

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 626.823.004:532.5

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ КРИТЕРИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КРУПНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА

© 2013 г. Ю.М. Косиченко, Е.Г. Угроватова

Косиченко Юрий Михайлович – д-р техн. наук, профессор, зам. директора по науке, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации». Тел. (863)26-51-11. E-mail: rosniipm@novoch.ru

Kosichenko Yuri Mikhaylovich – Doctor of Technical Sciences, professor, Deputy Director for Science, FSSE «Russian scientific research institute of problems of amelioration». Ph. (863)26-51-11. E-mail: rosniipm@novoch.ru

Угроватова Евгения Геннадьевна – ст. преподаватель, кафедра ВХИСЗОС, Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт). E-mail: jenyaugrovatova@rambler.ru

Ugrovatova Evgenia Genadyevna – senior teacher, department VHSZOS, South-Russia State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute). E-mail: jenyaugrovatova@rambler.ru

На основе анализа опыта эксплуатации сформулированы критерии функционирования каналов переброски стока по пропускной способности русел, допускаемым скоростям, коэффициенту полезного действия и показателю технического состояния. На базе известных формул И.И. Агроскина и А.Д. Альтишюля для определения коэффициента Шези с использованием натурных данных для одного из крупных каналов юга России получены усовершенствованные расчетные зависимости, которые сопоставлены с другими известными формулами.

Ключевые слова: крупные каналы; критерии функционирования; коэффициент Шези.

In this work operation criteria of the runoff diversion channels by the delivery capacity of river beds, admissible speeds, coefficients of efficiency and the technical condition indicator were formulated based on the analysis of operating experience. Based on the well-known I.I. Agroskin's and A. D. Altshulja's formulae for the definition of the Shezi coefficient, improved calculation dependences were obtained with the use of full-sized data for the one of the largest channels of the south of Russia. Our equations were also compared with the other known formulae.

Keywords: large channels; operation criteria; Shezi coefficient.

В настоящее время в России имеется 37 систем межбассейнового перераспределения стока, которые перебрасывают 17 км³ воды в год по каналам общей протяженностью около 3 тыс. км. К ним относятся такие крупнейшие судоходные и магистральные каналы оросительных систем [1], как Беломоро-Балтийский, Волго-Балтийский, канал им. Москвы, Большой Ставропольский (БСК), Донской магистральный (ДМК), Невинномысский, Терско-Кумский и другие. Многие из них используются комплексно для целей водоснабжения, орошения, обводнения, энергетики, судоходства, рекреации.

Особенностями крупных каналов переброски стока часто являются круглогодичная их эксплуатация, значительная протяженность русел, воздействие на откосы ветровых волн, образование русловых деформаций, оползание откосов, прорывы дамб на участках в насыпи и на косогоре, зарастание русел в береговой зоне, большие потери воды при фильтрации из земляных русел, подтопление территорий, прилегающих к каналам.

Обобщающие исследования в области гидравлических расчетов и надежности работы крупных кана-

лов представлены в работах В.С. Алтунина, И.Ф. Карасева, Г.В. Железнякова, Ц.Е. Мирцхулавы, Ю.М. Косиченко [2 – 6] и др.

На основании анализа этих исследований, а также накопленного опыта эксплуатации ряда крупных каналов [6] могут быть сформулированы следующие критерии их функционирования, которые могут быть отнесены к категории гидравлических и эксплуатационных:

а) по пропускной способности:

$$\alpha' Q_{\text{пр}} \leq Q \leq Q_{\text{пр}};$$

б) по допускаемым скоростям:

$$U_{\text{нез}} < U \leq U_{\text{нер}};$$

в) по коэффициенту полезного действия:

$$\beta' \eta_{\text{нор}} \leq \eta \leq \eta_{\text{нор}};$$

г) по показателю технического состояния:

$$\sigma' P_{\text{т.с.тр}} \leq P_{\text{т.с}} \leq P_{\text{т.с.тр}};$$

где Q , $Q_{\text{пр}}$ – фактическая и проектная (расчетная) пропускная способность; α' – показатель снижения

пропускной способности вследствие влияния неучтенных факторов (изменение сечения, локальные размывы, заиливание русел, обрушение откосов, зарастание в береговой зоне) при эксплуатации; U , $U_{\text{нез}}$, $U_{\text{нер}}$ – средняя, допускаемая незаиливающая и неразмывающая скорости движения воды в каналах; η , $\eta_{\text{нор}}$ – фактический и нормативный (по СП 100.13330.2012) коэффициенты полезного действия (КПД) каналов; β' – показатель снижения КПД вследствие влияния неучтенных факторов при эксплуатации; $P_{\text{т.с}}$, $P_{\text{т.сгр}}$ – показатели технического состояния канала – фактический и требуемый; σ' – коэффициент снижения показателя технического состояния.

