

Российская Федерация  
МИНСЕЛЬХОЗ

Южный специализированный научный центр по вопросам проектирования  
объектов мелиорации и сельскохозяйственного водоснабжения

**"ЮЖВОДПРОЕКТ"**

*№ = 1149 - В2006*

УДК. 532. 57

А.Ф. Дзюба

**МЕТОДИКА  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КАНАЛОВ  
И НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

Ростов-на-Дону

2006г.

## Содержание

	стр
Введение.....	3
Общая часть.....	6
1. Гидравлический расчет каналов.....	6
1.1. Основные задачи при гидравлическом расчете каналов.....	11
1.2. Примеры расчета каналов и анализ последствий, вызываемых при расчете каналов по формуле Павловского....	12
2. Гидравлический расчет напорных трубопроводов.....	18
2.1 Основные задачи при гидравлическом расчете напорных трубопроводов. Примеры расчета.....	20
Литература.....	27

## ВВЕДЕНИЕ

На протяжении ряда лет в ООО “Гидротехник”, ранее “Южгипроводхоз”, велись работы по теоретическому и экспериментальному исследованию природы гидравлических сопротивлений и созданию новых закономерностей движения жидкости.

Основанием для этих работ служило несовершенство эмпирических формул скорости, рекомендуемых действующими СНиП [1] и [2], для гидравлического расчета каналов и напорных трубопроводов.

К примеру, формула скорости Павловского, по данным натурных исследований ЮжНИИГиМ [3], допускает погрешность свыше 50 %, что отрицательно сказалось на строительстве Правоегорлыкского канала в Ставропольском крае (проект “Южгипроводхоза”), выражающемся в его жесточайшем размыве.

Необходимость изменения методов гидравлического расчета каналов в бетонной облицовке признает Л.Ф. Ольгаренко [4], где говорится: “Существующие методы расчета гидравлических сопротивлений лотков-каналов по квадратичным формулам, в частности по формуле Маннинга, не отвечают действительности и это приводит к несоответствию фактических расходов проектным от 5% до 40%. Из анализа 76 натурных замеров расходов воды и сравнения их с проектными видно, что большая часть расходов занижена”. При этом рекомендуется коэффициент шероховатости поверхности ж/бетонных лотков повышать, в зависимости от уклона, до 0.019, вместо рекомендуемого СНиП коэффициента шероховатости для бетонных поверхностей

0.013. Периодически несовершенство эмпирических формул скорости отмечается и в литературе.

Н.А. Ржаницын, [5], пишет, что эмпирические формулы скорости дают большие отклонения от действительных значений, ссылаясь на данные натурных исследований по сравнению точности определения скорости по старым формулам (Базена, Германека, Матакиевича и Линдбоэ) с действительно замеренными, выполненными Гидрографическим бюро в Вене.

О.М. Айвазян, [6], отмечает значительное, до 40 %, несовпадение с натурными данными результатов расчетов по современным формулам (Павловского, Агроскина, Гангилье-Куттера, Маннинга, Альтшуля, Абальянца), выполненных в широком диапазоне земляных каналов исследованиями при кафедре гидравлики МГМИ.

Многочисленность известных эмпирических формул скорости и их практическая равноценность показывает бесперспективность дальнейших экспериментальных работ по их усовершенствованию.

Предпринятыми при ООО “Гидротехник” исследованиями ставилась задача поиска закономерностей движения жидкости не опытным путем, а методом построения физической модели турбулентного потока, основанной только на первичных законах и свойствах самой воды.

Первые результаты, еще далекие от совершенства, представлены в [7].

Закономерности движения потока жидкости, используемые в настоящей методике, изложены в [8].

Новая, физическая, формула скорости равномерного движения потока жидкости впервые опубликована в [9].

Хорошо представляя негативные последствия, вызываемые строительством водопроводящих сооружений по проектам, рассчитанным в соответствии с требованиями действующих СНиП (завышение уклонов земляных каналов, влекущее к завышению строительных объемов земляных работ до 40 %; занижение фактической пропускной способности каналов в бетонной облицовке, а так же водоводов из а/цементных и полиэтиленовых труб, до 40%, и т.п.) считали необходимым предложить методику гидравлических расчетов, основанных на новых закономерностях движения жидкости, лишенных недостатков, присущих эмпирическим формулам скорости.

Соответствие данных, рассчитанных по новой методике, фактически измеренным наблюдается не только применительно к натурным исследованиям [3] и [4], но и применительно к лабораторным опытам Зегжды, Никурадзе, Шевелева, Мурина, Альтшуля.

## ОБЩАЯ ЧАСТЬ

Принципиальным отличием новых представлений о движении потока жидкости является установленное положение о том, что гидравлическое сопротивление в нем определяется не шероховатостью смоченной поверхности, являющейся основным аргументом всех эмпирических формул скорости, а интенсивностью поперечного движения частиц жидкости в потоке.

