

УДК 626.823.004:532.5

**Ю. М. Косиченко** (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

**Е. Г. Угроватова** (ФГБОУ ВПО «ЮРГТУ» (НПИ))

## **ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ КРУПНЫХ КАНАЛОВ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТОКА**

В статье излагается гидравлическое обоснование параметров крупных каналов переброски стока. Целью работы является разработка критериев и методов оценки гидравлической эффективности и надежности крупных каналов. На основе анализа опыта эксплуатации сформулированы критерии пропускной способности русел, допускаемых скоростей, относительной ширины, коэффициента полезного действия, показателей технического состояния и безопасности работы. На базе известной формулы А. Д. Альтшуля для определения коэффициента Шези с использованием натуральных данных для одного из крупных каналов юга России рассматривается определение постоянных коэффициентов, входящих в формулу, в результате чего впервые получена усовершенствованная расчетная зависимость всех параметров в метровой размерности. Для количественной оценки надежности функционирования крупных каналов обосновывается методика на основе применения метода Байеса с использованием четырех диагностических признаков, которая иллюстрируется примером расчета.

Ключевые слова: крупные каналы, гидравлическая эффективность, эксплуатационная надежность, коэффициент Шези, метод Байеса.

**Yu. M. Kosichenko** (FSBSRE “RSRILIP”)

**Ye. G. Ugrovatova** (FSBEE HPE “SRSTU” (NPI))

## **HYDRAULIC EFFICIENCY AND OPERATIONAL RELIABILITY OF LARGE-SCALE CANALS FOR TERRITORIAL REDISTRIBUTION OF RUNOFF**

The paper considers hydraulic justification of parameters for large-scale canals for runoff transfer. The objective of the work is to develop criteria and estimation methods of hydraulic efficiency and reliability of large-scale canals. Analyzing operating experience, the criteria for conveyance, permissible velocities, relative width, efficiency, indicators of technical state and operating safety were formulated. On the basis of the known equation of A. D. Altschul for the Chezy coefficient, using natural data for one of the large-scale canals in the south Russia, the determination of constant coefficients involving in the equation is considered. As a result, for the first time the improved calculating relationship for all parameters in metric dimension was obtained. To estimate quantitatively the operational reliability of large-scale canals, the methodology on the base of Bayes method using four diagnostic features was substantiated and illustrated by calculation sample.

Key words: large-scale canals, hydraulic efficiency, operational reliability, Chezy coefficient, Bayes method.

К крупным каналам территориального перераспределения стока (ТПС) относятся открытые водоводы межбассейновой, внутрибассейновой

и локальной переброски стока с расходами от 10 до 500 м<sup>3</sup>/с и более.

Только в России действует 34 крупных системы межбассейнового перераспределения стока, которые перебрасывают 15 км<sup>3</sup>/год и имеют протяженность около 3 тыс. км, а также имеется 11 систем внутрибассейнового перераспределения стока [1]. Они включают такие крупные каналы ТПС как Большой Ставропольский (БСК), Донской магистральный (ДМК), Невинномысский (НК), Терско-Кумский (ТКК) и другие. Многие из них используются комплексно для целей водоснабжения, орошения, обводнения, энергетики, судоходства, рекреации.

Не смотря на то, что в настоящее время большое количество работ посвящено гидравлическим расчетам каналов, тем не менее, остаются еще не решенными многие вопросы. К ним можно отнести методы оценки гидравлической эффективности и надежности при длительной эксплуатации крупных каналов ТПС, срок службы которых должен составлять не менее 100 лет. Другими особенностями крупных каналов являются круглогодичная их эксплуатация, в том числе в зимний период, 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.

Под гидравлической эффективностью каналов будем понимать обеспечение высокой пропускной способности их русел в процессе эксплуатации, близкой к проектной, при минимальных потерях воды, не превышающих допустимые значения.

Под эксплуатационной надежностью каналов понимается способность обеспечивать надежное их функционирование без отказов в течение срока службы.

Целью настоящей работы является разработка критериев и методов

оценки гидравлической эффективности и эксплуатационной надежности крупных каналов ТПС.

Обобщающие исследования в этой области представлены в работах В. С. Алтунина [2], И. Ф. Карасева [3], Г. В. Железнякова [4], Ц. Е. Мирцхулавы [5], Ю. М. Косиченко [1] и других.