Рассмотрим теперь определение показателей α' , β' и σ' , используя с этой целью имеющиеся данные натурных наблюдений по каналам юга России [6, 7].

Для оценки показателя снижения пропускной способности крупных каналов α' при наличии данных наблюдений за расходами используем следующее соотношение: $\alpha' = Q/Q_{\text{пр}}$ (где Q – замеренный расход в канале при нормальном уровне воды; $Q_{\text{пр}}$ – проектный расход) [7].

При неизвестном расходе Q показатель α' можно рассчитать приближенно по коэффициентам шероховатости русел каналов, используя известные формулы гидравлики для расходов Q и $Q_{\text{пр}}$ при равномерном движении потока

$$\alpha' = \frac{Q}{Q_{\text{пр}}} = \frac{\omega C \sqrt{Ri}}{\omega_{\text{пр}} C_{\text{пр}} \sqrt{R_{\text{пр}} i_{\text{пр}}}}, \quad (1)$$

где ω , $\omega_{\text{пр}}$ – площадь живого сечения потока при эксплуатации и проектная при нормальном уровне воды в канале; C , $C_{\text{пр}}$ – коэффициент Шези соответственно при эксплуатации и проектный; R , $R_{\text{пр}}$ – гидравлический радиус при эксплуатации и проектный; i , $i_{\text{пр}}$ – уклон дна канала при эксплуатации и проектный.

Подставляя в уравнение (1) вместо коэффициента Шези C и $C_{\text{пр}}$ соответствующие выражения, например по формуле Н.Н. Павловского, и принимая допущение о том, что при нормальном состоянии канала параметры ω , R и i будут близки к проектным, т.е. приближенно можно считать $\omega = \omega_{\text{пр}}$, $R = R_{\text{пр}}$, $i = i_{\text{пр}}$, после сокращений будем иметь $\alpha' \approx \frac{n_{\text{пр}}}{n}$, где n , $n_{\text{пр}}$ – коэффициент шероховатости русла канала соответственно при эксплуатации и проектный.

Показатель снижения КПД каналов β' найдем из соотношения $\beta' = \frac{\eta}{\eta_{\text{пр}}}$, где η , $\eta_{\text{пр}}$ – КПД канала соответственно при эксплуатации и проектный.

Показатель снижения технического состояния каналов σ' можно найти согласно СП 58.13330.2012 из условия общей прочности и устойчивости по соотношению

$$\sigma' = \gamma_{1c} \gamma_n \frac{F}{R},$$

где γ_{1c} , γ_n – коэффициенты соответственно сочетания нагрузок и надежности (СП 58.13330.2012); F , R – расчетное значение соответственно обобщенного силового воздействия или деформации при эксплуатации и обобщенной несущей способности или деформации по нормам проектирования.

В табл. 1 приведены сводные натурные данные гидравлических показателей (Q , n , η) эксплуатации каналов переброски стока юга России, расположенных в ЮФО и СКФО. На основании проведенной нами статистической обработки представленных данных получены следующие значения показателей: по 10 каналам – среднестатистическое значение показателя снижения пропускной способности $\bar{\alpha}' = 0,958$ при среднеквадратичной ошибке $\sigma_{\bar{\alpha}'} = 0,00452$; по 23 каналам – среднестатистическое значение показателя снижения КПД $\bar{\beta}' = 0,935$ при $\sigma_{\bar{\beta}'} = 0,0121$.

Показатель σ' , ввиду отсутствия данных по обобщенному силовому воздействию, не устанавливался. Ориентировочно его можно принимать в первом приближении в диапазоне от 0,920 до 0,940.