По характеру гидравлического сопротивления все многообразие турбулентных потоков следует разделять по числу Фруда  $F_r$  на два вида;

- турбулентные потоки в спокойном состоянии,  $F_r < 1.0$ ;
- турбулентные потоки в бурном состоянии,  $F_r > 1.0$ .

### 1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАНАЛОВ

При равномерном движении воды в каналах расход  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), следует определять по формуле:

$$Q = S \cdot V = S \cdot \frac{6}{\alpha} \cdot \sqrt{20 \cdot g \cdot \frac{R}{\alpha} \cdot i} ; \quad (1.1)$$

где:

$S$  - площадь живого сечения,  $\text{м}^2$ ;

$V$  - скорость течения воды,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\alpha$  - безразмерный показатель интенсивности поперечного движения частиц жидкости;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$R$  - гидравлический радиус, м;

$i$  - гидравлический уклон;

Число Фруда для каналов следует записывать в виде:

$$F_r = \frac{V^2}{gh}; \quad (1.2)$$

где:  $h$  - глубина потока, м;

Для спокойных потоков,  $F_r < 1.0$ , показатель  $\alpha$  в (1.1) следует определять по формуле:

$$\alpha = 1 + \frac{V^2}{2gh} = 1 + \frac{F_r}{2}; \quad (1.3)$$

Для бурных потоков,  $F_r > 1.0$ , показатель  $\alpha$  следует определять по формуле:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{13.5}{F_r} + \frac{5760}{Re_{cr}}}}{2}}; \quad (1.4)$$

В формуле (1.4)  $Re_{cr}$  - критическое число Рейнольдса,  $F_r = 1.0$ , следует определять по формуле:

$$Re_{cr} = \frac{V_{cr} R}{\nu}; \quad (1.5)$$

где  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости воды, м<sup>2</sup>/с;

$V_{cr}$  - критическая скорость потока с его глубиной  $h$ , при которой поток доводится до критического состояния,  $F_r = 1.0$ , а глубина  $h$  становится критической глубиной, м.

Критическую скорость потока заданной глубины  $h$ , следует определять по формуле:

$$V_{cr} = \sqrt{gh}; \quad (1.6)$$

Критический уклон для заданной глубины потока  $h$ , при котором критический расход  $Q_{cr}$  проходит при этой глубине в критическом состоянии,  $F_r = 1.0$ , в условиях равномерного движения следует определять по формуле:

$$i_{cr} = \frac{3}{640} \cdot \frac{h}{R}; \quad (1.7)$$

Критический уклон при котором заданный расход  $Q_0$  проходит по каналу в условиях равномерного движения с критической глубиной  $h_{cr}$  следует определять по формуле:

$$i_{kr0} = \frac{(\alpha_{cr})^3 \cdot (Q_0)^2}{720gR_{cr}(S_{cr})^2}; \quad (1.8)$$

где:  $\alpha_{cr} = 1.5$  - критическое значение показателя  $\alpha$ , определяется из (1.3) при  $F_r = 1.0$ ;

$S_{cr}$  и  $R_{cr}$  - площадь живого сечения и гидравлический радиус при  $h_{cr}$ .

Критическую глубину  $h_{cr}$  для заданного расхода  $Q_0$  следует определять по формулам:

а) для прямоугольного русла:

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{(Q_0)^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}; \quad (1.9)$$

где:  $B$  - ширина русла, м;

$q = \frac{Q_0}{B}$  - удельный расход, м<sup>2</sup>/с.



б) для русла любой формы поперечного сечения критическую глубину следует находить путем решения уравнения:

$$S^2 h = \frac{(Q_0)^2}{g}; \quad (1.10)$$

Решение уравнения (1.10) следует находить построением графика  $y = S^2 h$  для произвольно выбранных  $h_1, h_2 \dots$

Критическая глубина находится из графика по заданному числовому значению:  $\frac{(Q_0)^2}{g}$ .

Для трапецидального русла возможно решать уравнение (1.10) и аналитически, записав его в виде:

$$m^2 h^5 + 2bmh^4 + b^2 h^3 - \frac{(Q_0)^2}{g} = 0 \quad (1.11)$$

При этом первую производную уравнения функции  $h$  по (1.11) следует записывать по формуле:

$$f'(h) = 5m^2 h^4 + 8bmh^3 + 3b^2 h^2; \quad (1.12)$$

где:  $b$  - ширина трапецидального канала по дну, м;

$m$  - коэффициент заложения откоса.

Уравнение (1.11) следует решать методом приближений по формуле:

$$h_{cr2} = h_{cr1} - \frac{f(h_{cr1})}{f'(h_{cr1})}; \quad (1.13)$$

где:  $h_{cr2}$  - значение критической глубины во втором приближении, м;

$h_{cr1}$  - значение критической глубины в первом приближении, м;

$f(h_{cr1})$  - значение функции (1.11) при  $h_{cr1}$ , м<sup>5</sup>;

$f'(h_{cr1})$  - значение первой производной по (1.12) при  $h_{cr1}$ , м<sup>4</sup>.

