

УДК 502/504:556.53

Ю. М. КОСИЧЕНКОФедеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»)**Е. Г. УГРОВАТОВА**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)»
имени М. И. Платова**ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИ ВЫГОДНОГО ПРОФИЛЯ ПОЛИГОНАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ КРУПНЫХ КАНАЛОВ И ИХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

Предлагается приближенный способ определения гидравлически выгодных полигональных сечений, близких к гидравлически наивыгоднейшим. Обобщены данные гидравлических натурных исследований крупных каналов полигонального профиля на юге России. На основе компьютерной математической обработки получены эмпирические зависимости для расчета гидравлических сопротивлений.

Гидравлически выгодный профиль, крупный канал, полигональное сечение, гидравлические сопротивления.

There is proposed an approximate method for determination of hydraulically advantageous polygonal cross sections similar to the most advantageous hydraulic ones. The data of hydraulic field investigations of large canals of the southern Russia with polygonal profile are generalized. On the basis of the data computer mathematical processing empirical dependencies are obtained for calculation of hydraulic resistances.

Hydraulically advantageous profile, large channel, polygonal cross-section, hydraulic resistance.

В гидравлических расчетах каналов используется понятие гидравлически наивыгоднейшего сечения, которое при заданной площади живого сечения имеет наибольшую пропускную способность, или заданный расход в котором проходит при минимальной площади живого сечения [1, 2]. В земляных каналах минимизация площади сечения приводит к уменьшению объема выемки, а следовательно, к экономии затрат.

Каналы гидравлически наивыгоднейшего профиля получают относительно узкими и глубокими, что осложняет их строительство и эксплуатацию. Поэтому такие сечения не для крупных каналов оросительных систем (магистральных и распределительных). Их применение ограничивается дренажными и мелкими оросительными каналами. В работе С. О. Курбанова отмечается, что для энергетических деривационных каналов в большей степени подходят также гидравлически наивыгоднейшие сечения [3].

Впервые А. А. Угинчусом, а затем А. М. Латышенковым предложено перечные сечения большинства каналов

выполнять близкими к гидравлически наивыгоднейшему профилю за счет незначительного уменьшения средней скорости течения на 2...3 % [1, 2]. Применение этого метода позволяет переходить от неудобных и невыгодных с точки зрения производства работ узких и глубоких «абсолютно гидравлически наивыгоднейших сечений» с относительной шириной по дну $\beta = b/h = 0,25...0,83$ к более удобным «практическим» трапецидальным сечениям с $\beta = 2,2...4,4$ [2]. Назовем такой профиль канала гидравлически выгодным, который, с одной стороны, имеет высокую пропускную способность, с другой – удобен с практической точки зрения.

Одна из целей проведенного авторами исследования – это разработка методики определения гидравлически выгодного профиля для крупных земляных каналов полигонального сечения, которые широко используются для каналов переброски стока комплексного назначения, а также для магистральных оросительных каналов.

Широкое применение полигональных сечений в крупных каналах

объясняется тем, что они близко подходят к естественной плавной форме русла и имеют параболическую форму.

В работах С. О. Курбанова и И. С. Румянцева приведены исследования полигональных профилей энергетических каналов [3, 4]. Так, для полигональных каналов с тремя парами симметричных откосов получены следующие формулы для гидравлически наивыгоднейшего сечения:

$$\beta_{г.н.} = 2m_3\alpha_3 + 2m_2\alpha_2, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha_2 = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\sqrt{1+m_1^2}}{\sqrt{1+m_2^2}}, \quad \alpha_3 = \frac{h_3}{h_1} = \frac{\sqrt{1+m_1^2}}{\sqrt{1+m_3^2}},$$

$\beta_{г.н.} = B_1/h_1$ – относительная ширина гидравлически наивыгоднейшего сечения; B_1 – ширина по низу верхней части полигонального сечения; h_1, h_2, h_3 – глубина в верхней, средней и нижней частях сечения; α_2, α_3 – относительные глубины средней и нижней частей полигонального сечения.

Рассмотрим определение полигонального поперечного сечения с тремя парами симметричных откосов, выгодного с гидравлической точки зрения (рис. 1).

