L/B = 5,43 оптимальные значения демонстрируют обводы с носовой частью с лекальными обводами и килеватым носом и лекальные обводы с ложкообразным носом.

Из анализа представленных зависимостей видно, что при малых скоростях (0,16–0,22 м/с) лекальные обводы повышают эффективность движения состава даже при режиме буксировки. Однако при выходе на рабочие скорости (0,22–0,27 м/с) режим толкания эффективнее для всех типов обводов, а в режиме буксировки сопротивление движению резко возрастает.

Из зависимостей видно, что при выходе на рабочие скорости (0,22–0,27 м/с) режим толкания эффективнее порядка на 25 – 40 % в сравнении с буксировкой для обоих составов.

УДК 532.59+627.8

А.В. Максимович, И.В. Калиновский
Белорусский национальный технический университет

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

Научный руководитель ст. преп. кафедры «ГЭСВТГ» БНТУ И.М. Шаталов, М.К. Щербакова

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].

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:

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

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:

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

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.

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

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].

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. 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.

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

$$\begin{cases} \overline{\omega} = (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4)/4, \\ \overline{B} = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4)/4, \\ \overline{R} = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)/4, \\ \overline{v} = (v_1 + v_2 + v_3 + v_4)/4, \\ \overline{C} = (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)/4, \end{cases} \tag{3}$$

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 $i_{тр} = \dfrac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}}$. С учетом того, что для призматического русла $\dfrac{\partial\omega}{\partial l} = 0$ и $i = i_0 - \dfrac{\partial h}{\partial l}$, где i_0 – уклон дна водотока, уравнение движения системы (1) представим в виде:

$$i_0 = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}} + \frac{\partial h}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\alpha v}{g}\frac{\partial v}{\partial l}, \tag{4a}$$

$$i_0 = \frac{\overline{v}^2}{\overline{C}^2\overline{R}} + \frac{\partial h}{\partial l} + \frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g}\frac{\partial v}{\partial l}. \tag{4}$$

Частные производные в конечных приращениях представим в виде:

$$\frac{\partial h}{\partial l}=\frac{1}{2}\left(\frac{h_3-h_1}{\Delta l}+\frac{h_4-h_2}{\Delta l}\right)=-\frac{h_1+h_2-h_3-h_4}{2\Delta l},$$

$$\frac{\partial v}{\partial l}=\frac{1}{2}\left(\frac{v_3-v_1}{\Delta l}+\frac{v_4-v_2}{\Delta l}\right)=-\frac{v_1+v_2-v_3-v_4}{2\Delta l},$$

$$\frac{\partial Q}{\partial l}=\frac{\partial(\omega v)}{\partial l}=\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_3 v_3-\omega_1 v_1}{\Delta l}+\frac{\omega_4 v_4-\omega_2 v_2}{\Delta l}\right)=-\frac{\omega_1 v_1+\omega_2 v_2-\omega_3 v_3-\omega_4 v_4}{2\Delta l},$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{1}{2}\left(\frac{h_2-h_1}{\Delta t}+\frac{h_4-h_3}{\Delta t}\right)=-\frac{h_1-h_2+h_3-h_4}{2\Delta t}, \qquad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}=\frac{1}{2}\left(\frac{v_2-v_1}{\Delta t}+\frac{v_4-v_3}{\Delta t}\right)=-\frac{v_1-v_2+v_3-v_4}{2\Delta t},$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}=\frac{1}{2}\left(\frac{\omega_2-\omega_1}{\Delta t}+\frac{\omega_4-\omega_3}{\Delta t}\right)=-\frac{\omega_1-\omega_2+\omega_3-\omega_4}{2\Delta t}.$$

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 (5) уравнения (4*a*) и (4) в конечных разностях примут вид:

$$i_0=\frac{\bar{v}^2}{\bar{C}^2\bar{R}}-\frac{h_1+h_2-h_3-h_4}{2\Delta l}-\alpha_0\frac{v_1-v_2+v_3-v_4}{2g\Delta t}-\alpha\bar{v}\,\frac{v_1+v_2-v_3-v_4}{2g\Delta l}, \qquad (6a)$$

$$i_0=\frac{\bar{v}^2}{\bar{C}^2\bar{R}}-\frac{h_1+h_2-h_3-h_4}{2\Delta l}-\frac{v_1-v_2+v_3-v_4}{2g\Delta t}-\bar{v}\,\frac{v_1+v_2-v_3-v_4}{2g\Delta l}. \qquad (6)$$

Уравнение баланса расхода (или уравнение неразрывности) постепенно или плавно изменяющегося неустановившегося движения потока жидкости в открытом русле системы (1) в конечных приращениях согласно (5) принимает вид

$$-\frac{\omega_1 v_1+\omega_2 v_2-\omega_3 v_3-\omega_4 v_4}{2\Delta l}-\frac{\omega_1-\omega_2+\omega_3-\omega_4}{2\Delta t}=0 \qquad (7)$$

Уравнения (6*a*), (6) и (7) 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.

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.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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.

УДК 369.2

Н. В. Седляр, И. И. Назаров, Н.Я. Шпилевский

Белорусский национальный технический университет

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ДОМ

Общие сведения. До недавнего времени в Беларуси существовал диссонанс в определении, какое же здание можно считать энергоэффективным.

Впервые данное определение было упомянуто в Комплексной программе по энергоэффективному строительству жилых домов, утверждённой постановлением Совета министров.

Таким образом энергоэффективным считалось здание с удельным потреблением тепла 60 кВт ч/кв.м в год. Тем не менее после разработки ряда документов по энергоэффективности данное определение было окончательно уточнено.

В настоящее время энергоэффективным считается такое здание, потери тепла которого на отопление составляют не более 40 кВт ч/кв.м в год в ходе