Если скорость потока не задана, показатель  $\alpha$  следует определить из уравнений:

а) для потоков в спокойном состоянии:

$$\alpha^4 - \alpha^3 - \frac{360Ri}{h} = 0; \quad (1.14)$$

б) для потоков в бурном состоянии:

$$\alpha^4 - \alpha^3 \cdot \frac{i_{\sigma}}{i} - \alpha^2 - \frac{1440}{Re_{\sigma}} = 0; \quad (1.15)$$

Уравнения (1.14) и (1.15) следует решать методом приближений по формуле:

$$\alpha_2 = \alpha_1 - \frac{f(\alpha_1)}{f'(\alpha_1)}; \quad (1.16)$$

где:  $\alpha_2$  - значение  $\alpha$  во втором приближении;

$\alpha_1$  - значение  $\alpha$  в первом приближении, следует принимать между значениями от 1.0 до 1.5;

$f(\alpha_1)$  - значение соответствующих функций  $\alpha$  (1.14) или (1.15) при  $\alpha_1$ ;

$f'(\alpha_1)$  - значение первой производной этих функций при  $\alpha_1$ .

Первую производную функций  $\alpha$  следует записывать по формулам:

а) для потоков в спокойном состоянии:

$$f'(\alpha) = 4\alpha^3 - 3\alpha^2; \quad (1.17)$$

б) для потоков в бурном состоянии:

$$f'(\alpha) = 4\alpha^3 - 3\alpha^2 \frac{i_{\sigma}}{i} - 2\alpha; \quad (1.18)$$

### 1.1. Основные задачи при гидравлическом расчете каналов

а) определение глубины  $h$  при заданных  $Q_0$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $i$ .

Эта задача решается в следующей последовательности:

- – Определяется состояние потока, для чего по (1.11), (1.12) и (1.13) определяется критическая глубина  $h_{cr}$ , а затем, по (1.8) критический уклон  $i_{cr0}$ . Сравнивая заданный гидравлический уклон  $i$  с критическим уклоном  $i_{cr0}$ , определяем состояние потока: при  $i < i_{cr0}$  состояние потока спокойное, при  $i > i_{cr0}$  – бурное.
- Далее задача решается графоаналитическим способом, при котором глубина  $h$  определяется по графику  $Q = f(h)$ . Для произвольно выбранных  $h_1, h_2, \dots$ , при известных  $b, m, i$  по формуле (1.1) определяем расходы  $Q_1, Q_2, \dots$ . При этом значения  $\alpha_1, \alpha_2, \dots$  в формуле (1.1) следует определять, в зависимости от ранее определенного состояния потока, используя уравнение (1.14) для спокойного состояния потока или (1.15) – для бурного. Из построенного графика  $Q = f(h)$  по заданному значению расхода  $Q_0$  определяем значение глубины потока  $h$ .

б) Определение ширины канала по дну  $b$  при значениях  $Q_0, h, m$  и  $i$ .

Эта задача решается аналогично предыдущей. В данном случае строится график  $Q = f(b)$  [вместо  $Q = f(h)$ ], из которого по заданному расходу  $Q_0$  определяется искомое значение ширины канала по дну  $b$ .

**1.2. Примеры расчета каналов и анализ последствий, вызываемых при расчете каналов по формуле Павловского.**

Пример 1.

Заданы:  $Q_0 = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $b = 6.0 \text{ м}$ ;  $m = 1.5$ ;  $V = 1.0 \text{ м/с}$ ;

$\Delta h = 0.4 \text{ м}$  - превышение бровки канала над уровнем воды.

Определить:

а)  $h$ -глубину воды в канале;  $i$  - уклон канала;  $S_{\text{str}}$ - строительную площадь сечения канала;

б) для полученного уклона  $i$ , при тех же значениях  $Q_0$ ,  $b$  и  $m$ , по формуле скорости Павловского определить  $h'$ ,  $V'$  и  $S_{\text{str}}$ . При этом принять канал в земляном русле с коэффициентом шероховатости  $n = 0.0225$  и допускаемой неразмывающей скоростью  $V_{\text{доп}} = 0.7 \text{ м/с}$ .

Решение:

а) 1. Площадь живого сечения:

$$S = \frac{Q}{V} = \frac{20}{1} = 20 \text{ м}^2$$

2. Глубина потока

$$h = \frac{\sqrt{b^2 + 4mS} - b}{2m} = \frac{\sqrt{6^2 + 4 \cdot 1.5 \cdot 20} - 6}{2 \cdot 1.5} = 2.16 \text{ м}$$

3. Смоченный периметр

$$\chi = b + 2mh \cdot \sqrt{1 + m^2} = 6 + 2 \cdot 1.5 \cdot \sqrt{1 + 1.5^2} = 13.79 \text{ м}$$

4. Гидравлический радиус

$$R = \frac{S}{\chi} = \frac{20}{13.79} = 1.45 \text{ м}$$

5. Показатель  $\alpha$  по (1.3)

$$\alpha = 1 + \frac{V^2}{2gh} = 1 + \frac{1^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 2.16} = 1.0236$$