При эксплуатации каналов переброски стока основной гидравлической характеристикой является пропускная способность или расход Q . Обычно расход для установившегося равномерного движения потока в канале определяется по формуле Шези, где важным параметром является коэффициент Шези C .

Параметр C играет определяющую роль при вычислении пропускной способности канала, поскольку учитывает суммарно все гидравлические сопротивления при движении потока по руслу. Для вычисления параметра C известно большое количество эмпирических формул, среди которых ряд формул, рекомендованных нормами (по СНиП 2.06.03-85) – это формулы Н.Н. Павловского, И.И. Агроскина и Маннинга. Однако эти формулы применимы только для квадратичной области сопротивления. Как показано в работах [8, 9], для подавляющего количества земляных русел каналов России наблюдается переходная (доквадратичная) область сопротивлений. Поэтому для таких русел могут применяться полуэмпирические формулы, например, А.П. Зегжды [10], И.И. Агроскина [4], степенная формула А.Д. Альтшуля [11], которые справедливы не только в квадратичной, но и в переходной области сопротивлений. Однако эти формулы нуждаются в уточнении применительно к земляным руслам крупных каналов переброски стока юга России.

Для уточнения расчетных формул А.П. Зегжды – И.П. Агроскина и А.Д. Альтшуля для переходной области сопротивлений используем данные натурных гидравлических исследований канала переброски стока БСК-1 на головном участке протяженностью 27 км [6], которые приведены в табл. 2 во всем диапазоне изменения расходов от максимального до минимального значения на данном участке.

Таблица 1

**Сводные натурные данные гидравлических показателей эксплуатации каналов
переброски стока юга России и расчетные значения показателей α' и β'**

№ п/п	Канал	Q , м ³ /с	n	$\alpha' = \frac{n_{np}}{n}$	η	$\beta' = \frac{\eta}{\eta_{np}}$
1	Донской МК	201,0	0,0268	0,933	0,90	0,967
2	Пролетарский МК	54,0	0,0203	0,985	0,85	0,944
3	Терско-Кумский	80,0	0,0237	0,949	-	-
4	БСК-1 (1-7 км)	25,84-189,19	0,0238-0,0225	0,945-1,0	-	-
5	БСК-1 (7-16 км)	25,01-186,15	0,0238-0,0226	0,945-0,995	-	-
6	БСК-1 (16-27 км)	23,84-182,17	0,0239-0,0227	0,941-0,991	-	-
7	БСК-1 (1-27 км)	25,23-182,60	0,0234-0,0226	0,961-0,995	0,928	1,31
8	Невинномысский	30,0-75,0	0,0215-0,0250	0,930-1,0	0,75	0,882
9	БСК-3	46,5	0,0172	0,988	0,80	0,941
10	БСК-4	53,0	-	-	0,85	0,944
11	Баксан-Малка	10,0-27,0	0,0210	0,905	-	-
12	Право-Егорлыкский (ПЕМК)	45,0	0,0225	0,975	0,75	0,882
13	Багаевский МК	34,6	-	-	0,75	0,894
14	Азовский МК	22,0	-	-	0,78	0,939
15	Верхнесальский МК	30,0	-	-	0,70	0,823
16	Нижедонской МК	30,0	-	-	0,76	0,883
17	Большовский МК	22,5	-	-	0,73	0,839
18	Садковский МК	11,4	-	-	0,86	0,925
19	Александровский МК	21,0	-	-	0,90	1,058
20	Саблинский р-ль	21,0	-	-	0,80	0,941
21	Чернолесский р-ль	8,0	-	-	0,85	1,0
22	Грушовский р-ль		-	-	0,90	1,06
23	Октябрьский р-ль	10,5	-	-	0,85	0,944
24	Елизаветенский р-ль	13,5	-	-	0,80	0,941
25	Левая ветвь ПЕМК	23,0	-	-	0,75	0,882
26	Бг-Р-6	7,2	-	-	0,77	0,906
27	Бг-Р-7	7,5	-	-	0,85	0,894
28	Бг-Р-8	9,0	-	-	0,87	0,906

Принимая за основу общее уравнение А.П. Зегжды [10], запишем его в виде

$$C = \sqrt{2g} \left(A + B \lg \frac{R}{K_3} \right), \quad (2)$$

где A и B – постоянные, определяемые по опытным данным; K_3 – эквивалентная шероховатость русла.

