{\partial l} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial l}. \tag{15}$$

Частные производные в конечных приращениях представим в виде:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial h}{\partial l} = \frac{1}{2}\left(\frac{h_3 - h_1}{\Delta l} + \frac{h_4 - h_2}{\Delta l}\right) = -\frac{h_1 + h_2 - h_3 - h_4}{2\Delta l}, \\ &\frac{\partial v}{\partial l} = \frac{1}{2}\left(\frac{v_3 - v_1}{\Delta l} + \frac{v_4 - v_2}{\Delta l}\right) = -\frac{v_1 + v_2 - v_3 - v_4}{2\Delta l}, \\ &\frac{\partial Q}{\partial l} = \frac{\partial(\omega v)}{\partial l} = \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_3 v_3 - \omega_1 v_1}{\Delta l} + \frac{\omega_4 v_4 - \omega_2 v_2}{\Delta l}\right) = -\frac{\omega_1 v_1 + \omega_2 v_2 - \omega_3 v_3 - \omega_4 v_4}{2\Delta l}, \\ &\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{2}\left(\frac{h_2 - h_1}{\Delta t} + \frac{h_4 - h_3}{\Delta t}\right) = -\frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{2\Delta t}, \\ &\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{2}\left(\frac{v_2 - v_1}{\Delta t} + \frac{v_4 - v_3}{\Delta t}\right) = -\frac{v_1 - v_2 + v_3 - v_4}{2\Delta t}, \\ &\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{1}{2}\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} + \frac{\omega_4 - \omega_3}{\Delta t}\right) = -\frac{\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4}{2\Delta t}. \end{aligned} \tag{16}$$

где h_1, h_2, h_3, h_4 – глубина потока в рассматриваемых сечениях за отрезок времени Δt; v_1, v_2, v_3, v_4 – средние скорости за отрезок времени Δt; ω_1 ,ω_2 ,ω_3 ,ω_4 – площади живых сечений за отрезок времени Δt.

Согласно уравнениям (16) уравнения (15$_\alpha$) и (15) в конечных разностях примут вид:

$$i_0 = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}} - \frac{h_1 + h_2 - h_3 - h_4}{2\Delta l} - \alpha_0\frac{v_1 - v_2 + v_3 - v_4}{2g\Delta t} - \alpha\overline{v}\frac{v_1 + v_2 - v_3 - v_4}{2g\Delta l}, \tag{17$_\alpha$}$$

$$i_0 = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}} - \frac{h_1+h_2-h_3-h_4}{2\Delta l} - \frac{v_1-v_2+v_3-v_4}{2g\Delta t} - \overline{v}\,\frac{v_1+v_2-v_3-v_4}{2g\Delta l}. \qquad (17)$$

Уравнение баланса расхода (или уравнение неразрывности) постепенно или плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле системы (1) в конечных приращениях согласно (16) принимает вид

$$-\frac{\omega_1 v_1+\omega_2 v_2-\omega_3 v_3-\omega_4 v_4}{2\Delta l} - \frac{\omega_1-\omega_2+\omega_3-\omega_4}{2\Delta t} = 0. \qquad (18)$$

Уравнения (17_α), (17) и (18) позволяют найти параметры h и v неустановившегося потока в любой отрезок времени Δt и в любых сечениях этого потока, а также построить кривую свободной поверхности волны перемещения (прямой и обратной) в условиях высокогорья при прорыве плотины.

Заключение

1. Представленный конечно-разностный метод интегрирования дифференциальных уравнений неустановившегося постепенно или плавно изменяющегося движения для определенных отрезков времени t = const (метод мгновенных режимов или фрагментов) является достаточно приближенным. Однако этот метод наиболее полно отвечает требованиям реальной инженерной практики и позволяет осуществить компьютерное моделирование процесса распространения волны перемещения (как прямой, так и обратной) в условиях высокогорья при прорыве плотины.

2. Предложенный метод интегрирования дифференциальных уравнений неустановившегося плавно изменяющегося движения по способу конечных разностей будет проверен экспериментально в лабораторных и натурных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стриганова, М.Ю. Математическая модель пространственно изменяющегося неустановившегося движения потока при прорыве напорных и гидротехнических сооружений в условиях высокогорья / М.Ю. Стриганова [и др.] / Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 48–58. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.48.
2. Богомолов, А.И. Гидравлика / А.И. Богомолов, А.И. Михайлов; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.
3. Богомолов, С.В. Моделирование волн на мелкой воде методом частиц / С.В. Богомолов, Е.В. Захаров, С.В. Зеркаль // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 3. – С. 103–116.

