

2. Способы очистки металлических поверхностей: пат. №21512, Респ. Беларусь, МПК В 08В 3/04 / И. В. Качанов, А. Н. Жук, А. В. Филипчик, А. С. Исаенко; дата публ. 30.12.2017.

3. Качанов, И. В. Технология струйной гидроабразивной очистки и защиты от коррозии стальных изделий с применением бентонитовой глины / И. В. Качанов, А. В. Филипчик, В. Е. Бабич, А. Н. Жук, С. И. Ушев. – Минск: БНТУ, 2016. – 168 с.

4. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

5. Качанов, И. В., Веремеюк В. В., Мойса А. С., А. В. Филипчик. Расчёт оптимального угла конусности конфузора / И. В. Качанов, В. В. Веремеюк, А. С. Мойса, А. В. Филипчик. – Минск: Агропанорама, 2016. – С. 7-10.

УДК 532.59; 627.8

О неустановившемся движении потока воды в открытых руслах при эксплуатации гидротехнических сооружений

Стриганова М. Ю.¹, Шаталов И. М.², Самедов С. А.¹, Щербакова М. К.²,
Закерничный В. И.², Капуза М. А.²

¹Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь

²Белорусский национальный технический университет

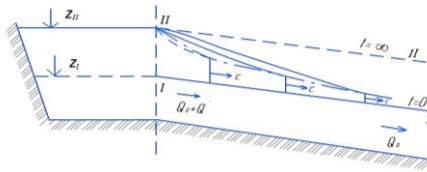
Минск, Республика Беларусь

В статье приведены уравнения неустановившегося движения потока в открытых руслах, используемые при численном моделировании возникающих волн перемещения.

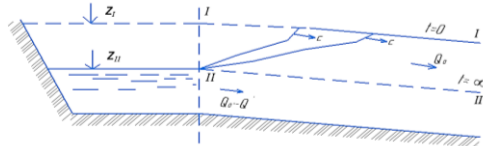
Неустановившееся движение потока воды в открытых руслах (реках и каналах) может возникать при прорыве плотин; в результате маневрирования затворками гидротехнических сооружений (шлюзов, водозаборов, гидроэлектростанций и т.д.); включения и выключения насосных станций. При этом неустановившееся движение в открытых руслах чаще всего принимает форму волны перемещения прямой или обратно, положительной или отрицательной [1].

Волны перемещения в этих случаях имеют строго направленное продольное движение. Поэтому для решения практических задач по волнам перемещения, обычно в инженерном деле рассматривают одномерную модель плавно изменяющегося неустановившегося движения потока воды, при котором в каждом сечении потока: скорость движения воды U (м/с) равна средней скорости потока; распределение давления гидростатическое.

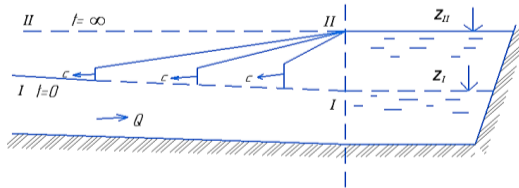
Для теоретического анализа и расчета такого движения обычно принимают плотность воды ρ (кг/м^3) постоянной, а русло достаточно широким, т.е. $B \gg h$ (где B , м – ширина русла по урезу воды; h , м – глубина потока) и поперечное сечение русла близким к прямоугольной форме, а неустановившееся движение сравнивается с установившимся равномерным движением воды при котором силы трения и поверхность потока уравниваются проекцией силы тяжести, действие которой обусловлено продольным уклоном водотока.



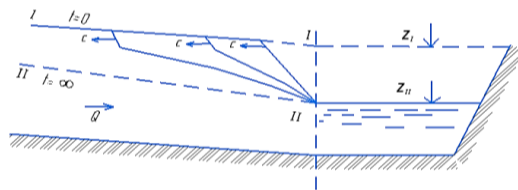
a – прямая положительная волна, или волна наполнения