На основании анализа указанных работ, а также накопленного опыта эксплуатации ряда крупных каналов [1] могут быть сформулированы следующие критерии их гидравлической эффективности и эксплуатационной надежности:

а) по пропускной способности:

$$\alpha' \cdot Q_{\text{пр}} \leq Q \leq Q_{\text{пр}} ; \quad (1)$$

б) по допустимым скоростям:

$$U_{\text{нез}} < U \leq U_{\text{нер}} ; \quad (2)$$

в) по относительной ширине русла:

$$\beta_{\text{г.н}} < \beta \leq \beta_{\text{max}} ; \quad (3)$$

г) по коэффициенту полезного действия:

$$\beta' \cdot \eta_{\text{нор}} \leq \eta \leq \eta_{\text{нор}} ; \quad (4)$$

д) по показателю технического состояния:

$$\sigma' \cdot P_{\text{т.с.тр}} \leq P_{\text{т.с}} \leq P_{\text{т.с.тр}} ; \quad (5)$$

е) по показателю безопасности работы:

$$P_{\text{бнор}} \leq P_{\text{б}} \leq P_{\text{бmax}} , \quad (6)$$

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

$\alpha'$  – показатель снижения пропускной способности вследствие влияния неучтенных факторов при эксплуатации при нормальном состоянии русла, вычисляемый приближенно из соотношения  $\alpha' = \frac{n_{\text{пр}}}{n}$  ( $n_{\text{пр}}$  – проектный коэффициент шероховатости,  $n$  – коэффициент шероховатости, найденный по натурным данным), который на основании проведенной нами статисти-

ческой обработки натуральных данных по 10 каналам ТПС Юга России (ДМК, ТКК, БСК-1 (первая очередь), НК и др.) составил  $\alpha' = 0,958$  при средне-квадратичной ошибке  $\sigma = 0,0045$  [6];

$U, U_{\text{нез}}, U_{\text{нер}}$  – средняя, допускаемая незаиляющая и неразмывающая скорости движения воды в каналах;

$\beta, \beta_{\text{г.н}}, \beta_{\text{max}}$  – фактическая, гидравлически наивыгоднейшая и максимальная относительная ширина канала по дну ( $\beta = b/h$ , где  $b$  – ширина по дну;  $h$  – глубина);

$\eta, \eta_{\text{нор}}$  – фактический и нормативный (по СНиП 2.06.85-03) коэффициенты полезного действия (КПД) каналов;

$\beta'$  – показатель снижения КПД вследствие влияния неучтенных факторов при эксплуатации при нормальном состоянии русла, вычисляемый из

соотношения  $\beta' = \frac{\eta}{\eta_{\text{нр}}}$  ( $\eta$  и  $\eta_{\text{нр}}$  – КПД каналов соответственно по натурным данным и проекту), который по данным для 25 каналов Юга России составил  $\beta' = 0,935$  при  $\sigma = 0,0121$ ;

$P_{\sigma}, P_{\sigma_{\text{нор}}}$  – фактический и нормативный (по СНиП 33.01-2003) показатели безопасной работы каналов (вероятности безотказной работы);

$P_{\sigma_{\text{max}}}$  – максимальное значение показателя безопасной работы, соответствующее для гидротехнических сооружений 1 класса;

$P_{\text{т.с}}, P_{\text{т.с.тр}}$  – показатели технического состояния канала фактический и требуемый;

$\sigma'$  – коэффициент снижения показателя технического состояния, который по данным для 16 каналов Юга России составил  $\sigma' = 0,943$  при  $\sigma = 0,0166$ .

Следует отметить, что для показателей снижения гидравлических и технических показателей работы каналов  $\alpha', \beta', \sigma'$  могут учитываться та-

кие неопределенные факторы, как возможное зарастание, размывы, заиление, локальные разрушения откосов, сбросы и утечки воды через уплотнения затворов.

К основной характеристике гидравлической эффективности каналов можно отнести пропускную способность или расход  $Q$ . Обычно расход для установившегося равномерного движения потока в канале определяется по формуле Шези:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (7)$$

где  $\omega$  – площадь живого сечения;

$C$  – коэффициент Шези;

$R$  – гидравлический радиус;

$i$  – уклон дна, равный уклону свободной поверхности  $i = J$ .

