

УДК 627.84:532.55

Ю. М. Косиченко (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ЗЕМЛЯНЫХ РУСЕЛ КАНАЛОВ

Рассматривается влияние различных эксплуатационных факторов на пропускную способность земляных русел каналов: русловых деформаций, заиления, зарастания водной растительностью. Представлены расчетные формулы для определения коэффициентов шероховатости в случае русловых деформаций и зарастания каналов. Приведены результаты обобщения натурных исследований влияния зарастания русел на коэффициенты шероховатости и гидравлических сопротивлений.

Ключевые слова: земляные русла каналов, пропускная способность, русловые деформации, заиление, зарастание, коэффициент шероховатости, коэффициент гидравлических сопротивлений.

Yu. M. Kosichenko

INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON GROUND CHANNELS CAPACITY

Influences of operational factors on ground channels capacity are considered: channel deformation, sedimentation, overgrowth of aquatic vegetation. Formulas for calculating the roughness coefficient in the case of channel deformations and overgrown channels are presented. Results of generalization of observed data influence the channels overgrowth on the roughness coefficient and hydraulic resistance are given.

Keywords: ground channels, channel capacity, channel deformation, sedimentation, overgrowth, the coefficient of roughness, the coefficient of hydraulic resistance.

В настоящее время подавляющее большинство (около 70 %) каналов оросительных систем выполнено в земляном русле. К их числу относится и ряд крупных каналов переброски стока на Юге России: Донской магистральный, Невинномысский, Терско-Кумский, Большой Ставропольский (I очередь), Право-Егорлыкский, Кумо-Манычский. Общая протяженность только крупных оросительных каналов на Юге России с расходом более $10 \text{ м}^3/\text{с}$ составляет 23128 км [1].

Согласно В. С. Алтунину [2], каналы в земляном русле по условиям работы разделяют на устойчивые (статические или динамические) и неустойчивые. При этом к устойчивым каналам относят те каналы, которые сохраняют неизменными очертания поперечного сечения, продольный уклон

и положение в плане; а к неустойчивым – каналы, в которых могут наблюдаться процессы размыва или/и заиления.

Статически устойчивые каналы характеризуются неизменной геометрической формой в процессе их эксплуатации. Средние скорости течения таких каналов, как правило, не превышают допустимых не размывающих $U/U_0 < 1,0$, а любые деформации русла – полностью отсутствуют.

В динамически устойчивых каналах геометрическая форма сохраняется при условии некоторого количества донных наносов, а отношение средней скорости к допустимой не размывающей изменяется в пределах $U/U_0 = 1,1-1,3$.

Для неустойчивых каналов движение наносов приводит к образованию крупных русловых деформаций в виде гряд, побочней и меандр, изменяющих первоначальное очертание поперечного сечения при отношении скоростей $U/U_0 > 1,3$.

Следует отметить, что русловые деформации в основном наблюдаются для крупных каналов динамически устойчивых и неустойчивых. Для мелких каналов деформации происходят в виде обрушения откосов и заиления русла.

В процессе длительной эксплуатации таких каналов характерно образование различных процессов, влияющих в той или иной степени на пропускную способность земляных русел [2]:

- деформация русел;
- русловые явления;
- заиление;
- подмывы берегов;
- зарастание водной растительностью;
- обрушение откосов;
- «подсечки» откосов русла в зоне уреза воды.

Указанные эксплуатационные факторы могут оказывать дополнительные сопротивления для потока, снижая пропускную способность русла.

Как известно, пропускная способность русел каналов при равномерном движении рассчитывается по формуле Шези:

$$Q = \omega C \sqrt{RJ}, \quad (1)$$

где ω – площадь живого сечения потока;

C – коэффициент Шези;

R – гидравлический радиус;

J – уклон водной поверхности, который при равномерном движении принимается равным уклону дна i .

При условии постоянства ω , R , J в формуле (1) пропускная способность будет зависеть от коэффициента Шези C , который, собственно, и учитывает основное сопротивление при движении потока.

Если использовать наиболее простую зависимость для определения коэффициента Шези – формулу Маннинга:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (2)$$

то наглядно видно, что коэффициент Шези зависит обратно пропорционально от параметра шероховатости русла – коэффициента шероховатости n . Следовательно, чем больше коэффициент шероховатости n , тем меньше коэффициент Шези и, соответственно, пропускная способность (расход) русла.