6. Уклон канала из (1.1)

$$i = \frac{\alpha^3 V^2}{720 \cdot gR} = \frac{(1.0236)^3 \cdot 1}{720 \cdot 9.81 \cdot 1.45} = 0.000105$$

7. Строительная глубина

$$h_{str} = h + \Delta h = 2.16 + 0.4 = 2.56 \text{ м}$$

8. Строительная площадь сечения

$$S_{str} = (b + mh_{str}) h_{str} = (6 + 1.5 + 2.56) \cdot 2.56 = 25.19 \text{ м}^2$$

б) Расчет глубины потока  $h'$ , скорости  $V'$ , и строительной площади сечения канала  $S_{str}$  по формуле Павловского при заданных  $Q_0$ ,  $b$ ,  $m$ ,  $i$  и  $n$  выполнялся известным графоаналитическим способом, который не приводится. При этом определено:

$$h' = 2.85 \text{ м};$$

$$h'_{str} = 3.25 \text{ м};$$

$$V' = 0.683 \text{ м/с};$$

$$S_{str} = 35.34 \text{ м}^2.$$

Выводы: Если построить канал в земляном русле по результатам расчета формулы Павловского при  $Q_0 = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $i = 0.000105$  и  $V' = 0.683 \text{ м/с}$ , то фактически в действительности в нем после строительства будет наблюдаться поток, соответствующий расчету по п. а). Скорость воды в канале будет больше допустимой неразмываемой -  $V = 1.0 \text{ м/с} > V_{dop} = 0.7 \text{ м/с}$ .

Фактическая скорость движения воды,  $V = 1.0 \text{ м/с}$ , окажется на 46% больше расчетной скорости  $V' = 0.683 \text{ м/с}$ .

Строительная площадь сечения канала  $S_{str}$  превысит необходимую строительную площадь сечения при фактической глубине воды  $h = 2.16 \text{ м}$ , при этом бесполезное завышение объемов земляных работ при строительстве канала составит:

$$P = \frac{(S')_{str} - S_{str}}{S_{str}} \cdot 100\% = 40.3\%$$

Именно это произошло со строительством Право-Егорлыкского канала в Ставропольском крае, о котором упоминалось выше.

Пример 2. Задано: Запроектирован канал в земляном русле с креплением дна и откосов щебнем крупностью зерен 30 мм, допускающим неразмываемую скорость 2.0 м/с.

Расчет канала выполнялся по формуле скорости Павловского.

Гидравлические параметры канала определились следующие:

$$Q_0 = 20 \text{ м}^3/\text{с}; \quad b = 6.0 \text{ м}; \quad m = 1.5; \quad V = 2.0 \text{ м/с}; \quad n = 0.025; \quad S = 10 \text{ м}^2; \\ h = 1.27 \text{ м}; \quad R = 0.95 \text{ м}; \quad i = 0.00269; \quad \Delta h = 0.4 \text{ м}; \quad S_{str} = 14.2 \text{ м}^2.$$

Определить: При заданных  $Q_0 = 20 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $b = 6.0 \text{ м}$ ;  $m = 1.5$ ;  $i = 0.00269$ ; по новой методике рассчитать фактическое состояние потока в канале ( $h$ ;  $V$ ;  $S_{str}$ ) после его строительства.

Решение : 1. Определяем критическую глубину для заданного расхода  $Q_0$ , подставляя в уравнение (1.11)  $m$ ,  $b$ ,  $Q_0$ :

$$1.5^2 h^5 + 2 \cdot 6 \cdot 1.5 h^4 + 6^2 h^3 - \frac{20^2}{9.81} = f(h)$$

$$2.25h^5 + 18h^4 + 36h^3 - 40.77 = f(h) \quad (1.19)$$

Уравнения первой производной по (1.12) записываем в виде:

$$5 \cdot 1.5^2 h^4 + 4 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 1.5 h^3 + 3 \cdot 6^2 h^2 = f'(h) \text{ или}$$

$$11.25h^4 + 72h^3 + 108h^2 = f'(h); \quad (1.20)$$

В первом приближении критическую глубину принимаем  $h_{cr1} = 0.8$ .

Подставляя ее в (1.19) и (1.20) и, вычислив  $f(h)$  и  $f'(h)$ , по (1.13) определяем значение критической глубины во втором приближении:

$$h_{cr2} = 0.8 - \frac{-14.23}{110.59} = 0.93 \text{ м}$$

В третьем приближении значение критической глубины определяем, подставляя в (1.19) и (1.20) значение  $h_{cr2}=0.93$ , тогда:

$$h_{cr3} = 0.93 - \frac{3.22}{159.74} = 0.93 - 0.02 = 0.91 \text{ м}$$

Из-за малости уточнения, дальнейший расчет прекращаем, принимая  $h_{cr}=0.91$  м.