Если определение параметров  $\omega$  и  $R$  на эксплуатирующихся каналах не вызывает вопросов, то при нахождении  $J$  и  $C$  часто возникают затруднения. Так, при определении уклона  $J$  ввиду малых их значений появляются значительные погрешности. Для их устранения требуется применение высокоточных геодезических приборов при увеличении расстояния между створами до 10 км, что сопряжено с увеличением времени для наблюдения.

Другой параметр  $C$ , входящий в формулу (6), играет определяющую роль, 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 Ю. М. Косиченко [7, 8], для подавляющего количества земляных русел каналов юга России наблюдается переходная (доквадратичная) область сопротивлений. Поэтому для таких русел могут применяться

обобщенные формулы, например, степенная формула А. Д. Альтшуля [9], которая справедлива во всех областях сопротивлений. Вместе с тем, следует отметить, что А. Д. Альтшулем была также получена более сложная логарифмическая формула по данным лабораторных и натурных исследований только для облицованных бетонных поверхностей каналов. В дальнейшем для выводов будем использовать степенную формулу, которая нуждается в уточнении применительно к земляным руслам крупных каналов ТПС юга России.

Обобщающая формула А. Д. Альтшуля для безнапорных потоков открытых русел имеет следующий вид [9]:

$$C = 25 \left( \frac{R}{k_s + \frac{0,025}{\sqrt{Ri}}} \right)^{1/6}, \quad (8)$$

где  $C$  – коэффициент Шези,  $m^{0,5}/c$ ;

$R$  – гидравлический радиус, мм;

$k_s$  – эквивалентная равномерно зернистая шероховатость, мм;

$i$  – уклон дна канала.

Для расчета величины эквивалентной шероховатости могут быть использованы зависимости, устанавливающие взаимосвязь между  $k_s$  и коэффициентом шероховатости  $n$ :

$$k_s = (80)^6, \text{ мм}; \quad k_s = (25n)^6, \text{ м}. \quad (9)$$

Принимая за основу обобщающую формулу (8), запишем ее в общем виде:

$$C = A \left( \frac{R}{k_s + \frac{B}{\sqrt{Ri}}} \right)^m, \quad (10)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $m$  – постоянные, определяемые по опытным данным.

Используя зависимость (10) и определяя в ней постоянные  $A$ ,  $B$  и  $m$ , найдем эмпирическую формулу применительно к крупным каналам ТПС в земляном русле с расходами более  $50 \text{ м}^3/\text{с}$ . Эта формула будет уже отличаться от известной зависимости А. Д. Альтшуля (8), во-первых, другими значениями постоянных  $A$ ,  $B$  и  $m$ , которые характерны только для крупных каналов ТПС, а, во-вторых, тем, что она применима для каналов ограниченной ширины с  $\beta \leq 7,30$ .

Для определения постоянных  $A$  и  $B$  используем данные натуральных гидравлических исследований канала ТПС БСК-1 на головном участке протяженностью 27 км [1], которые приведены в таблице 1 во всем диапазоне изменения от максимального до минимального расхода на данном участке.

**Таблица 1 – Данные натуральных исследований на головном участке БСК-1 (1-27 км) при уклоне  $i = 0,00015$**

$Q$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$h$ , м	$V$ , м/с	$R$ , м	$n$	$k_s$ , м	$C_{\text{нат}}$ , $\text{м}^{0,5}/\text{с}$	$C_{\text{расч}}$ , $\text{м}^{0,5}/\text{с}$	$\delta$ , %
182,60	5,03	1,17	3,24	0,0226	0,0325	55,66	52,70	- 5,3
110,68	4,02	1,00	2,54	0,0227	0,0334	52,87	51,45	- 2,7
78,56	3,49	0,89	2,16	0,0231	0,0371	50,39	49,76	- 1,3
55,68	3,03	0,79	1,83	0,0233	0,0391	48,36	48,64	+ 0,6
25,23	2,16	0,62	1,29	0,0234	0,0401	44,95	47,29	+ 5,2

При вычислении натурального значения коэффициента Шези использовалась формула:

$$C_{\text{нат}} = \frac{Q}{\omega \sqrt{Ri}},$$

где  $C_{\text{нат}}$  – натуральный коэффициент Шези,  $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ;

$\omega$  – площадь живого сечения,  $\text{м}^2$ ;

$R$  – гидравлический радиус, м.