Часто в гидравлике коэффициент Шези связывают с другим параметром – коэффициентом гидравлических сопротивлений (коэффициентом Дарси) λ в виде соотношения:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}. \quad (3)$$

Гидравлические сопротивления и шероховатость русел каналов могут быть определены по данным натуральных наблюдений из формул (1)-(3) как:

$$n = \frac{R^{2/3} J^{1/2}}{U}; \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{8gRJ}{U^2}, \quad (5)$$

где U – средняя скорость потока в живом сечении, определяется по зависимости $U = \frac{Q}{\omega}$.

Отсюда анализ влияния эксплуатационных факторов на пропускную способность русла каналов может быть проведен по двум параметрам – n и λ .

Рассмотрим далее оценку и соответствующие зависимости для определения дополнительных сопротивлений, возникающих при различных деформациях русел и зарастании водной поверхности.

Достаточно часто встречаемыми деформациями земляных русел каналов при их эксплуатации являются размывы, намывы и обрушение откосов.

В монографии И. Ф. Карасева [4] приведены данные натурных наблюдений на Невинномысском канале в земляном русле по коэффициентам шероховатости. Согласно этим исследованиям, коэффициент шероховатости участков канала без деформаций русла составил 0,020, а при наличии деформаций русла в виде размыва и намыва (заиления) он увеличивается до 0,0225-0,0250, что составляет от 12,5 % до 20 % по сравнению с деформируемым руслом.

Учитывая эти данные, можно приближенно учесть влияние деформаций земляных русел канала на шероховатость (гидравлические сопротивления) и пропускную способность с помощью дополнительного сопротивления $\lambda_{\text{деф}}$ к коэффициенту λ_{Δ} , отражающему зернистую шероховатость:

$$\lambda = \lambda_{\Delta} + \lambda_{\text{деф}}, \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{деф}} = 0,125\lambda_{\Delta}$ – при размыве русла;

$\lambda_{\text{деф}} = 0,20\lambda_{\Delta}$ – при намыве (заилении) русла.

На каналах в земляных руслах при определенных условиях [2, 3] могут образовываться русловые деформации в виде рифелей (мелких форм донного рельефа) и гряд (более крупных форм).

Г. В. Железняков в этом случае рекомендует находить суммарный коэффициент гидравлического сопротивления как сумму сопротивления зернистой шероховатости λ_{Δ} и грядовой λ_r :

$$\lambda = \lambda_{\Delta} + \lambda_r. \quad (7)$$

Из данного выражения (7) с учетом соотношения (3) получим:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{1}{C_{\Delta}^2} + \frac{1}{C_r^2}. \quad (8)$$

Коэффициент Шези зернистой шероховатости в формуле (8) определяется по обычным формулам гидравлики (Маннинга, Павловского, Агро-скина), а для грядовой шероховатости рекомендуется формула В. С. Кнороза [6]:

$$C_r = 3,16\sqrt{g} \left(\frac{R}{h_r} \right)^{1/8} \cdot \left(\frac{l_r}{h_r} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

где $\frac{R}{h_r}$ – относительная высота гряды;

l_r – длины гряды;

$\frac{l_r}{h_r}$ – крутизна гряды.

По результатам выполненных исследований В. И. Елфимовым [6] с использованием натуральных данных, получены следующие зависимости для коэффициента шероховатости дюнно-грядового рельефа:

для дюнного рельефа ($d_{cp} \leq 0,5$ мм; $F_r \leq 0,17$):

$$n_d = 0,023 \left[\frac{h_d}{\left(\frac{U}{U_0} \right) - \left(\frac{U_1}{U_0} \right)_0} \right]^{0,55}; \quad (10)$$

для грядового рельефа ($d_{cp} > 0,7$ мм; $F_r > 0,22$):

$$n_r = 0,027 \frac{h_r}{\left[\left(\frac{U}{U_0} \right) - \left(\frac{U_1}{U_0} \right)_0 \right]}, \quad (11)$$

где h_d, h_r – высота дюн и гряд;

U – средняя скорость течения воды в русле;

U_0 – не размывающая скорость, по Ц. Е. Мирцхулаве;

U_d, U_r – скорость начала образования дюнно-грядового рельефа:

$$\left(\frac{U_d}{U_0} \right)_0 = 1,07 \div 1,1; \quad \left(\frac{U_r}{U_0} \right)_0 = 1,15 \div 1,18.$$

Основной интегральной характеристикой шероховатости русла является коэффициент шероховатости n , который учитывает как зернистую шероховатость, так и макрошероховатость [2].

