

УДК 626.824-52

UDC 626.824-52

**МЕТОД РАСЧЕТА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЯНОГО КАНАЛА С УСТАНОВИВШИМСЯ НЕРАВНОМЕРНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ВОДЫ С ПЕРЕМЕННЫМ РАСХОДОМ****CALCULATION OF OPERATING PARAMETERS OF EARTH CHANNEL FOR STEADY FLOW OF WATER NONUNIFORM WITH VARIABLE FLOW**

Иваненко Юрий Георгиевич  
д.т.н., профессор  
*ФГБОУ ФПО «Новочеркасская государственная мелиоративная академия», Новочеркасск, Россия*

Ivanenko Yuri Georgievich  
Dr.Sci.Tech., professor  
*FGBOU FPO "Novocherkassk state reclamation Academy", Novocherkassk, Russia*

В работе рассматривается метод расчета гидравлических параметров земляного канала с применением полученных решений дифференциальных уравнений, описывающих процесс установившегося неравномерного течения воды в открытых руслах с переменным расходом

The technique of determining earthen channel hydraulic parameters using the solutions of differential equations describing the steady non-uniform flow of water in open channels with variable flow is shown

Ключевые слова: УСТАНОВИВШЕЕСЯ ТЕЧЕНИЕ ВОДЫ, ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ С ПЕРЕМЕННЫМ РАСХОДОМ, КОРРЕКТИВ СКОРОСТИ ПОТОКА

Keywords: STEADY FLOW OF WATER, FLUID MOTION WITH VARIABLE FLOW RATE, FLOW RATE ADJUSTMENT

Оросительные земляные каналы, имеющие протяженность русла в десятки километров, большие расходы и невысокий КПД, характеризуются значительными непроизводительными потерями воды (испарение, фильтрация, технические), что не учитывает теория водораспределения по отдельным его бьефам. В работе рассматривается метод расчета гидравлических параметров земляного канала с применением полученных решений дифференциальных уравнений, описывающих процесс установившегося неравномерного течения воды в открытых руслах с переменным расходом, позволяющий учитывать непроизводительные потери воды.

Движение воды в открытых руслах с переменным расходом представляет собой самый общий и наиболее сложный случай установившегося течения. В наиболее полном виде система дифференциальных уравнений неразрывности и движения воды с переменным, линейно изменяющимся расходом, для случая установившегося неравномерного течения может быть записана так[1]:

$$\frac{dQ}{dX} = \pm q, \quad (1)$$

$$\alpha^1 U \frac{dU}{dX} + g \frac{dH}{dX} + \frac{-U}{\omega} \frac{dQ}{dX} = g \left( i_0 - \frac{U^2}{C^2 R} \right). \quad (2)$$

Приведем уравнение (2) к виду:

$$\alpha^1 \frac{Q}{\omega^2} \frac{dQ}{dX} - \alpha^1 \frac{Q^2}{\omega^3} \frac{d\omega}{dX} + g \frac{dH}{dX} = g \left( i_0 - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} \right) m \alpha^1 \frac{Q}{\omega^2} q, \quad (3)$$

где  $\alpha^1 = \frac{c_b U m \alpha^1 U_q}{U}$  - корректив, учитывающий боковой приток (отток)

расхода воды от бортов русла;

$c_b$  - корректив скорости основного потока;

$\alpha^1$  - корректив скорости присоединяющегося (отсоединяющегося) потока, направленного под углом  $\theta$  к оси основного потока;

$\alpha^1$  - корректив скорости потока, учитывающий отделение от него (присоединение к нему) воды;

$U_q = U \cos \theta$  - скорость присоединяющегося (отсоединяющегося) потока, направленного под углом  $\theta$  к оси основного потока, м/с;

$\pm q$  - интенсивность бокового притока (оттока) расхода воды в поток (из потока), м<sup>2</sup>/с.

Решения дифференциальных уравнений (1), (3) описывают процесс установившегося неравномерного течения воды в открытых руслах с переменным расходом.