Принимая в первом приближении в общей зависимости (10) показатель степени  $m = 1/6$  и подставляя найденные натурные значения гидравлических параметров  $R$  (м),  $k_s$  (м),  $C$  ( $\text{м}^{0,5}/\text{с}$ ) и  $i$  для максимального и минимального расхода, получим два уравнения:

$$55,66 = A \left( \frac{3,24}{0,0325 + \frac{B}{\sqrt{3,24 \cdot 0,00015}}} \right)^{\frac{1}{6}} ; \quad (11)$$

$$44,95 = A \left( \frac{1,29}{0,0401 + \frac{B}{\sqrt{1,29 \cdot 0,00015}}} \right)^{\frac{1}{6}} . \quad (12)$$

После некоторых преобразований из уравнений (11) и (12) выразим неизвестные постоянные  $A$  и  $B$ :

$$A = 45,62(0,0325 + 45,45B)^{\frac{1}{6}} ; \quad (13)$$

$$B = 2,17 \cdot 10^{-12} A^6 - 0,000557 . \quad (14)$$

Решая совместно последние уравнения (13) и (14), найдем:

$$A = 29,0; B = -0,000283.$$

Во втором приближении уточняем степень  $m$ , исходя из уравнений (13) и (14):

$$55,66 = A(F_1)^{m_1} ; \quad (15)$$

$$44,95 = A(F_2)^{m_2} ; \quad (16)$$

где  $F_1 = \frac{3,24}{0,0325 + \frac{B}{\sqrt{3,24 \cdot 0,00015}}}$  ;

$$F_2 = \frac{1,29}{0,0401 + \frac{B}{\sqrt{1,29 \cdot 0,00015}}} .$$

Далее прологарифмируем (15) и (16):

$$m_1 \lg F_1 = \lg 55,66 - \lg A ,$$

$$m_2 \lg F_2 = \lg 44,95 - \lg A$$

и выразим отсюда неизвестные показатели  $m_1$  и  $m_2$ , подставляя найденные значения постоянных  $A$  и  $B$ :

$$m_1 = \frac{\lg 55,66 - \lg 29}{\lg 164,8} = 0,128; \quad m_2 = \frac{\lg 44,95 - \lg 29}{\lg 65,35} = 0,105.$$

Рекомендуемое значение показателя степени  $m$  принимаем как среднеарифметическое из  $m_1$  и  $m_2$ , соответствующих максимальному и минимальному расходу на участке БСК-1:

$$m = 0,117.$$

Тогда окончательная формула для расчета коэффициента Шези крупных каналов систем ТПС получит вид:

$$C = 29 \left( \frac{R}{k_s - \frac{0,000283}{\sqrt{Ri}}} \right)^{0,117}, \quad (17)$$

где параметры  $R$ ,  $k_s$  приводятся в метрах.

Преимуществом данной зависимости перед формулой А. Д. Альтшуля (8) является то, что она впервые получена для метровой размерности основных параметров  $R$  и  $k_s$ , что более удобно в расчетах.

Хотя по структуре новая формула (18) аналогична формуле А. Д. Альтшуля (8), тем не менее, все постоянные  $A$ ,  $B$  и  $m$ , входящие в нее, существенно отличаются численными значениями.

Проведем теперь проверку полученной формулы с натурными данными, представленными в таблице 1.

Подставляя в формулу (17) значения параметров  $R$  и  $k_s$  при расходах  $Q_{\max} = 182,60 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $Q_{\min} = 25,23 \text{ м}^3/\text{с}$ , найдем значения расчетных коэффициентов Шези  $C_{\text{расч}}$ , которые приведены в таблице 1.

Отклонение результатов расчета  $C_{\text{расч}}$  с натурными значениями  $C_{\text{нат}}$  составляют около от 0,6 до  $\pm 5,3 \%$ , что можно считать вполне приемлемой точностью, поскольку точность натуральных данных с использованием гидрометрических вертушек составляет 10-15 %. Полученная формула (17)

рекомендуется к применению для каналов с расходами от 25,0 до 180,0 м<sup>3</sup>/с.