б – прямая отрицательная волна, или волна отлива



в – обратная положительная волна, или волна подпора



г – обратная отрицательная волна, или волна излива

Рис. 1. Неустановившееся движение в открытом русле в виде волны перемещения

Такое неустановившееся движение (рис. 1) в открытых руслах хорошо описывается дифференциальными уравнениями, так называемой мелкой воды, которые можно получить, решив уравнения сохранения массы и изменения количества движения (или уравнение импульса сил). Эти уравнения используя метод контрольного объема [2] можно представить в следующем виде:

1. Уравнение сохранения массы в общем случае можно записать в виде:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_A \rho U_n dA = 0, \quad (1)$$

где $\frac{D}{Dt}$ – субстанциональная производная; V – контрольный объем; A – контрольная поверхность, ограничивающая контрольный объем V ; t – момент времени, изменяющийся до $t + \Delta t$.

Поскольку контрольный объем не зависит от времени t ; плотность воды $\rho = \text{const}$; и площадь поперечного сечения широкого русла равна $w = Bh$, уравнение сохранения массы для мелкой воды после преобразований принимает вид:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial l} h = 0, \quad (2)$$

где l – длина водотока с некоторым уклоном дна i_0 .

2. Уравнение изменения количества движения в этом случае принимает следующий вид:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho U dV = \int_V \rho f dV + \int_A p_n dA. \quad (3)$$

Спроектировав параметры уравнение (3) на направление движения потока воды и пренебрегая уклоном дна водотока i_0 , запишем уравнение изменения количества движения в виде:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho U_l dV = \int_V \rho f_l dV + \int_A p_n dA. \quad (4)$$

Учитывая выше сделанные допущения, ограничения и предположения, после соответствующих преобразований уравнение изменения количества движения для мелкой воды можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} h + \frac{\partial \mathcal{G}^2}{\partial l} h + gh \frac{\partial h}{\partial l} = 0 \quad (5)$$

или

$$\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} h + \frac{\partial}{\partial l} \left(\mathcal{G}^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = 0 \quad (6)$$

Для теоретического анализа и практического использования дифференциальные уравнения мелкой воды предпочтительнее записывать в виде Эйлеровской системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial l} + h \frac{\partial g}{\partial l} = 0 \\ \frac{\partial g}{\partial t} + V \frac{\partial g}{\partial l} + g \frac{\partial h}{\partial l} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

В общем случае для прямолинейных, нецилиндрических водотоков произвольного поперечного сечения с продольным уклоном $i_0 = 0$ с учетом вязкости воды система уравнений неустановившегося движения применительно к возникновению волны перемещения приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial l} w = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial t} g w + \frac{\partial p}{\partial l} g^2 w = \rho g w i_0 - w \frac{\partial p}{\partial l} - \tau_g \chi + \tau_0 B + \frac{\partial}{\partial l} [(P_l^B + P_l^T) w] - \rho g w \frac{\partial h}{\partial l} \end{cases} \quad (8)$$

где $w = w(l; t)$ – поперечное сечение потока воды; $\tau_g(l, t)$ – продольные донные касательные напряжения по смоченному периметру поверхности водотока χ ; $\tau_0 = \tau_0(l, t)$ – продольная составляющая касательных напряжений на свободной поверхности, обусловленных ветровой нагрузкой; P_l^B и P_l^T – нормальные вязкие и турбулентные напряжения, осредненные по поперечному сечению потока воды.

Приведенные уравнения (7) и (8) могут использоваться при численном (компьютерном) моделировании неустановившегося движения в открытых руслах в виде волн перемещения, а также для определения основных параметров этих волн: средней скорости и глубины, в любой момент времени, например, методом конечных разностей или конечных приращений [3]. При этом все параметры уравнения (8) (кроме искомого $w = w(l; t)$ и $v = v(l; t)$) должны быть заданы для всех поперечных сечений, включая зависимости $w = w(h)$ и $B = B(h)$.

Литература

1. Справочник по гидравлике / Большаков В. А. [и др.]; под ред. В. А. Большакова. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Высш. шк. Головное издательство, 1984. – 343 с.
2. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): учеб. для ВУЗов / А. Д. Гиргидов. – 3-е изд., испр. и доп. – СПб.: изд-во Политехнического университета, 2007. – 545 с.
3. Богомолов, А. И. Гидравлика / А. И. Богомолов, К. А. Михайлов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.