На основании математической обработки представленных опытных данных нами были получены следующие значения постоянных, входящих в формулу (2): $A = 2,74$; $B = 4,92$.

Далее, используя уравнение (2), найдем полуэмпирическую зависимость коэффициента Шези аналогично И.И. Агроскину применительно к крупным каналам в земляном русле с расходами более 50 м³/с. Эта формула будет отличаться от известной зависимости И.И. Агроскина значениями постоянных A и B ,

которые характерны только для крупных каналов переброски стока при условии переходной области сопротивлений.

Тогда формула (2) для расчёта коэффициента Шези крупных каналов переброски стока получит вид

$$C = \sqrt{2g} \left(2,74 + 4,92 \lg \frac{R}{K_3} \right),$$

которая после некоторых преобразований приводится к виду, аналогичному формуле И.И. Агроскина:

$$C = \frac{1}{n} + 21,77 \lg R. \quad (3)$$

Данная формула (3) отличается от известной зависимости И.И. Агроскина только постоянным коэффициентом перед логарифмом: вместо 17,72 используется 21,77. Применение этого коэффициента позво-

ляет учесть переходную область сопротивлений для крупных каналов в земляном русле.

Для любых областей сопротивлений также известна степенная формула А.Д. Альтшуля [3]. Используем эту формулу для переходной области в общем виде

$$C = A \left(\frac{R}{K_3 + \frac{B}{\sqrt{Ri}}} \right)^m, \quad (4)$$

где A, B, m – постоянные.

Проводя необходимую математическую обработку опытных данных, представленных в табл. 2, получим значения постоянных $A = 29$; $B = -0,000283$, $m = 0,117$.

Тогда после подстановки постоянных A, B, m в (4) найдем уточненную зависимость для условий крупных земляных каналов, работающих в переходной области

$$C = 29 \left(\frac{R}{K_3 - \frac{0,000283}{\sqrt{Ri}}} \right)^{0,117}, \quad (5)$$

где параметры R и k_3 приводятся в метрах.

Преимуществом данной зависимости перед формулой А.Д. Альтшуля (4) является то, что она впервые получена для метровой размерности основных параметров R и K_3 , что более удобно в расчетах.

Проведем теперь проверку полученных формул с натурными данными, представленными в табл. 2.

Подставляя в формулы (3) и (5) значения параметров R и K_3 во всем диапазоне исследованных расходов от максимального до минимального, найдем расчетные значения коэффициентов Шези $C_{расч}$, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Данные натурных исследований на головном участке БСК-1 (1-27 км) при уклоне $i = 0,00015$ и результаты сравнения коэффициентов Шези по формулам

Q , м ³ /с	h , м	V , м/с	R , м	n	K_3 , м	$C_{натур}$, м ^{0,5} /с	Критерий области сопротивлений $\lg \left(\frac{V_* K_3}{\nu} \right)$	Область сопротивлений
182,60	5,03	1,17	3,24	0,0226	0,0325	55,66	3,35	Граница переходной и квадратичной
110,68	4,02	1,00	2,54	0,0227	0,0334	52,87	3,31	Переходная
78,56	3,49	0,89	2,16	0,0231	0,0371	50,39	3,32	Переходная
55,68	3,03	0,79	1,83	0,0233	0,0391	48,36	3,31	Переходная
25,23	2,16	0,62	1,29	0,0234	0,0401	44,95	3,24	Переходная

Продолжение табл. 2

Сравнение расчётного коэффициента Шези по формулам $C_{расч}$ с натурным $C_{натур}$, м ^{0,5} /с											
По формуле (3)	δ , %	По формуле (5)	δ , %	По формуле Агроскина	δ , %	По формуле Агроскина – Штеренлихта	δ , %	По формуле Альтшуля	δ , %	По формуле Мамедова	δ , %
55,36	-0,53	52,7	-5,3	53,30	-4,2	54,83	-1,5	53,91	-3,1	53,16	-4,7
52,86	-0,02	51,45	-2,7	51,22	-3,1	52,43	-0,8	51,52	-2,5	51,11	-3,3
50,57	+0,36	49,76	-1,3	49,22	-2,3	50,17	-0,4	49,27	-2,2	49,10	-2,6
48,63	+0,57	48,64	+0,6	47,57	-1,6	48,30	-0,1	47,51	-1,7	47,46	-1,9
45,13	+0,4	47,29	+5,2	44,69	-0,6	45,01	-0,1	44,62	-0,7	44,65	-0,7