Аналогичным образом нами также была получена зависимость для коэффициента Шези каналов систем ТПС, где подобно формуле А. Д. Альтшуля (8) учитывается миллиметровая размерность основных параметров  $R$  и  $k_3$ :

$$C = 23,6 \left( \frac{R}{k_3 + \frac{4,82}{\sqrt{Ri}}} \right)^{0,190}, \quad (18)$$

где параметры  $R$  и  $k_3$  приводятся в миллиметрах.

Данная формула рекомендуется к применению для каналов с расходами более 10 м<sup>3</sup>/с.

При сопоставлении расчетных данных по формуле (18) с натурными для БСК-1 получены достаточно близкие результаты: при  $Q_{\max} = 183,60$  м<sup>3</sup>/с –  $C_{\text{расч}} = 54,54$  м<sup>0,5</sup>/с;  $C_{\text{нат}} = 55,66$  м<sup>0,5</sup>/с,  $\delta = -2,01$  %; при  $Q_{\min} = 25,23$  м<sup>3</sup>/с –  $C_{\text{расч}} = 43,59$  м<sup>0,5</sup>/с,  $C_{\text{нат}} = 44,95$  м<sup>0,5</sup>/с,  $\delta = -2,22$  %.

Из полученных обобщенных формул (17) и (18), справедливых для любых областей сопротивлений, могут быть получены частные формулы для квадратичной области сопротивлений и области гидравлических гладких поверхностей.

Так, при условии  $k_3 \sqrt{Ri} \gg 0,000283$  из формулы (17) вытекает частная формула для шероховатых каналов (в квадратичной области сопротивлений):

$$C = 29 \left( \frac{R}{k_3} \right)^{0,117}, \quad (19)$$

где параметры  $R$  и  $k_3$  приводятся в метрах, а при  $k_3 \sqrt{Ri} \gg 4,82$  из формулы (18) получается частная формула для шероховатых русел:

$$C = 23,6 \left( \frac{R}{k_3} \right)^{0,190}, \quad (20)$$

где  $R$  и  $k_3$  приводятся в миллиметрах.

При условиях  $k_3 \sqrt{Ri} \gg 0,000283$  и  $k_3 \sqrt{Ri} \gg 4,82$  соответственно для зависимостей (17) и (18) получим следующие частные формулы для гладких русел каналов:

$$C = 29 \left( \frac{R}{\frac{0,000283}{\sqrt{Ri}}} \right)^{0,117}; \quad (21)$$

$$C = 23,6 \left( \frac{R}{\frac{4,82}{\sqrt{Ri}}} \right)^{0,190}. \quad (22)$$

Другими характеристиками гидравлической эффективности и эксплуатационной надежности каналов является средняя скорость течения  $U$  и относительная ширина русла  $\beta$ , определяемая отношением  $b/h$  (где  $b$  – ширина канала по дну,  $h$  – его глубина).

Согласно условию (2) средняя скорость не должна быть меньше допускаемой незаиляющей и больше допускаемой неразмывающей, что обеспечит надежное функционирование каналов ТПС и его эксплуатационную надежность.

При выполнении условия (3), с одной стороны, параметр формы русла  $\beta$  не должен быть меньше для гидравлически наивыгоднейшего сечения  $\beta_{г.н}$  и, с другой стороны, больше некоторого максимального значения  $\beta_{max}$ , что обеспечит наибольшую пропускную способность русла при удобном с практической точки зрения сечении.

При этом максимальное значение относительной ширины канала по дну рекомендуется определять по формуле А. М. Латышенкова [10]:

$$\beta_{\max} = \frac{\beta_{г.н} + m}{A_U \cdot A_h^2} - m, \quad (23)$$

где  $\beta_{г.н} = 2(\sqrt{1+m^2} - m)$  – для абсолютного гидравлически наивыгоднейшего сечения;

$A_U = U/U_{г.н}$ ;  $A_h = h/h_{г.н}$  – коэффициенты скорости и глубины;

$U$ ,  $h$  – скорость и глубина канала близкого к гидравлически наивыгоднейшему сечению;

$U_{г.н}$ ,  $h_{г.н}$  – скорость и глубина гидравлически наивыгоднейшего сечения;

$b_{\max} = b/h$ ;  $\beta_{г.н} = b/h_{г.н}$ ;

$m$  – коэффициент заложения откосов.

Проведем анализ гидравлической эффективности ряда действующих каналов ТПС в земляном русле по показателю  $\beta$  (таблица 2).