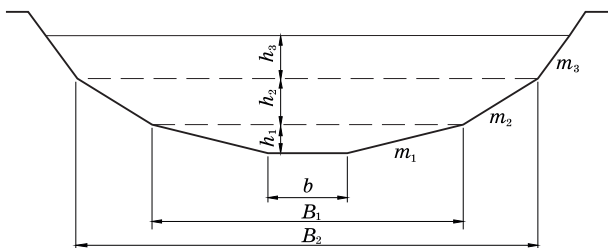


Рис. 1. Сечение канала полигональной формы

На рисунке 1 и далее обозначения полигональной формы сечения канала – по А. М. Латышенкову [2]: h_1, m_1 – соответственно глубина и заложение откоса нижней части; h_2, m_2 – соответственно глубина и заложение откоса средней части; h_3, m_3 – соответственно глубина и заложение откоса верхней части сечения; b – ширина по дну. Введем также обозначение предельной относительной ширины полигонального сечения – по Р. Р. Чугаеву – $\beta_{пред}$ [5].

Для определения $\beta_{пред}$ учитываем следующие исходные данные: Q – расход канала; i – уклон дна русла; n – коэффициент шероховатости русла; h_1, h_2, h_3 – глубины элементов полигонального сечения; m_1, m_2, m_3 – заложение откосов элементов сечения.

В качестве основного уравнения используем уравнение равномерного

движения в канале для задач типа (3) или (5), когда по исходным данным находится модуль расхода K [5]:

$$\frac{Q}{\sqrt{i}} = K = \omega C \sqrt{R}, \quad (2)$$

где ω – площадь сечения канала; C – коэффициент Шези; R – гидравлический радиус.

При этом учтем принятые А. М. Латышенковым соотношения между гидравлическими параметрами сечения, близкого к гидравлически наивыгоднейшему, и «абсолютного» гидравлически наивыгоднейшего [2]:

$$A_U = \frac{U}{U_{г.н.}} = \frac{\omega_{г.н.}}{\omega}, \quad (3)$$

где A_U – коэффициент скорости, принимаемый равным 0,97; $U, U_{г.н.}$ – соответственно средние скорости живого сечения близкого и гидравлически наивыгоднейшего сечения; $\omega, \omega_{г.н.}$ – соответственно площади живого сечения близкого и гидравлически наивыгоднейшего сечения.

С учетом сложности решения задачи для полигонального сечения для упрощения расчетов целесообразно использовать понятие о приведенном значении заложения откоса $m_{пр}$, которое позволяет заменять полигональное сечение канала фиктивным трапецидальным с приведенным значением заложения откоса [2]:

$$m'_{пр} = \frac{m'_1 + \alpha_2 m'_2 + \alpha_3 m'_3}{1 + \alpha_2 + \alpha_3}, \quad (4)$$

где $m'_i = 2\sqrt{1+m_i^2}$ ($i=1,2,3$); $\alpha_2 = \frac{h_2}{h_1}$, $\alpha_3 = \frac{h_3}{h_1}$.

Значение $m_{пр}$ найдем из выражения

$$m'_{пр} = 2\sqrt{1+m_{пр}}, \text{ откуда } m_{пр} = 2\sqrt{\frac{m'^2_{пр}}{4}} - 1. \quad (5)$$

Тогда относительная ширина трапецидального сечения рассчитывается по общеизвестной формуле с учетом приведенного заложения откоса:

$$\beta_{г.н.} = \left(\frac{e}{h}\right)_{г.н.} = 2\left(\sqrt{1+m_{пр}^2} - m_{пр}\right). \quad (6)$$

Заменяя в правой части уравнения (2) гидравлические параметры следующими выражениями в соответствии с (3):

$$\omega = 1,03\omega_{г.н.} = 1,03h_{г.н.}^2 (\beta_{г.н.} + m_{пр});$$

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{h(\beta_{пред} + m_{пр})}{(\beta_{пред} + 2\sqrt{1+m_{пр}^2})};$$

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = \frac{1}{n} \left[\frac{h(\beta_{пред} + m_{пр})}{(\beta_{пред} + 2\sqrt{1+m_{пр}^2})} \right]^{1/6}$$