2. Определяем критический уклон по (1.8), предварительно при  $h_{cr}=0.91$  м определив  $S_{cr}=6.7 \text{ м}^2$ ;  $\chi_{cr}=9.28$  м и  $R_{cr}=0.72$  м, т.е.:

$$i_{cr0} = \frac{1.5^3 \cdot 20^2}{720 \cdot 9.81 \cdot 0.72 \cdot 6.7^2} = 0.0059 ;$$

3. Так как,  $i=0.00269 < i_{cr0}=0.0059$ , состояние потока спокойное, поэтому показатель  $\alpha$  определяем используя уравнение (1.14).

Расчет сведен в таблицу 1.

Таблица 1

h	$\omega$	$\chi$	R	$360R/h$	$\alpha$ по(1.14)	Q по (1.1)
1.0	7.5	9.6	0.78	0.755	1.325	18.93
1.1	8.415	9.97	0.84	0.74	1.32	22.17
1.2	9.36	10.33	0.91	0.734	1.319	25.69

По данным таблицы строился график  $Q=f(h)$ , из которого расходу  $Q_0=20 \text{ м}^3/\text{с}$  соответствует глубина воды  $h=1.03$  м.

Этой глубине соответствуют:

$$S=7.77 \text{ м}^2;$$

$$V=2.57 \text{ м/с};$$

$$S_{\text{ctr}}=11.65 \text{ м}^2.$$

Выводы: Фактическая скорость воды в канале, если построить его по результатам расчета традиционным способом, на 28% будет больше расчетной, а бесполезное завышение объема выполненных земляных работ составит 21.9%.

Возможно по этой причине крепление откосов земляных каналов гравийно-щебеночным покрытием не нашло применения. Из-за переоценки роли шероховатости в гидравлическом сопротивлении расчетные уклоны каналов завышаются, при этом фактическая скорость движения увеличивается настолько, что нарушается устойчивость зерен гравийно-щебеночного покрытия и оно разрушается.

Пример 3. Задано: Запроектирован канал в бетонной облицовке, при этом скорость воды в канале повышена до 4 м/с. Расчет выполнялся по Павловскому.

Гидравлические параметры канала:

$$Q_0 = 20 \text{ м}^3/\text{с}; \quad b=6.0 \text{ м}; \quad m=1.5; \quad V=4.0 \text{ м/с}; \quad n=0.013; \quad S=5 \text{ м}^2; \\ h=0.71 \text{ м}; \quad R=0.584 \text{ м}; \quad i=0.0054.$$

Определить при заданных параметрах канала  $h=0.71 \text{ м}$ ;  $b=6.0 \text{ м}$ ;  $m=1.5$ ;  $R=0.584 \text{ м}$ ;  $i=0.0054$  фактическую пропускную способность канала.

Решение 1. Определяем критический уклон канала для заданной глубины  $h$  по (1.7):

$$i_{\text{cr}} = \frac{3}{640} \cdot \frac{h}{R} = \frac{3}{640} \cdot \frac{0.71}{0.584} = 0.0057;$$

2. Так как,  $i=0,0054 < i=0.0057$  - состояние потока в канале спокойное.



3. Показатель  $\alpha$  определяем используя уравнения (1.14) для  $f(\alpha)$  и (1.17) для  $f'(\alpha)$ . При этом:

$$f(\alpha) = \alpha^4 - \alpha^3 - \frac{360Ri}{h} = \alpha^4 - \alpha^3 - \frac{360 \cdot 0.584 \cdot 0.0054}{0.71} = \alpha^4 - \alpha^3 - 1.6; \quad (1.21)$$

$$f'(\alpha) = 4\alpha^3 - 3\alpha^2; \quad (1.22)$$

Показатель  $\alpha$  в первом приближении принимаем  $\alpha_1=1.4$ . По формуле (1.16), определив значения  $f(\alpha_1)$  по (1.21) и  $f'(\alpha_1)$  по (1.22), вычисляем значения  $\alpha$  во втором приближении:

$$\alpha_2 = 1.4 - \frac{-0.5}{5.1} = 1.498;$$

Продолжаем приближения:

$$\alpha_3 = 1.498 - \frac{0.074}{6.71} = 1.497;$$

Из-за малости уточнений дальнейший расчет прекращаем, принимаем  $\alpha = 1.497$ .

4. Фактический расход в канале определяем по формуле (1.1):

$$Q = S \cdot \frac{6}{\alpha} \cdot \sqrt{20 \cdot g \cdot \frac{R}{\alpha} \cdot i} = 5 \cdot \frac{6}{1.497} \cdot \sqrt{\frac{20 \cdot 9.81 \cdot 0.584 \cdot 0.0054}{1.497}} = 12.87 \text{ м}^3/\text{с};$$

Выводы: Фактический расход в канале  $Q = 12.87 \text{ м}^3/\text{с}$  после строительства его по результатам расчета по Павловскому на 35.6% будет меньше от расчетного  $Q_0 = 20 \text{ м}^3/\text{с}$  при наполнении его до расчетной глубины  $h=0.71 \text{ м}$ . Именно это отмечено натурными исследованиями лотков-каналов в работе [4].