**Таблица 2 – Сравнение по показателю  $\beta$  ряда действующих крупных каналов ТПС в земляном русле**

Канал	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$\beta$ , м	$h$ , м	$U$ , м/с	$m$	$\beta = \frac{e}{h}$	$\beta_{\max}$ при $A_U = 0,97$
Донской магистральный (ДМК)	201,0	<u>38,4</u> 35,0*	<u>5,6</u> 6,2*	0,56	4,0	<u>6,86</u> 4,03*	4,42
Большой Ставропольский (БСК-1)	186,0	22,6	5,1	1,18	3,5	4,43	4,00
Терско-Кумский (ТКК)	80,0	25,0	3,6	0,76	3,5	6,94	4,00
Невинномысский (НК)	75,0	18,0	3,0	1,04	5,0	6,00	5,33
Большой Ставропольский (БСК-2)	54,0	15,0	2,80	0,90	4,5	5,36	4,92
Северо-Крымский (СКК)	192,0	44,0	6,0	0,516	3,0	7,33	3,59
* Проектные данные.							

Сравнение фактических значений параметра  $\beta$  с  $\beta_{\max}$  показывает, что для всех русел каналов ТПС фактические значения превышают максимальные. Это свидетельствует о том, что действующие каналы не являются гидравлически эффективными по параметру  $\beta$ . При этом некоторые каналы, например ДМК, по проекту имели  $\beta < \beta_{\max}$ , однако в процессе его эксплуатации произошло его расширение за счет размывов части откосов и,

соответственно, увеличение параметра  $\beta_{\text{ТПС}}$  от 4,03 (по проекту) до 6,86 (по данным наблюдений при эксплуатации).

Практически для всех крупных каналах ТПС в земляном русле (ДМК, ТКК, НК, СКК) в среднем относительная ширина по дну  $\beta$  изменяется от 6 до 7,3 и по отношению к  $\beta_{\text{max}}$  в среднем составляет в 1,5-1,8 раза больше. Отсюда можно сделать вывод, что при эксплуатации некоторые каналы потеряли свою эффективность по параметру  $\beta$ , а некоторые и были, очевидно, запроектированы гидравлически неэффективными.

Следует отметить, что для крупных каналов систем ТПС наиболее целесообразной формой сечения является полигональная, которая ближе всего соответствует параболической или естественной форме земляного русла в процессе его эксплуатации, что обеспечивает большую устойчивость их откосов по сравнению с другими сечениями [10].

В формулах (5) и (7) используются показатели технического состояния и безопасной работы каналов систем ТПС, которые определяются следующим образом [11]:

- показатель технического состояния:

$$P_{\text{ТСТПС}} = \eta / \eta_{\text{нор}};$$

- показатель безопасной работы канала ТПС:

$$P_{\text{бТПС}} = 1 - \lambda,$$

где  $\eta, \eta_{\text{нор}}$  – коэффициенты полезного действия ТПС фактический и нормативный (по СНиП 2.06.03-85);

$\lambda$  – риск аварии канала ТПС (по СНиП 33-01-2003).

В качестве показателя нормативной безопасности работы канала ТПС могут применяться нормативные значения риска аварии гидротехнических сооружений в соответствии с их классом (по СНиП 33-01-2003) в пределах  $\lambda_{\text{нор}} = 5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-5}$  [11].

Для количественной оценки надежности различных гидротехниче-

ских сооружений находит все большее применение метод Байеса благодаря своей простоте и эффективности [5, 12, 13]. В этом методе широко могут использоваться диагностические показатели по данным наблюдений или имеющимся статистическим данным, которые позволяют дать прогнозную оценку надежности системы и выбрать одну или несколько наиболее вероятных диагностических гипотез.

Полная формула Байеса имеет вид [5, 12]:

$$P(D_i/K_j) = \frac{P(D_i)P(K_j/D_i)}{\sum_{s=1}^n P(D_s)P(K_j/D_s)}, \quad (24)$$

где  $P(D_i)$  – предварительная вероятность диагноза  $D_i$ ;

$P(K_j/D_i)$  – вероятность появления признаков  $K_j$  у объектов с состоянием  $D_i$ .