Анализ значений критерия области сопротивлений Прандтля – Никурадзе (см. табл. 2) показывает, что согласно исследованиям [8], при квадратичной области сопротивлений $\lg\left(\frac{V_* K_9}{\nu}\right) > 3,35$ (где $V_* = \sqrt{gRI}$, ν – кинематическая вязкость воды), практически во всём диапазоне наблюдаемых расходов на БСК-1 имеет место переходная (доквадратичная) область сопротивлений. В связи с этим полученные формулы (3) и (5) вполне применимы для определения коэффициента Шези таких каналов.

Сопоставление расчетных значений коэффициента Шези по формуле (3) с натурными (табл. 2) свидетельствует о хорошей их сходимости во всем диапазоне расходов с минимальными отклонениями в пределах от 0,02 до 0,57 %. В то же время по формуле (5) расхождение между расчетными $C_{расч}$ и натурными $C_{нат}$ существенно возрастает до 5,3 %, что не позволяет её рекомендовать для использования.

Кроме того, нами проведено сравнение коэффициентов Шези и по другим общеизвестным формулам [12]: И.И. Агроскина (1949 г.), И.И. Агроскина – Д.В. Штеренлихта (1965 г.), А.Д. Альтшуля, А.Ш. Мамедова [13], результаты которых представлены в табл. 2, а также по формулам Н.Н. Павловского (1925 г.), Д.В. Штеренлихта (1985 г.) и Г.В. Железнякова (1968 г.).

Из этих рассмотренных формул наиболее точные совпадения с натурными измерениями получены по формуле И.И. Агроскина – Д.В. Штеренлихта, где расхождение составило от 0,1 до 1,5 %. Остальные зависимости дают расхождение расчетных и натуральных значений C от 0,6 до 4,7 %.

Вывод

На основании выполненного анализа разработаны гидравлические и эксплуатационные критерии функционирования крупных каналов переброски стока, которые позволяют обеспечить их надежную эксплуатацию в течение нормативного срока службы.

С целью уточнения пропускной способности земляных русел крупных каналов нами рекомендуется усовершенствованная формула коэффициента Шези, применимая для переходной области сопротивлений, аналогичная по структуре известной полуэмпирической формуле И.И. Агроскина, полученной для квадратичной области сопротивлений.

Литература

1. Водные ресурсы и водное хозяйство России в 2009 году: стат. сб. М., 2010. 372 с.
2. Алтунин В.С. Мелиоративные каналы в земляном русле. М., 1979. 255 с.
3. Карасев И.Ф. Русловые процессы при переброске стока. Л., 1975. 288 с.
4. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. Л., 1981. 311 с.
5. Мирихулава Ц.Е. О надежности крупных каналов. М., 1981. 318 с.
6. Косиченко Ю.М. Каналы переброски стока России. Новочеркасск, 2004. 470 с.
7. Вероятностная модель эксплуатационной надежности крупных каналов / Ю.М. Косиченко [и др.] // Гидротехническое строительство, 2007. № 12. С. 39 – 45.
8. Косиченко Ю.М. Закономерности изменения гидравлических сопротивлений земляных русел при эксплуатации // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2011. № 4.
9. Айвазян О.М. Зона гидравлического сопротивления земляных каналов // Гидротехническое строительство. 1987. № 11, С. 54 – 58.
10. Зегжда А.П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. Л.; М., 1957. 287 с.
11. Гидравлические потери на трение в водоводах электростанций / А.Д. Альтшуль [и др.]. М., 1985. 104 с.
12. Косиченко Ю.М. Гидравлика мелиоративных каналов. Новочеркасск, 1992. 175 с.
13. Мамедов А.Ш. О расчете коэффициента Шези речного потока // Природообустройство. 2011. № 3. С. 62 – 67.