Из формулы Шези следует, что коэффициент шероховатости зависит от трех переменных $n = n(R, J, U)$, т.е. от гидравлического радиуса R , характеризующего форму русла, продольного или гидравлического уклона J и средней скорости в живом сечении потока U .

В работе В. С. Алтунина и Л. В. Ларионовой [10] установлена взаимосвязь коэффициента шероховатости и кинематического показателя x для несвязных песчаных грунтов русла с осветленным потоком ($\rho < 0,5$ кг/м³), по данным исследований Каракумского канала в виде соотношения:

$$n = 0,73(x + 0,019)^2, \quad (12)$$

а также зависимость коэффициента шероховатости от относительной ширины потока $\frac{B}{h_{cp}}$:

$$n = 5,0 \cdot 10^{-6} \left(50 - \frac{B}{h_{cp}} \right)^{2,5} + 0,018, \quad (13)$$

где $x = \frac{U_n - U}{U} = \frac{\sqrt{g}}{Ck}$;

B – ширина русла канала по урезу воды;

h_{cp} – средняя глубина русла.

Анализ результатов наблюдений за гидравлическими параметрами Каракумского канала показал, что одним из определяющих критериев взаимодействия оттока и деформируемого русла является относительная скорость $\frac{U}{U_0}$, и относительная ширина русла $\frac{B}{h_{\text{cp}}}$.

Исходя из вышеизложенного, В. С. Алтуниным и Л. В. Ларионовой [10], предложена следующая зависимость:

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 2,05 \left(\frac{B}{h_{\text{cp}}} \right)^{0,575} \left(\frac{U}{U_0} \right)^{0,3} \quad (14)$$

Одним из основных факторов на малых и крупных каналах с расходом до $50 \text{ м}^3/\text{с}$, существенно влияющих на пропускную способность земляных русел, как показывают данные натурных исследований, является зарастание их полупогруженной (камыш, рогоз, осока) и погруженной (рдест, роголистник, хара и др.) водной растительностью.

Автором проведены теоретические исследования и получены расчетные формулы для определения коэффициента шероховатости для наиболее общего случая с учетом береговой растительности и водорослей, а также случайного характера их распределения [8].

Общий вид зависимости для вычисления коэффициента шероховатости заросшего русла канала имеет вид:

$$\begin{aligned} n = n_0 & \sqrt{\frac{\chi_0}{\chi} \left(\frac{U'_0}{U} \right)^2 + \frac{\chi_p}{\chi} \left(\frac{U_p}{U} \right)^2 + \frac{\chi_{\text{вод}}}{\chi} \left(\frac{U'_{\text{вод}}}{U} \right)^2} + \\ & + \sqrt{\frac{R^{4/3}}{2g \cdot n_0^2} \left[C_d \bar{d} \frac{\omega_p}{\omega} \left(\frac{U_p}{U} \right)^2 \left(\bar{N} + \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) \right]}}, \quad (15) \\ & + \sqrt{k \frac{\lambda'_p}{4} \cdot \frac{h_p}{\omega} \left(\frac{U'_0}{U} \right)^2 + \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \left(\frac{U'_0}{U} \right)^2 \cdot \ln \frac{(\bar{v} \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!}} \end{aligned}$$

где n , n_0 – коэффициенты шероховатости соответственно заросшего и не заросшего русла;

U , U'_0 – средние скорости течения в заросшем и не заросшем русле;

U_p , $U_{\text{вод}}$ – средние скорости части русла с растительностью и водорослями;

χ_0 , χ_p , $\chi_{\text{вод}}$ – смоченные периметры не заросшей части русла, с растительностью и водорослями;

C_d – коэффициент лобового сопротивления растений;

\bar{N} – средняя плотность растений на единицу площади;

λ'_p , $\lambda'_{\text{вод}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления части русла с растительностью и водорослями;

\bar{v}_0 , \bar{v}_p – средняя интенсивность растительности и водорослей;

P_N , P_1 – вероятность распределения растительности и водорослей;

\bar{d} , h_p – средний диаметр растений и глубина воды на части русла с растительностью.