Применительно к каналам в насыпи будем учитывать четыре диагностических признака, непосредственно влияющих на состояние и безопасность канала:  $K_1$  – превышение гребня дамбы над уровнем воды на участке канала в насыпи;  $K_2$  – превышение уровня воды в канале над поверхностью прилегающей территории;  $K_3$  – средний градиент при фильтрации через тело и основание дамбы;  $K_4$  – просадку гребня дамбы. Каждый признак состояния дамбы канала в насыпи имеет  $m_j$  разрядов ( $K_{js}$ ), соответствующих нормальному, пониженному и опасному (критическому) состоянию. Методика решения подобных задач технической диагностики для двухразрядных признаков впервые описана И. А. Биргером [14].

В рассматриваемой задаче учитывается четыре диагностических двухразрядных признака  $K_{js}$ . Тогда формула Байеса приобретает следующий вид:

$$P(D_i/K_{js}) = \frac{P(D_i)P(K_{1n}/D_i)P(K_{2m}/D_i)P(K_{3z}/D_i)P(K_{4f}/D_i)}{\sum_{s=1}^4 P(D_s)P(K_{1n}/D_s)P(K_{2m}/D_s)P(K_{3z}/D_s)P(K_{4f}/D_s)}, \quad (25)$$

где  $P(D_i)$  – априорная вероятность (диагноза)  $D_i$ ;

$P(K_{is}/D_i)$  – вероятность появления признаков  $K_j$  у объектов с состоянием  $D_{is}$ ;

$P(D_s)$  – вероятность состояния  $D_s$ ;

$K_{1n}, K_{2m}, K_{3z}, K_{4f}$  – двухразрядные признаки  $K_1 - K_4$ .

Рассмотрим решение данной задачи по исходным данным, представленным в диагностической матрице (таблица 3). Здесь каждый диагностический признак  $K_j$  представлен тремя состояниями, соответствующими нормальному, пониженному и опасному уровням. Примем, что диагноз  $D_1$  соответствует безопасному состоянию гидротехнического сооружения, а диагноз  $D_2$  – отказу. Значениями вероятности диапазонов задаемся априорно:  $P(D_1) = 0,83, P(D_2) = 0,17$ .

**Таблица 3 – Диагностическая матрица для расчета вероятности диагнозов состояний крупного канала ТПС**

Диагноз $D_i$	Признак $K_j$					
	Превышение гребня дамбы над уровнем воды в канале $K_1, м$			Превышение уровня воды в канале над прилегающей территорией $K_2, м$		
	$K_{11}$	$K_{12}$	$K_{13}$	$K_{21}$	$K_{22}$	$K_{23}$
	< 0,3	0,3-0,5	> 0,5	< 1,0	1,0-10,0	> 10,0
	$P(K_{11}/D_i)$	$P(K_{12}/D_i)$	$P(K_{13}/D_i)$	$P(K_{21}/D_i)$	$P(K_{22}/D_i)$	$P(K_{23}/D_i)$
$D_1$	0,15	0,25	0,60	0,50	0,35	0,15
$D_2$	0,55	0,25	0,20	0	0,40	0,60
Диагноз $D_i$	Признак $K_j$					
	Средний градиент напора при фильтрации через дамбы $K_3, м$			Просадка гребня дамбы $K_4, м$		
	$K_{31}$	$K_{32}$	$K_{33}$	$K_{41}$	$K_{42}$	$K_{43}$
	< 0,5	0,5-1,0	> 1,0	< 0,1	0,1-0,5	> 0,5
	$P(K_{31}/D_i)$	$P(K_{32}/D_i)$	$P(K_{33}/D_i)$	$P(K_{41}/D_i)$	$P(K_{42}/D_i)$	$P(K_{43}/D_i)$
$D_1$	0,55	0,35	0,10	0,70	0,25	0,05
$D_2$	0	0,20	0,75	0,10	0,25	0,65

При составлении матрицы должно соблюдаться условие, чтобы сумма вероятности всех возможных реализаций признака была равна единице, т. е.:

$$\sum_{s=1}^{m_j} P(K_{js} / D_i) = 1,$$

где  $m_j$  – число разрядов признаков  $K_j$ .