## 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.

Скорость равномерного движения воды в напорном трубопроводе следует определять по формуле:

$$V = \frac{6}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{5gd_i}{\alpha}}; \quad (2.1)$$

где:  $d$  - внутренний диаметр трубопровода, м; Остальные обозначения см. (1.1).

Число Фруда для напорных трубопроводов следует записывать по формуле:

$$F_r = \frac{2V^2}{gd}; \quad (2.2)$$

Для спокойных потоков,  $F_r < 1.0$ , показатель  $\alpha$  в (2.1) следует определить по формуле:

$$\alpha = 1 + \frac{V^2}{gd} = 1 + \frac{F_r}{2}; \quad (2.3)$$

Для бурных потоков,  $F_r > 1.0$ , показатель  $\alpha$  в (2.1) следует определить по формуле:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{13.5}{F_r} + \frac{23040}{Re_{cr}}}}{2}}; \quad (2.4)$$

где  $Re_{cr}$  - число Рейнольдса для критического состояния потока,  $F_r = 1.0$ , следует определять по формуле:

$$Re_{cr} = \frac{V_{cr} d}{\nu}; \quad (2.5)$$

где  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости воды;

$V_{cr}$  - критическая скорость для заданного трубопровода диаметром  $d$ , если поток в нем довести до критического состояния,  $F_r = 1.0$ .

Критическую скорость для трубопровода заданного диаметра  $d$  следует определять по формуле:

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{gd}{2}}; \quad (2.6)$$

Критический уклон для трубопровода заданного диаметра  $d$ , при котором критический расход  $Q_{cr}$  проходит в условиях равномерного движения при  $F_r = 1.0$  следует принимать независимо от диаметра равным :

$$i_{cr} = 0.009375; \quad (2.7)$$

Объясняется это тем, что в напорном трубопроводе “свободная поверхность” потока смещена в центр трубы, а глубина потока  $h$  равна  $d/2$ .

Кроме того, для трубы гидравлический радиус  $R$  равен  $d/4$ . Поэтому формула (1.7) дает для трубопроводов постоянное значение  $i_{cr}$  независимо от диаметра.

Критический диаметр трубопровода  $d_{cr}$  при котором заданный расход  $Q_0$  проходит в критическом состоянии,  $F_r = 1.0$ , следует определять по формуле:

$$d_{cr} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot (Q_0)^2}{\pi^2 \cdot g}}; \quad (2.8)$$

Если скорость потока не задана, показатель  $\alpha$  для трубопроводов следует определять из уравнений:

а) для потоков в спокойном состоянии:

$$\alpha^4 - \alpha^3 - 180i = 0; \quad (2.9)$$

б) для потоков в бурном состоянии:

$$\alpha^4 - \alpha^3 \cdot \frac{i_{cr}}{i} - \alpha^2 - \frac{5760}{Re_{cr}} = 0; \quad (2.10)$$

Уравнения (2.9) и (2.10) следует решать аналитическим методом приближений, см формулу (1.16), при этом первую производную функции  $\alpha$  для трубопроводов следует записывать по уравнениям:

а) для потоков в спокойном состоянии:

$$f'(\alpha) = 4\alpha^3 - 3\alpha^2; \quad (2.11)$$

б) для потоков в бурном состоянии:

$$f'(\alpha) = 4\alpha^3 - 3\alpha^2 \frac{i_{cr}}{i} - 2\alpha; \quad (2.12)$$

Потери напора по длине трубопровода  $h_l$  следует определять по формуле:

$$h_l = \frac{\alpha^3}{90} \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}; \quad (2.13)$$

где:  $l$  - длина трубопровода, м;

## 2.1. Основные задачи при гидравлическом расчете напорных трубопроводов. Примеры расчета.

а) Определение расхода  $Q$  при заданных  $d$ ,  $l$ ,  $h_l$ .

Задача решается в следующей последовательности:

1. Определяется гидравлический уклон:

$$i = \frac{h_l}{l}$$

2. Определяется состояние потока, путем сравнения полученного значения уклона  $i$  с критическим  $i_{cr}$  по (2.7):

при  $i < i_{cr}$  - спокойное состояние;

при  $i > i_{cr}$  - бурное состояние.

Далее задача решается графоаналитическим способом, при котором расход  $Q$  определяется по графику  $h_l = f(Q)$ . Для произвольно выбранных  $Q_1, Q_2 \dots$ , при известных  $d$  и  $l$ , определяются потери напора по длине  $h_{l1}, h_{l2} \dots$ .

При этом значения  $\alpha_1, \alpha_2 \dots$  в формуле (2.13) следует определять в зависимости от ранее определенного состояния потока. Для спокойного состояния используется уравнение (2.3), а для бурного - (2.4).

Из построенного графика  $h_l = f(Q)$  по заданному значению потерь напора  $h_{l0}$  определяется значение расхода  $Q$ .