Полагая, что $\frac{U_p}{U} \approx 0$, $\frac{U_{\text{вод}}}{U} \approx 0$, $\frac{U'_0}{U} \approx \frac{\omega}{\omega_0}$, – получим приближенную за-

висимость для оценки коэффициента шероховатости заросшего русла канала:

$$n = n_0 \sqrt{\frac{\chi_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{\chi \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} + \frac{R^{4/3}}{2g \cdot n_0^2} \left[k \frac{\lambda'_p}{4} \cdot \frac{h_p}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \frac{\lambda'_{\text{вод}}}{4} \cdot \frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \cdot \ln \frac{(\bar{v}_1 \omega_{\text{вод}})^m}{P_1 m!} \right]} \quad (16)$$

При полном зарастании русла и отсутствии водорослей (когда $\chi_0 = 0$, $\chi_p = \chi$, $\lambda'_p = 0$, $\lambda'_{\text{вод}} = 0$, $U_p = U$) зависимость для коэффициента шероховатости имеет вид:

$$n = n_0 \sqrt{1 + \frac{R^{4/3}}{2g \cdot n_0^2} \left[C_d \bar{d} \cdot \left(\bar{N} + \sigma_N \sqrt{2 \ln \frac{\bar{v}_0}{P_N}} \right) \right]} \quad (17)$$

Пренебрегая в выражении (17) единицей без учета случайного характера распределения растительности, получим зависимость, которая совпадает с известной формулой Э. Л. Беновицкого:

$$n = \sqrt{C_d \bar{d} \cdot \frac{R^{4/3}}{2g} N} \quad (18)$$

Значения коэффициентов гидравлических сопротивлений $\lambda'_{\text{вод}}$ можно получить в результате расчетов по данным натурных исследований канала в бетонном русле Бг-Р-7 [8], которое составило $\lambda'_{\text{вод}} = 0,256$.

Анализ расчетов по вышеприведенным формулам позволяет сделать следующие выводы [8]:

- при степени зарастания русла канала водной растительностью $\frac{\omega_p}{\omega} < 0,4$ коэффициент шероховатости заросшего русла изменяется несущественно (не более 25-30 %);

- при степени зарастания $\frac{\omega_p}{\omega} > 0,6$ коэффициент шероховатости резко возрастает и может превысить коэффициент шероховатости незаросшего русла в 8-10 раз;

- влияние водорослей на коэффициент шероховатости русла ощутимо сказывается при $\frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} > 0,2$ (более чем в 2,5 раза), а при $\frac{\omega_{\text{вод}}}{\omega} > 0,4$ он увеличивается по сравнению с не заросшим руслом более чем в 10-100 раз;

- случайный характер распределения растительности существенно сказывается на увеличении коэффициента шероховатости русла при густоте растительности $\bar{N} > 10$ шт./м², а при меньшем значении это влияние пренебрежительно мало (не более 5-10 %).

Для изучения характера изменения коэффициентов шероховатости земляных русел каналов используем данные натурных наблюдений по 15 каналам, в основном Северного Кавказа [9], на основании которых по-