Считая признаки независимыми, установим вероятность наступления событий  $D_i$  (отказа или безотказного состояния) с учетом четырех диагностических признаков  $K_1 - K_4$ . Расчет выполним по формуле Байеса (25) сначала для вероятности диагноза  $D_2$  (отказ) по максимальному значению вероятности каждого признака, а затем для вероятности диагноза  $D_1$  (безотказное состояние) – по минимальным значениям вероятности каждого признака:

$$P(D_2 / K_{js}) = \frac{0,17 \cdot 0,55 \cdot 0,60 \cdot 0,75 \cdot 0,65}{0,83 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \cdot 0,10 \cdot 0,05 + 0,17 \cdot 0,55 \cdot 0,60 \cdot 0,75 \cdot 0,65} = 0,9967;$$

$$P(D_1 / K_{js}) = \frac{0,83 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \cdot 0,10 \cdot 0,05}{0,83 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \cdot 0,10 \cdot 0,05 + 0,17 \cdot 0,55 \cdot 0,60 \cdot 0,75 \cdot 0,65} = 0,0033.$$

Полученные значения вероятностей отказа и безопасного состояния в сумме составляют единицу, что соответствует условию.

Проведенные расчеты показали, что при неблагоприятных характеристиках дамбы канала, соответствующих описанному (критическому) состоянию, в процессе эксплуатации будет наблюдаться высокая вероятность отказа или аварии сооружения. При этом риск аварии составит  $3,3 \cdot 10^{-3}$ , что превышает допускаемое значение для ГТС III класса (по СНиП 33-01-2003).

На основании выполненного анализа разработаны общие критерии гидравлической эффективности и эксплуатационной надежности крупных каналов систем ТПС, которые позволяют обеспечить их эффективное функционирование.

Для оценки гидравлической эффективности русел каналов получены усовершенствованные обобщенные формулы коэффициента Шези, по структуре аналогичные формуле А. Д. Альтшуля.

На примере применения метода Байеса, учитывающего различные

диагностические признаки и техническое состояние объекта, произведена количественная оценка надежности работы каналов в насыпи.

### **Список использованных источников**

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

2 Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляном русле / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1979. – 255 с.

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

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

5 Мирцхулава, Ц. Е. О надежности крупных каналов / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1981. – 318 с.

6 Иовчу, Ю. И. Методы и вероятностные модели оценки гидравлической эффективности и эксплуатационной надежности оросительных каналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07; 05.23.16 / Иовчу Юлия Ивановна. – М., 2010. – 24 с.

7 Косиченко, Ю. М. Закономерности изменения гидравлических сопротивлений земляных русел при эксплуатации / Ю. М. Косиченко // Известия ВУЗов. СКР. Технич. науки. – № 4. – 2011. – С. 107-111.

8 Косиченко, Ю. М. Влияние эксплуатационных факторов на пропускную способность земляных русел каналов [Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. периодич. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск РосНИИПМ, 2011. – № 3(03). – Режим доступа: [http://www.rosniipm-sm.ru/dl\\_files/udb\\_files/udb13-rec43-field6.pdf](http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec43-field6.pdf).

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

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

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

12 Финагенов, В. М. Оценка эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений / В. М. Финагенов, С. Н. Белякова // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 9. – С. 24-27.

13 Косиченко, Ю. М. Гибкие конструкции противofiltrационных и берегоукрепительных покрытий с применением геосинтетических материалов / Ю. М. Косиченко, А. В. Ломакин // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Технич. науки. – 2012. – № 5. – С. 73-79.

14 Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 241 с.

---

**Косиченко Юрий Михайлович** – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», заместитель директора по науке. Контактный телефон: (8635) 26-51-11.  
E-mail: rosniipm@yandex.ru

**Kosichenko Yuriy Mikhaylovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems” (FSBSRE “RSRILIP”), Deputy Director for Science. Contact telephone number: (8635) 26-51-11.  
E-mail: rosniipm@yandex.ru

**Угроватова Евгения Геннадиевна** – ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный технический университет» (Новочеркасский политехнический институт) (ФГБОУ ВПО «ЮРГТУ» (НПИ), ассистент. Контактный телефон: 8-908-517-99-88.  
E-mail: jenyaugrovatova@rambler.ru

**Ugrovatova Yevgeniya Genadiyevna** – Federal State Budget Educational Establishment of Higher Professional Education “South Russian State Technical University” (Novocherkassk Polytechnic Institute) (FSBEE HPE “SRSTU” (NPI), Assistant. Contact telephone number: 8-908-517-99-88.  
E-mail: jenyaugrovatova@rambler.ru