запишем его в виде

$$\frac{Q}{\sqrt{i}} = 1,03 h_{г.н}^2 (\beta_{г.н} + m_{пр}) \frac{1}{n} \left[\frac{h(\beta_{пред} + m_{пр})}{(\beta_{пред} + 2\sqrt{1+m_{пр}^2})} \right]^{2/3}$$

После преобразований получим выражение для определения предельной относительной ширины фиктивного трапецеидального профиля канала гидравлически выгодного сечения, близкого к гидравлически наивыгоднейшему сечению:

$$\beta_{пред} = \frac{2\sqrt{1+m} (Q \cdot n)^{3/2}}{h \left[i^{0,5} 1,03 h_{г.н}^2 (\beta_{г.н} + m_{пр}) \right]^{3/2} - (Q \cdot n)^{3/2}} - \frac{h m_{пр} \left[i^{0,5} 1,03 h_{г.н}^2 (\beta_{г.н} + m_{пр}) \right]^{3/2}}{h \left[i^{0,5} 1,03 h_{г.н}^2 (\beta_{г.н} + m_{пр}) \right]^{3/2} - (Q \cdot n)^{3/2}} \quad (7)$$

Заменяя $h = 0,713 h_{г.н}$, согласно [2], перепишем (7) в более общем виде:

$$\beta_{пред} = \frac{A \cdot 2\sqrt{1+m_{пр}^2} - B \cdot m_{пр}}{B - A}, \quad (8)$$

где $A = (Q \cdot n)^{3/2}$; $B = 0,713 h_{г.н}^4 \left[1,03 \cdot i^{0,5} (\beta_{г.н} + m_{пр}) \right]^{3/2}$.

Расчет $\beta_{пред}$ по уравнению (8) проводится методом последовательных приближений с учетом задания параметра $h_{г.н}$. При этом изменение значений $h_{г.н}$ лежит в диапазоне

$$\sqrt[4]{\frac{A}{B'}} \leq h_{г.н} \leq \sqrt[4]{\frac{(A \cdot 2\sqrt{1+m_{пр}^2})}{B' m_{пр}}}$$

где $B' = 0,713 \left[i^{0,5} \cdot 1,03 (\beta_{г.н} + m_{пр}) \right]^{3/2}$.

Выбор рекомендуемого значения относительной ширины русла канала β осуществляется в интервале между гидравлически наивыгоднейшими $\beta_{г.н}$ и предельным значением $\beta_{пред}$:

$$\beta_{г.н} < \beta < \beta_{пред}$$

Учитывая, что полигональные профили каналов имеют, как правило, распластанные сечения, рекомендуемое значение β следует назначить близким к $\beta_{пред}$, например: $\beta = (0,8 - 0,95) \beta_{пред}$. Для облицованных каналов вместо $\beta_{пред}$ целесообразно ввести параметр β_0 для сечения с минимальными потерями на фильтрацию через облицовку [6].

Другая цель работы – получение расчетных формул гидравлических сопротивлений для полигональных сечений крупных каналов в земляном русле.

Поскольку наибольшее количество таких каналов расположено на юге Рос-

сии, то для вывода расчетных эмпирических формул используем имеющиеся данные натуральных наблюдений на Большом Ставропольском канале – 1-я очередь (БСК-1), Донском МК, Пролетарском МК, Терско-Кумском, Невинномыском и Баксан-Малка [7].

Обработка указанных натуральных данных осуществлялась авторами по известным формулам [8]. Из натуральных данных установлено, что среднее значение коэффициента шероховатости $n_{ср} = 0,0227$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_n = 0,00179$ и ошибке среднего значения $\sigma_{n_{ср}} = 1,27 \%$. Доверительный интервал изменения коэффициентов шероховатости при 95 % вероятности составил 0,0221...0,0232.

На рисунке 2 представлены графические зависимости вида $\lambda = f(Re)$, построенные в логарифмических координатах по данным наблюдений [7].