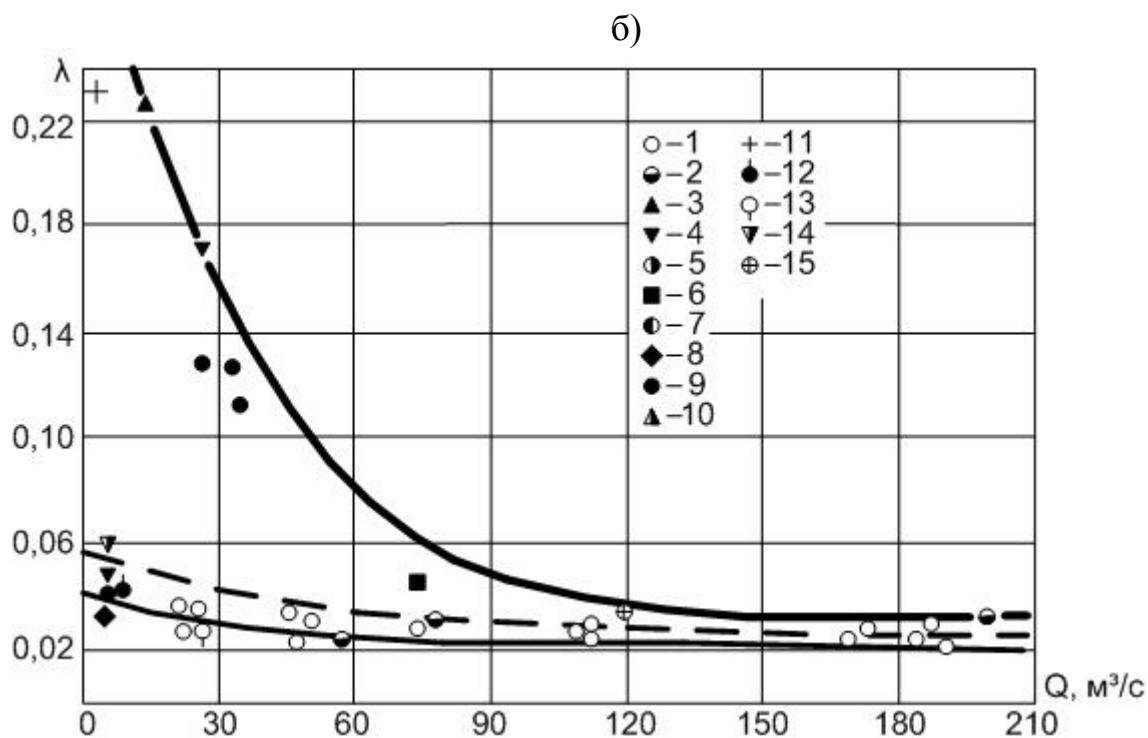
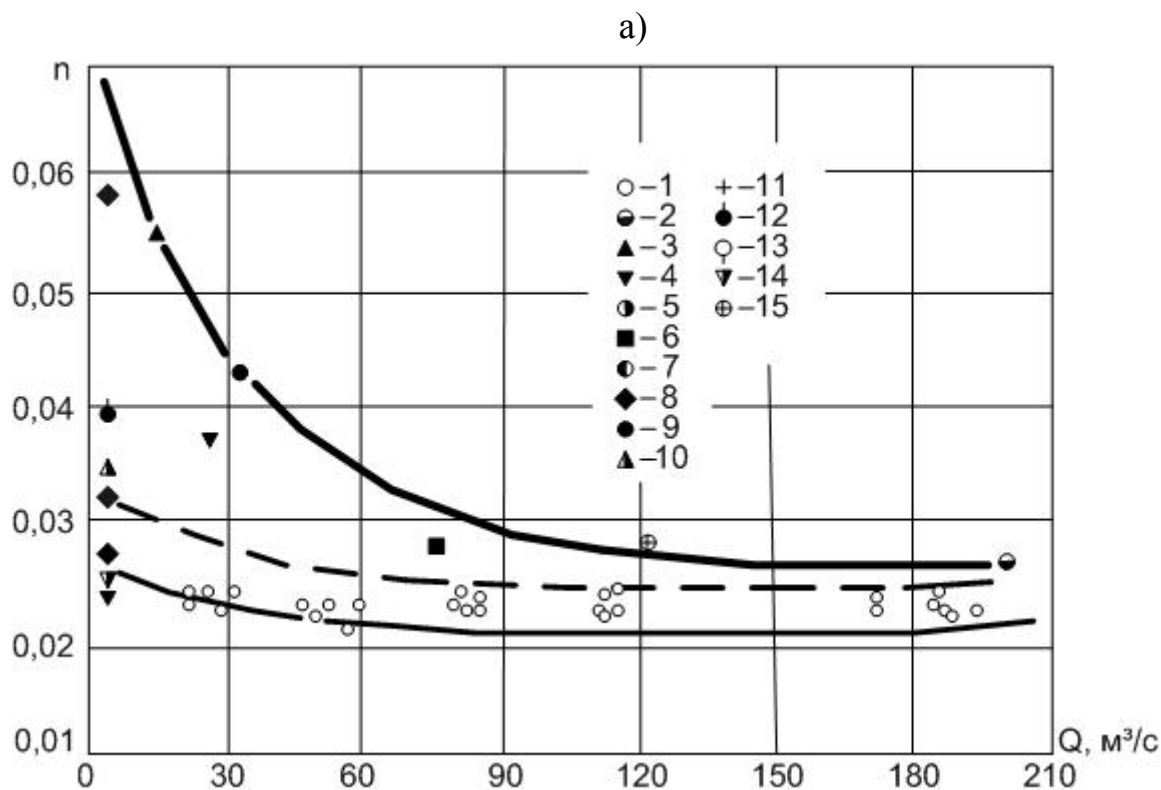
строим обобщенные графики зависимостей $n = n(Q)$ и $\lambda = \lambda(Q)$ (рисунок 1а, б).