Запишем уравнение (3) в виде:

$$\left( 1 - \alpha^1 \frac{Q^2 B}{g \omega^3} \right) \frac{dH}{dX} = i_0 \left[ \left( 1 - p \frac{Q^2 B}{g \omega^3} \right) m \frac{(\alpha^1 + \alpha^1)}{U B i_0} q \frac{Q^2 B}{g \omega^3} \right] \quad (4)$$

Для потока с переменным расходом воды корректив скорости основного потока  $c_b$  меньше корректива скорости  $\alpha^1$ , так как отделение воды от основного потока вызывает интенсивное турбулентное перемешивание струй и, следовательно, значительное перераспределение скоростей.

Преобразуем уравнение (4) к виду:

$$\left(1 - \alpha \frac{Q^2 B}{g\omega^3}\right) \frac{dH}{dX} = i_0 \left[ \left(1 - p \frac{Q^2 B}{g\omega^3}\right) m \frac{[\alpha_0(1-m) + \alpha]}{UBi_0} q \frac{Q^2 B}{g\omega^3} \right], \quad (5)$$

где  $m = \frac{\alpha_0^1 U_q}{\alpha_0 U}$  - безразмерный параметр.

Для случая отсоединяющегося потока значения параметра  $m$  исследователями оцениваются по-разному. В.М. Маккавеев[2] и В. Т. Чоу[3] предлагают брать для всех случаев отсоединения потока  $m = 1$ . Г.А.Петров[4] считает скорость отсоединения, направленной по ответвлению и принимает для бокового водослива  $m = 0$ . Х. А. Навоян[5] считает возможным для случая отсоединяющегося потока брать  $m$  равным единице или больше. П.Г. Киселев [6] предлагает принимать при расчете бокового водослива  $m = 0,2 \dots 0,5$ .

Система уравнений (1), (5) решается при начальных условиях:

$$H(X_0) = H_0, \quad Q(X_0) = Q_0. \quad (6)$$

Форма поперечного сечения и характер ее изменения вдоль русла задаются в виде функциональной связи или в табличной форме. Предполагается также, что процесс течения воды с переменным расходом удовлетворяет условиям медленной и плавной изменчивости.

Выражения (1) и (5) относятся к классу обыкновенных дифференциальных уравнений с нелинейными коэффициентами. Эти коэффициенты чаще всего являются достаточно сложными функциями одной или нескольких переменных. Примем  $\alpha = 1$  и введем обозначения:

$$p = \frac{gH}{C^2 Ri_0}, \quad (7)$$

$$r = \frac{[\alpha_0(1-m) + 1]}{UBi_0} q. \quad (8)$$

Теперь уравнение (5) можно записать так:

$$\left(1 - \frac{Q^2 B}{g\omega^3}\right) d\omega = i_0 B \left[ 1 - (p \pm r) \frac{Q^2 B}{g\omega^3} \right] dX. \quad (9)$$

Введем в (9) выражение

$$\Pi_k = \frac{Q^2 B}{g \omega^3}, \quad (10)$$

преобразовав его к виду

$$(1 - \Pi_k) d\omega = i_0 B [1 - (p \pm r) \Pi_k] dX. \quad (11)$$

Функция (10) носит название параметра кинетичности потока. Из соотношения для параметра кинетичности потока можно вывести функциональные зависимости для площади поперечного сечения  $\omega = \omega(\Pi_k)$

и производной  $\frac{d\omega}{d(\Pi_k)} = f(\Pi_k)$  в виде:

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{Q^2 B}{g \Pi_k}}, \quad (12)$$

$$d\omega = \frac{2}{3} \frac{\omega}{Q} dQ - \frac{1}{3} \frac{\omega}{\Pi_k} d\Pi_k = \pm \frac{2}{3} \frac{q}{U} dX - \frac{1}{3} \frac{\omega}{\Pi_k} d\Pi_k. \quad (13)$$

Применив соотношения (12) и (13), запишем (11) так:

$$i_0 dX = \frac{(1 - \Pi_k)}{[1 - (p \pm r) \Pi_k] B} d\omega = \frac{(1 - \Pi_k)}{[1 - (p \pm r) \Pi_k] B} \left[ \pm \frac{2}{3} \frac{q}{U} dX - \frac{1}{3} \frac{\omega}{\Pi_k} d\Pi_k \right]. \quad (14)$$