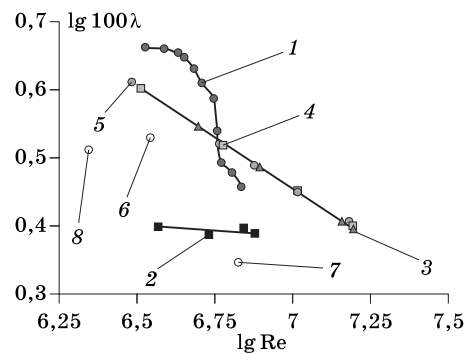


Рис. 2. Графические зависимости гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса: 1 – Баксан-Малка; 2 – Невинномыский; 3 – БСК-1 (1...7 км); 4 – БСК-1 (7...16 км); 5 – БСК-1 (16...27 км); 6 – ДМК; 7 – Пролетарский; 8 – ТКК

Анализ полученных зависимостей в логарифмических осях свидетельствует о том, что они представляют собой убывающие прямые или кривые. Такие кривые, согласно классическим исследованиям Никурадзе и А. П. Зегжда, относятся к переходной (доквадратичной) области сопротивлений [9]. Однако четко логарифмическая или степенная зависимость прослеживается только для одной кривой БСК-1 (кривая здесь выпрямляется и снижается по мере

увеличения чисел Re).

Теперь найдем эмпирические зависимости, используя всю совокупность натуральных данных для земляных русел каналов полигонального сечения, включающих 9 каналов и участков и 39 результатов измерений.

Математическую обработку натуральных данных проводили на персональном компьютере с помощью пакета программ Microsoft Excel. Некоторые выпадающие значения натуральных данных исключались из дальнейшей обработки.

Из анализа натуральных данных были выявлены следующие функциональные зависимости:

$$n = f(Q); \lambda = f(Re).$$

По результатам компьютерной обработки построены следующие графики (рис. 3, 4) и получены следующие эмпирические формулы:

$$n = 0,0256Q^{-0,024} (R^2 = 0,839);$$

$$\lambda = 9,375Re^{-0,359} (R^2 = 0,828).$$

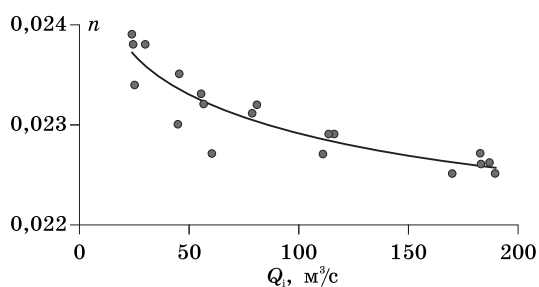


Рис. 3. График зависимости $n = f(Q)$

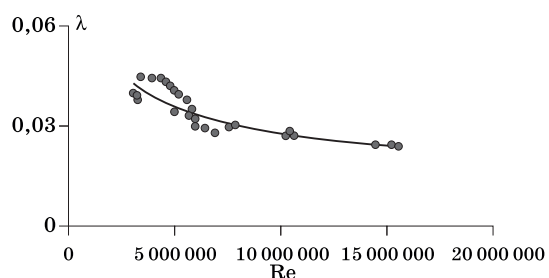


Рис. 4. График зависимости $\lambda = f(Re)$

Полученные зависимости позволяют непосредственно рассчитывать основные гидравлические характеристики русел каналов полигонального сечения n , λ по одной заданной характеристике – Q или Re .

Рассмотрим далее получение ряда полуэмпирических зависимостей гидрав-

лических сопротивлений русел каналов, основанных на теории турбулентности Прандтля–Никурадзе.

А. П. Зегжда в результате обширных экспериментальных исследований на основе теории турбулентности получил расчетные формулы для открытых русел применительно ко всем областям сопротивлений (гладких русел, переходной и квадратичной области) [9].

Поскольку для крупных каналов в земляном русле наблюдается в основном переходная область сопротивления, то приведем в общем виде уравнение применительно к этой области [8, 9]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_R}} = A + B \lg \frac{R}{k_s},$$

где A и B – постоянные, определяемые по опытным данным; k_s – эквивалентная шероховатость русла; R – гидравлический радиус; λ_R – коэффициент гидравлического трения по R .

Из предыдущего уравнения, учитывая соотношение $C = \sqrt{2g/\lambda_R}$, получим:

$$C = \sqrt{2g} \left(A + B \lg \frac{R}{k_s} \right).$$

Используя натурные данные для БСК-1 (1...27 км), на основании математической обработки значений гидравлических параметров при $Q_{\max} = 182,60 \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{\min} = 25,23 \text{ м}^3/\text{с}$ получены значения постоянных [10]: $A = 2,74$; $B = 4,92$.