Анализ натуральных данных коэффициентов шероховатости (n) в зависимости от расходов воды в каналах (рисунок 1а) позволяет выделить две зоны распределения шероховатости земляных русел: с нижней границей, соответствующей минимальным значениям n , и верхней границей с максимальными значениями n . Штриховую линию, проведенную приближенно, можно принять за границу раздела двух зон: нормального состояния и области повышенных коэффициентов шероховатости, обусловленных существенным влиянием различных факторов эксплуатации (деформаций русла, зарастанием, заилением).

Для земляных русел каналов (Азовский МК и Солдатский I), где в процессе исследований было отмечено сильное зарастание водной растительностью (камышом) [7, 8], значения коэффициентов n достигают максимума 0,055-0,060, которые превышают для соответствующих расходов при нормальном состоянии земляных русел (Нижне-Донской МК, Бг-Р-6 и Солдатский II) в 2,2-2,4 раза. Однако такое большое влияние зарастания каналов на коэффициент шероховатости характерно только для малых и средних каналов с расходами от 1,0 до 75,0 м³/с. Для крупных каналов при расходах более 75,0 м³/с влияние зарастания существенно уменьшается. Так, при расходах от 75,0 до 90,0 м³/с коэффициенты n максимально повышаются в 1,3-1,45 раз, а при Q от 90,0 до 200,0 м³/с – в 1,20 раз.

Кроме того, при одном и том же состоянии русел, в том числе нормальном, коэффициенты n с увеличением расходов снижаются. Это также подтверждается исследованиями на 1-ой очереди Большого Ставропольского канала [8].

Аналогичные закономерности распределения также наблюдаются для гидравлических сопротивлений λ в зависимости от расхода (рисунок 1б).



1 – БСК-1; 2 – Донской МК; 3 – Азовский МК; 4 – Нижне-Донской МК; 5 – Пролетарский;
 6 – Невинномысский; 7 – Терско-Кумский; 8 – Солдатский I; 9 – Сев. Донец-Донбасс;
 10 – Теплушка; 11 – Солдатский II; 12 – Распределитель № 67; 13 – Баксан-Малка;
 14 – Бг-Р-6; 15 – Днепр-Донбасс

**Рисунок 1 – Графики зависимостей $n = n(Q)$ и $\lambda = \lambda(Q)$
 для каналов в земляном русле**

Сравнивание полученных графических зависимостей позволяет заключить следующее.

1 Нижняя граница зоны шероховатости и гидравлических сопротивлений представляет собой плавную кривую асимптотически приближающую к горизонтальной. Верхняя граница зоны n и λ характеризуется резким изменением кривой вначале, которая затем выполаживается и также асимптотически приближается к горизонтали.

2 Влияние зарастания русел каналов особенно сильно проявляется вначале зон n и λ при относительно небольших расходах от 1,0 до 20,0-30,0 м³/с. Здесь значения коэффициентов шероховатости и гидравлических сопротивлений при зарастании превышают их по сравнению с нормальным состоянием русел каналов более чем в 2 раза.

Список использованных источников

1 Щедрин, В. Н. Безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Е. И. Шкуланов. – М.: Росинформагротех, 2011. – 268 с.

2 Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1978. – 25 с.

3 Железняков, Г. В. Пропускная способность русел каналов и рек / Г. В. Железняков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.

4 Карасев, И. Ф. Русловые процессы при переброске стока / И. Ф. Карасев. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 288 с.

5 Чоу, В. Т. Гидравлика открытых каналов / В. Т. Чоу: [пер. с англ.]. – М.: Стройиздат, 1969. – 464 с.

6 Рабкова, Е. К. Проектирование и расчет оросительных каналов в земляном русле / Е. К. Рабкова. – М.: УДН, 1990. – 252 с.

7 Долгушев, И. А. Повышение эксплуатационной надежности оросительных каналов / И. А. Долгушев. – М.: «Колос», 1975. – 136 с.

Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, № 3(03), 2011 г.

8 Косиченко, Ю. М. Каналы переброски стока России / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 470 с.

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

10 Алтунин, В. С. Гидравлические сопротивления крупных земляных каналов в несвязных грунтах / В. С. Алтунин, Л. В. Ларионова // Гидротехническое строительство, – 1987. – № 8. – С. 18-21.