Выражение (14) можно преобразовать следующим образом

$$i_0 dX = \frac{H}{3 \left(1 - \frac{2q}{3UBi_0}\right)} \frac{(\Pi_k - 1)}{\left\{ 1 - \frac{\left[ (p \pm r) \frac{2q}{3UBi_0} \right]}{\left(1 - \frac{2q}{3UBi_0}\right)} \Pi_k \right\} \Pi_k} d\Pi_k. \quad (15)$$

Дифференциальное уравнение (15) в общем случае не имеет точного решения. Поэтому для получения приближенного решения его линеаризуют, заменяя значения параметров  $H$ ,  $U$ ,  $p$  и  $r$  в его правой части на их средне- арифметические значения между створами  $k$  и  $f$  расчетного участка потока, вдоль которого ведется дифференцирование. В этом случае уравнение (15) преобразуется так:

$$i_0 dX = \frac{\bar{H}}{3(1 - \frac{2q}{3UBi_0})} \frac{(\Pi_k - 1)}{\left[ (\bar{p} \pm \bar{r}) \frac{m \cdot 2q}{3UBi_0} \right] \left\{ 1 - \frac{(\frac{m \cdot 2q}{3UBi_0})}{(1 - \frac{2q}{3UBi_0})} \Pi_k \right\} \Pi_k} d\Pi_k, \quad (16)$$

где

$$\bar{H} = \frac{1}{2}(H_k + H_f), \quad \bar{U} = \frac{1}{2}(U_k + U_f), \quad \bar{p} = \frac{1}{2} \left( \frac{gH_k}{C_k^2 R_k i_0} + \frac{gH_f}{C_f^2 R_f i_0} \right), \quad r = q \left[ \frac{\alpha_0(1-m)+1}{\bar{U}Bi_0} \right]. \quad (17)$$

Введем в (17) обозначения

$$k^1 = \frac{\left[ (\bar{p} \pm \bar{r}) \frac{m \cdot 2q}{3UBi_0} \right]}{\left( 1 - \frac{2q}{3UBi_0} \right)}. \quad (18)$$

Дифференциальное уравнение (16) примет вид

$$i_0 dX = \frac{\bar{H}}{3(1 - \frac{2q}{3UBi_0})} \frac{(\Pi_k - 1)}{\{ 1 - k^1 \Pi_k \} \Pi_k} d\Pi_k. \quad (19)$$

Проинтегрируем дифференциальные уравнения (1) и (19). Получим решения в виде:

$$i_0 X = \frac{\bar{H}}{3(1 - \frac{2q}{3UBi_0})} \left[ \ln |\Pi_k| - \frac{(k^1 - 1)}{k^1} \ln |1 - j^1 \Pi_k| \right] + Const, \quad (20)$$

$$Q = \pm qX + Const, \quad (21)$$

где постоянные интегрирования определяются из заданных граничных условий, между точками k - f некоторой линии, вдоль которой ведется дифференцирование.

Аналитические решения (20) и (21) рационально применять для расчета водотоков, характеризующихся незначительным изменением расхода притока (оттока) воды по длине русла.

Пусть величина q вдоль потока остается постоянной. Это может быть, в частности, при исследовании течения воды в земляном, необлицованном канале, когда параметр q отождествляется с мало

изменяющимся коэффициентом фильтрации. Тогда решения (20) и (21) рассматриваются в виде:

$$i_0(X_f - X_k) = \frac{(H_k + H_f)}{6(1 - \frac{2q}{3UBi_0})} \left[ \ln \left| \frac{\Pi_{K_k}}{\Pi_{K_f}} \right| - \frac{(k^1 - 1)}{k^1} \ln \left| \frac{1 - j^1 \Pi_{K_k}}{1 - j^1 \Pi_{K_f}} \right| \right], \quad (22)$$

$$(X_f - X_k) = \frac{Q_k - Q_f}{q}, \quad (23)$$

В этом случае в решениях (22), (23) и в обозначениях (18) берется нижний знак.