Пример 4. Заданы  $d=0.334$  м;  $l = 1500$  м;  $h_l = 10.5$  м. Определить: Расход  $Q$ . Кроме того, по формуле Шевелева, лежащей в основе рекомендаций действующего СНиП [2], для заданных параметров привести результаты расчета расхода воды в асбестоцементном трубопроводе и в стальном.

Решение:

1. Гидравлический уклон:

$$i = \frac{h_l}{l} = \frac{10.5}{1500} = 0.007;$$

2. Так как,  $i = 0.007 < i_{cr} = 0.009375$ , состояние потока спокойное.

Расчет графика  $h_l = f(Q)$  сведен в таблицу 2.

Таблица 2

$Q, \text{ л/с}$	$V=Q/S, \text{ м/с}$	$\alpha$ по (2.3)	$h_l$ по (2.13), м
90	1.03	1.322	6.23
100	1.14	1.397	9.03
110	1.26	1.48	13.10

По данным таблицы 2 строился график  $h_l = f(Q)$ , из которого заданному  $h_l = 10.5$  м соответствует расход  $Q=104$  л/с.

В результате расчета по [2] определено:

– в асбестоцементном трубопроводе подаваемый расход равен

$$Q = 140 \text{ л/с};$$

– в стальном трубопроводе подаваемый расход равен  $Q=110$  л/с.

Выводы: Если построить трубопровод из стальных труб, то фактический расход воды, соответствующий расчету по новой методике,  $Q=104$  л/с, будет всего на 5.5% меньше гарантированного для стальных труб  $Q=110$  л/с. Этой разницы потребитель воды обычно не замечает, что говорит о высокой точности формулы Шевелева для стальных труб.

Построенный из асбестоцементных труб водовод (в примере заданный диаметр соответствует внутреннему диаметру асбестоцементных труб ВТ-6) будет подавать расход воды в действительности на 36 л/с (25.7%) меньше, чем гарантировалось расчетом. Именно по этому поводу предъявлен и разбирается иск потребителя воды “Общества садоводов” Волгодонскому управлению оросительных систем. (В примере приведены параметры водовода, построенного для “Общества садоводов” из труб ВТ-6).

Данный пример подтверждает необходимость изменения существующих методов гидравлического расчета, т.к. подобные иски, в условиях платы за воду и электроэнергию, будут возникать постоянно.

б) Определение потерь напора по длине  $h_l$  при заданных  $Q$ ,  $d$ ,  $l$ .

Задача решается в следующей последовательности:

1. По формуле (2.8) для заданного расхода  $Q_0$  определяем критический диаметр трубопровода  $d_{cr}$ .

2. Определяем состояние потока:

при  $d > d_{cr}$  - состояние потока спокойное;

при  $d < d_{cr}$  - состояние потока бурное;

3. Определяется скорость движения потока:

$$V = \frac{Q}{S}$$

где:  $S$  - площадь сечения трубопровода.

4. Определяется показатель  $\alpha$  для спокойного состояния по формуле (2.3), для бурного - по (2.4).

5. Потери напора по длине определяются по формуле (2.13).

Пример 5. Заданы  $Q=1.5 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $d=0.8 \text{ м}$ ;  $l = 1000 \text{ м}$ .

Определить  $h_l$ .

Решение . 1. Критический диаметр трубопровода:

$$d_{cr} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 1.5^2}{3.14^2 \cdot 9.81}} = 0.94 \text{ м};$$

2. Так как,  $d < d_{cr}$  - состояние потока бурное;

3. Скорость движения потока:

$$V = \frac{1.5 \cdot 4}{3.14 \cdot 0.8^2} = 2.98 \text{ м/с};$$

4. Показатель  $\alpha$  определяется для бурного потока по (2.4), предварительно вычислив:

– критическую скорость по (2.6):

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{9.81 \cdot 0.8}{2}} = 1.98 \text{ м/с};$$

критическое значение числа Рейнольдса, по (2.5), приняв для воды  $\nu = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при  $t = 10^\circ$

$$\text{Re}_{cr} = \frac{1.98 \cdot 0.8 \cdot 10^6}{1.3} = 1.22 \cdot 10^6;$$

– число Фруда по формуле (2.2):

$$F_r = \frac{2 \cdot 2.98^2}{9.81 \cdot 0.8} = 2.26;$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{13.5}{2.26} + \frac{23040}{1.22 \cdot 10^6}}}{2}} = 1.35;$$

5. Потери напора по длине определяются по формуле (2.13):

$$h_l = \frac{1.35^3}{90} \cdot \frac{1000}{0.8} \cdot \frac{2.98^2}{2 \cdot 9.81} = 15.47 \text{ м};$$

б) Определение диаметра трубопровода  $d$  при заданных  $Q$ ,  $h_l$ ,  $l$ .