Об интегрировании дифференциальных уравнений неустановившегося постепенно изменяющегося движения потока в открытом русле в условиях высокогорья при прорыве плотины

On the integration of differential equations of unsteady gradually changing flow in an open channel in highland conditions when a dam breaks

Стриганова Марина Юрьевна
кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра автоматических систем безопасности, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, г. Минск, Беларусь
e-mail: striganovam@tut.by
ORCID: 0000-0002-8100-733X

Marina Yu. Striganova
PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Automatic System Security, Associate Professor

Address: ul. Mashinostroiteley, 25, 220118, Minsk, Belarus
e-mail: striganovam@tut.by
ORCID: 0000-0002-8100-733X

Шаталов Игорь Михайлович

Белорусский национальный технический университет, кафедра гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, старший преподаватель

Адрес: пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: shatl19@yandex.by
ORCID: 0000-0002-5348-5318

Igor' M. Shatalov

Belarusian National Technical University, Chair of Hydrotechnical and Power Engineering, Water Transport and Hydraulics, Senior Lecturer

Address: pr-t Nezavisimosti, 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: shatl19@yandex.by
ORCID: 0000-0002-5348-5318

Самедов Самедага Абзар оглы

Министерство по чрезвычайным ситуациям Республики Азербайджан, главное оперативное управление, заместитель начальника

Адрес: ул. М. Мушвига, 501, AZ1073, г. Баку, Азербайджан
e-mail: ssamedaga@yandex.by
ORCID: 0000-0002-4241-8080

Abzar S. Samedov

Ministry of Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan, Main Operational Department, Deputy Head

Address: ul. M. Mushviga, 501, AZ1073, Baku, Azerbaijan
e-mail: ssamedaga@yandex.by
ORCID: 0000-0002-4241-8080

Щербакова Мария Константиновна

Белорусский национальный технический университет, кафедра гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, старший преподаватель

Адрес: пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: mk_shcherb@tut.by
ORCID: 0000-0002-8864-0517

Mariya K. Shcherbakova

Belarusian National Technical University, Chair of Hydrotechnical and Power Engineering, Water Transport and Hydraulics, Senior Lecturer

Address: pr-t Nezavisimosti, 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: mk_shcherb@tut.by
ORCID: 0000-0002-8864-0517

Недашковская Ирина Васильевна

Белорусский национальный технический университет, управление подготовки научных кадров высшей квалификации, методист

Адрес: пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: nedash19@yandex.by
ORCID: 0000-0002-7059-9122

Irina V. Nedashkovskaya

Belarusian National Technical University, Department for the Training of Scientific Personnel of Higher Qualification, Methodologist

Address: pr-t Nezavisimosti, 65,
220013, Minsk, Belarus
e-mail: nedash19@yandex.by
ORCID: 0000-0002-7059-9122

Рабченя Виктория Сергеевна

Белорусский национальный технический университет, факультет энергетического строительства, студент

Адрес: пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: rabash19@yandex.by
ORCID: 0000-0002-9350-1693

Viktoriya S. Rabchenya

Belarusian National Technical University, Department of Energy Construction, Student

Address: pr-t Nezavisimosti, 65,
220013, Minsk, Belarus
e-mail: rabash19@yandex.by
ORCID: 0000-0002-9350-1693

DOI: https://doi.org/10.33408/2519-237X.2020.4-3.328

ON THE INTEGRATION OF DIFFERENTIAL EQUATIONS OF UNSTEADY GRADUALLY CHANGING FLOW IN AN OPEN CHANNEL IN HIGHLAND CONDITIONS WHEN A DAM BREAKS

Striganova M.Yu., Shatalov I.M., Samedov S.A., Shcherbakova M.K., Nedashkovskaya I.V., Rabchenya V.S.

Purpose. The choice of a scientifically and technically substantiated method for integrating the equations of unsteady gradually changing flow movement in an open channel in highland conditions when a dam breaks.

Methods. Approximate integration methods for differential equations.

Findings. The use of the finite-difference method for integrating differential equations (method of characteristic equations of S.A. Khristianovich) is proposed for unsteady gradually changing flow in highland conditions when a dam breaks.

Application field of research. The proposed solution of the equations of unsteady gradually changing movement in highland conditions when breaking dams can be used to solve practical problems in determining the main parameters of the displacement wave and the zones of harmful effects on the territory adjacent to the high mountains.

Keywords: dam, highland, unsteady movement, displacement wave, wave parameters, flow velocity (waves), flow depth (waves), displacement time, propagation length.

(The date of submitting: June 2, 2020)

REFERENCES

1. Striganova M.Yu., Shatalov I.M., Samedov S.A., Nedashkovskaya I.V., Rabchenya V.S. Matematicheskaya model' prostranstvenno izmenyayushchegosya neustanovivshegosya dvizheniya potoka pri proryve napornykh i gidrotekhnicheskikh sooruzheniy v usloviyakh vysokogor'ya [Mathematical model of a spatially variable unstable flow motion at the breakthrough of hydrotechnical structures under the conditions of highland]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4. No. 1. Pp. 48–58. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-1.48.
2. Bogomolov A.I., Mikhaylov K.A. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 648 p. (rus)
3. Bogomolov S.V., Zakharov E.V., Zerkal' S.V. Modelirovanie voln na melkoy vode metodom chastits [The shallow water wave simulating by particle method]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2002. Vol. 14. No. 3. Pp. 103–116. (rus)