И, наоборот, когда параметром  $q$  оценивается интенсивность попадающих в канал осадков, например, дождевых, решения рассматриваются в виде:

$$i_0(X_f - X_k) = \frac{(H_k + H_f)}{6(1 - \frac{2q}{3UBi_0})} \left[ \ln \left| \frac{\Pi_{K_k}}{\Pi_{K_f}} \right| - \frac{(k^1 - 1)}{k^1} \ln \left| \frac{1 - j^1 \Pi_{K_k}}{1 - j^1 \Pi_{K_f}} \right| \right], \quad (24)$$

$$(X_f - X_k) = \frac{Q_f - Q_k}{q}, \quad (25)$$

Решения (22) - (25) могут быть применены для расчета гидравлических и технологических параметров канала, с учетом фильтрации или, наоборот, с учетом дождевых осадков. По результатам полученных решений составлены алгоритмы расчета и написана программа, позволяющая путем имитационных исследований выбирать оптимальное сочетание необходимых параметров канала.

**Пример расчета.** Рассчитать гидравлические и технологические параметры земляного канала трапецеидального сечения при следующих исходных данных: длина расчетного участка канала  $L = 9000.0 \text{ м}$ ; продольный уклон канала;  $i_0 = 0.00015$ ; коэффициент фильтрации  $q = 0.000041 \text{ м}^2/\text{с}$ ; коэффициент шероховатости  $n = 0.022$ ; коэффициент заложения откоса  $m = 1.5$ ; расход воды в начальном створе канала  $Q_H = 20.0 \text{ м}^3/\text{с}$ ; глубина воды в начальном створе канала  $H_H = 3.0 \text{ м}$ ; ширина

канала по дну  $b=7.0\text{м}$ , корректив скорости основного потока  $\alpha_0=1.1$ ; корректив скорости потока, учитывающий отделение от него воды  $\alpha^1=1$ .

**Решение.**

Предварительно рассчитываются значения нормальной  $H_0=2.428\text{м}$ . и критической  $H_{кр}=0.907\text{м}$ . глубин воды. Поскольку, начальная глубина воды больше нормальной и критической глубин, в канале наблюдается кривая подпора.

Расчеты, выполненные по формулам (22) - (23) с расчетным шагом  $X=1000\text{м}$ , приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета параметров установившегося неравномерного течения воды в земляном канале с переменным расходом.

X,м	Q, м <sup>3</sup> /с	H,м	S,м <sup>2</sup>	V, м/с
0	20,000	3,000	34,500	0,580
1000	19,959	3,073	35,680	0,561
2000	19,918	3,146	36,874	0,542
3000	19,877	3,219	38,084	0,525
4000	19,836	3,292	39,307	0,509
5000	19,795	3,365	40,542	0,493
6000	19,754	3,438	41,792	0,479
7000	19,713	3,510	43,058	0,464
8000	19,672	3,583	44,336	0,451
9000	19,631	3,655	45,627	0,438

**Выводы:**

1. На основе полученных решений разработан метод расчета гидравлических и технологических параметров земляных необлицованных каналов.

2. Методика поиска оптимального сочетания параметров реализована в виде программного обеспечения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иваненко, Ю.Г., Ткачев, А.А. Теоретические и прикладные проблемы гидравлики рек и каналов: Монография. Новочеркасск: ФГОУ ВПО НГМА, 2007. – 250с.
2. Маккавеев В.М., Коновалов И.М. Гидравлика. Л.: Речиздат, Л.-М., 1940. - 570 с.
3. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов.М.: Изд.-во литературы по строительству,1969. - 470 с.
4. Петров Г.А. Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути. М.: Стройиздат, 1951. - 281с.
5. Навоян Х.А. Расчет боковых водосливов на каналах прямоугольного сечения со спокойным потоком // Изв. ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева: Сборник научных трудов; ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, Ленинград, 1972. - Т.99.- С.98-107.
6. Киселев П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам. М.: Госэнергоиздат, 1972. - 312 с.