Задача решается в следующей последовательности:

1. Гидравлический уклон:

$$i = \frac{h_l}{l};$$

2. Определяем состояние потока:

при  $i < 0.009375$  - состояние потока спокойное;

при  $i > 0.009375$  - состояние потока бурное;

3. Определяется критический диаметр  $d_{cr}$  по (2.8). Далее задача решается графоаналитическим способом, при котором  $d$  определяется по графику  $h_l = f(d)$ . Для произвольных  $d_1, d_2, \dots$ , при известной  $l$ , определяются потери напора по длине  $h_{l1}, h_{l2}, \dots$ . Выбранные диаметры при спокойном потоке должны быть больше определенного ранее критического диаметра, а для бурного - меньше.



Значение  $\alpha_1, \alpha_2 \dots$  в формуле (2.13) потерь напора следует определять по состоянию потока. Для спокойных потоков используется уравнение (2.9), а для бурных - (2.10).

Из построенного графика  $h_l = f(d)$  по заданному значению потерь  $h_l$  определяется значение диаметра  $d$ .

Пример 6. Заданы:  $Q = 0.005 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $h_l = 20 \text{ м}$ ;  $l = 1000 \text{ м}$ .

Определить диаметр  $d$  трубопровода.

Решение: 1. Определяем гидравлический уклон:

$$i = \frac{h_l}{l} = \frac{20}{1000} = 0.02;$$

2. Определяем состояние потока как бурное, т.к.  $i = 0.02 > i_{cr} = 0.009375$ .

3. Критический диаметр по (2.8):

$$d_{cr} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 0.005^2}{3.14^2 \cdot 9.81}} = 0.096 \text{ м};$$

Расчет графика  $h_l = f(d)$  сведен в таблицу 3, причем при расчетах коэффициент кинематической вязкости воды принят  $\nu = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Таблица 3

d, м	$V_{cr}$ по (2.6) м/с	$Re_{cr}$ по (2.5)	$\alpha$ по (2.10)	$V=Q/S$ , м/с	$h_l$ по (2.13), м
0.07	0.586	31552	1.31	1.30	30.70
0.075	0.606	34992	1.304	1.13	21.40
0.08	0.626	38549	1.3	0.995	15.40

По данным таблицы 3 строился график  $h_l = f(d)$ , из которого заданному  $h_l = 20 \text{ м}$  соответствует диаметр трубопровода  $0.076 \text{ м}$ .

Проверим расчет, определив для найденного диаметра  $d = 0.076 \text{ м}$  при  $Q = 0.005 \text{ м}^3/\text{с}$  и длине  $l = 1000 \text{ м}$  величину потерь напора, используя для определения показателя  $\alpha$  формулу (2.4):

1. Скорость движения потока:

$$V = \frac{4 \cdot 0.005}{3.14 \cdot 0.076^2} = 1.1 \text{ м/с};$$

2. Число Фруда по (2.2):

$$F_r = \frac{2 \cdot 1.1^2}{9.81 \cdot 0.076} = 3.25;$$

3. Критическая скорость по (2.6);

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{9.81 \cdot 0.76}{2}} = 0.61 \text{ м/с};$$

4. Критическое значение числа Рейнольдса:

$$Re_{cr} = \frac{0.61 \cdot 0.76 \cdot 10^6}{1.3} = 35661;$$

5. Показатель  $\alpha$  по (2.4):

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \frac{13.5}{3.25} + \frac{23040}{35661}}}{2}} = 1.305;$$

6. Потери напора по длине по формуле (2.13):

$$h_l = \frac{1.305^3}{90} \cdot \frac{1000}{0.076} \cdot \frac{1.1^2}{2 \cdot 9.81} = 20.04 \text{ м};$$

Расчетные потери при проверке совпали с заданными потерями напора по длине  $h_l = 20$  м, что подтверждает правильность найденного диаметра.

## Литература

1. СНиП 2.06.03-85. Мелиоративные системы и сооружения. ГОССТРОЙ СССР. М86.
2. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Стройиздат. М. 85.
3. Научный отчет. Исследования размываемости Право-Егорлыкского оросительно-обводнительного канала. Т.5, Р.2, Вып.1825. ЮжНИИГиМ, г. Новочеркасск, 1963.
4. Ольгаренко Л.Ф. Натурные и лабораторные исследования гидравлических сопротивлений потока в лотковых каналах и метод их расчета. Диссертация, ЮжНИИГиМ, 1974.
5. Ржаницын Н.А. Речная гидравлика. Ч.1, М, Госэнергоиздат. 1934.
6. Айвазян О.М. Сравнительная оценка современных формул по расчету коэффициента Шези. "Гидротехника и мелиорация", № 11, 1979.
7. Дзюба А.Ф. Новая модель турбулентного потока жидкости. Деп.рук. №1627-В90. ВИНТИ.
8. Дзюба А.Ф. Новая (физическая) теория турбулентного потока жидкости. Деп. рук., ООО "Гидротехник", Р/Д. 1999
9. Дзюба А.Ф. Новая формула скорости турбулентного потока и объяснение опытов А.П. Зегжды. "Гидротехническое строительство", №6, 1999.

Печатается в соответствии с решением технического совета  
Южного специализированного научного центра «Южводпроект» от  
« 29 » августа 2006 г. протокол № 1 .