Тогда формула, записанная для расчета коэффициента Шези крупных каналов с расходом более $25 \text{ м}^3/\text{с}$, будет иметь следующий вид:

$$C = \sqrt{2g} \left(2,74 + 4,92 \lg \frac{R}{k_s} \right).$$

После некоторых преобразований приводим ее к виду, аналогичному формуле И. И. Агроскина:

$$C = \frac{1}{n} + 21,77 \lg R.$$

Последняя формула отличается от известной зависимости И. И. Агроскина только постоянным коэффициентом перед логарифмом: вместо 17,72 используется 21,77. Применение этого коэффициента позволяет учесть переходную область сопротивлений и полигональную форму русла крупных каналов.

Авторами также получена зависимость для коэффициента Шези бетонных русел каналов трапецеидального сечения по натурным данным каналов в облицовке БСК-3 и Бг-Р-7 [7]:

$$C = \sqrt{2g} \left(1,07 + 5,551g \frac{R}{k_s} \right).$$

Как показало сравнение результатов расчета с логарифмической формулой А. Д. Альтшуля [11], полученной также для бетонных русел, наиболее точные результаты дает формула авторов, в то время как формула А. Д. Альтшуля имеет отклонения результатов вдвое больше.

Выводы

Предлагается приближенный способ определения гидравлически выгодных полигональных сечений крупных каналов, близких к гидравлически невыгоднейшим сечениям, на основе замены полигональных сечений фиктивными трапецеидальными с приведенным значением заложения откоса.

Получена формула для расчета предельной относительной ширины полигонального сечения $\beta_{\text{пред}}$, которая дает результаты для всего сечения и позволяет найти диапазон приемлемых решений с учетом получения более распластанных профилей, что характерно для полигональных каналов.

На основе анализа натурных данных получены эмпирические зависимости для расчета коэффициентов шероховатости и гидравлических сопротивлений применительно к полигональным сечениям русел каналов в переходной области сопротивлений.

Получены уточненные полуэмпирические формулы коэффициентов Шези для полигональных земляных и трапецеидальных бетонных русел каналов, которые дают лучшую сходимость с натурными данными, чем формулы других авторов.

1. Угинчус А. А. Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов. – М.: Стройиздат, 1965. – 274 с.

2. Каналы систем водоснабжения и ирригации (рекомендации по проектированию и эксплуатации каналов) / А. М. Латышенков [и др.] – М.: Стройиздат, 1972.

– 153 с.

3. Курбанов С. О. Развитие теории, методов расчетного обоснования и проектирования каналов и зарегулированных русел с полигональным поперечным сечением: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП. 2013. – 55 с.

4. Курбанов С. О., Румянцев И. С. Методика и модель расчетного обоснования энергетических каналов полигонального профиля // Природообустройство. – № 5. – 2011. – С. 42–46.

5. Чугаев Р. Р. Гидравлика (техническая механика жидкости). – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.

6. Косиченко Ю. М. Гидравлическая эффективность и экологическая надежность облицованных каналов // Гидротехническое строительство. – 1992. – № 12. – С. 12–17.

7. Косиченко Ю. М. Каналы переборки стока России. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 470 с.

8. Косиченко Ю. М. Закономерности изменения гидравлических сопротивлений земляных русел каналов при эксплуатации // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 107–111.

9. Зегжда А. П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. – М.: Госстройиздат, 1975. – 278 с.

10. Косиченко Ю. М., Угроватова Е. Г. Гидравлические и эксплуатационные критерии функционирования крупных каналов перераспределения стока // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 5.

11. Гидравлические потери на трение в водоводах электростанций / А. Д. Альтшуль [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 104 с.

Материал поступил в редакцию 26.09.13.

Угроватова Евгения Геннадьевна, старший преподаватель

Тел. 8-908-517-99-88

E-mail: jenyaugrovatova@rambler.ru

Косиченко Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке

Тел. 26-51-11

E-mail: rosniipm@novoch.ru