

ДЕФОРМАЦИИ РЕГУЛИРОВАННЫХ РУСЛ РЕК-ВОДОПРИЕМНИКОВ, ИХ ПРОГНОЗ И СПОСОБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Основной причиной деформации регулированных русел рек-водоприемников является воздействие на них природных факторов, в первую очередь русловых, фильтрационных, склоновых и дождевых вод. Наиболее распространены такие виды деформаций, как размывы русла, оползни и оплывание откосов, заиление и зарастание русла.

Дно русла, и особенно подводная часть откосов, в неустойчивых грунтах подвержены размыву русловым потоком на тех участках, где уклоны и, соответственно, скорости превышают значения, допустимые на размыв. Процесс размыва идет обычно в направлении увеличения ширины русла и уменьшения его глубины (рис. 1) до тех пор, пока не наступит равновесие между касательным напряжением потока и сопротивлением поверхностного слоя грунта размыву. Особенно неустойчивы к размыву мелкозернистые и пылеватые песчаные и супесчаные грунты; более устойчивы грунты, обладающие сцеплением: глины, суглинки, торфы. Откосы в надводной части могут размываться склоновым потоком, возникающим в период снеготаяния и дождевых ливней. Достаточной защитой откосов от дождевой эрозии (при упорядоченном отводе притекающих со стороны поверхностных вод) является создание на их поверхности устойчивого травяного покрова. Предупреждение размывов, вызываемых русловым потоком, достигается созданием в русле допустимых на размыв уклонов и скоростей (обеспечение статистической устойчивости русла); приданием ему оптимальных морфометрических параметров (средней глубины H_c и ширины B по верху), при которых русло находится в динамически устойчивом состоянии; применением соответствующих конструкций креплений.

В связи с созданием осушительно-увлажнительных систем, а также для целей рекреации многие реки оборудованы водорегулирующими сооружениями (шлюзами), насосными станциями и водоаккумулирующими емкостями. Это позволяет поддерживать необходимые и достаточно высокие уровни воды в реках в вегетационный период с использованием их не только как водоприемников, но и как водоисточников. Однако такие реки работают в условиях переменного уровня воды в русле во время сброса и через водовыпуски подпорных сооружений, откачки насосными станциями или при пропусках из водохранилищ. Для предупреждения местных размывов в нижнем бьефе, а также оплывания откосов под воздействием гидродинамического давления неустановившегося фильтрационного потока необходимо поддерживать соответствующий режим работы станций и эксплуатации сооружений, обеспечивающий допустимую скорость снижения уровня воды в русле.

Заиление русел происходит в определенных условиях при: размывах откосов и берегов (смытый с откосов грунт откладывается на дне русла); скоростях течения воды в русле менее допустимых на заиление; значительном

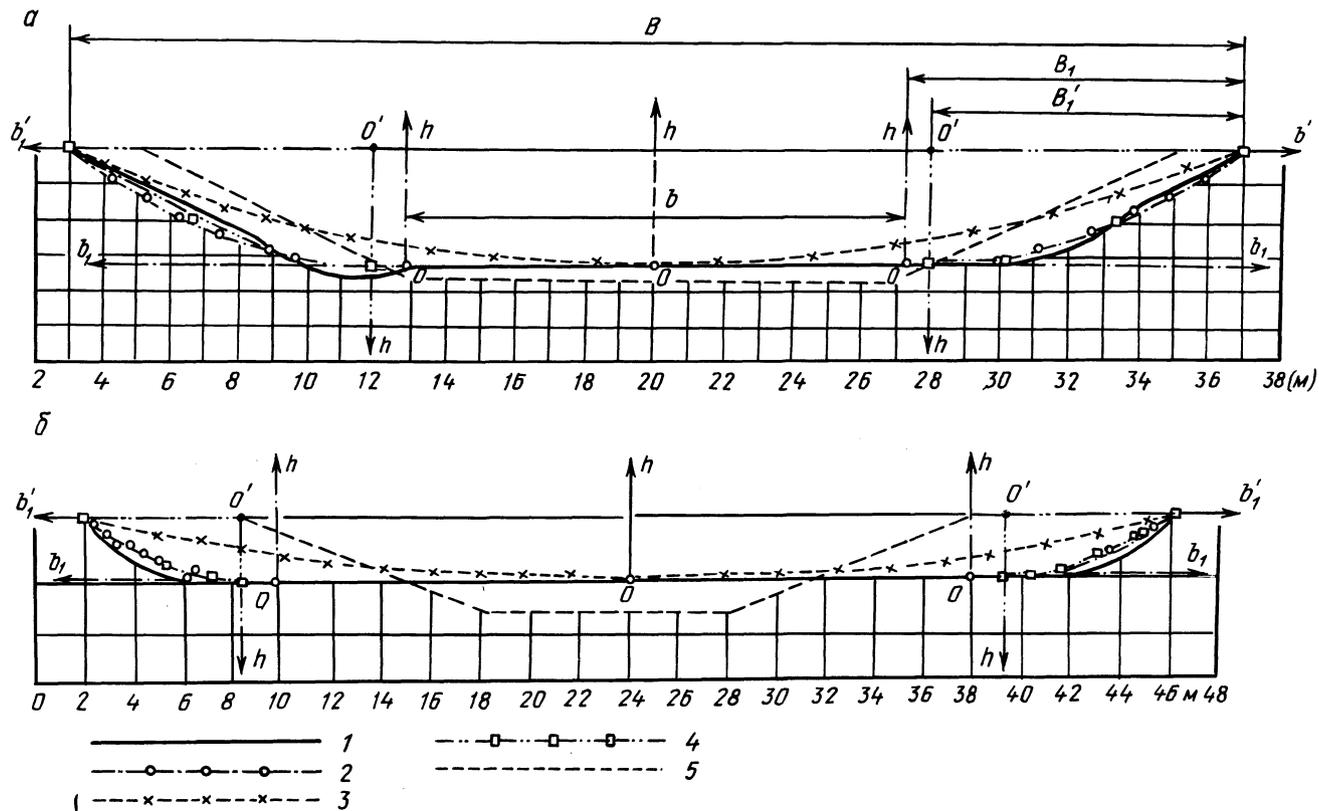


Рис. 1. Поперечные сечения регулированных русел рек-водоприемников:

а — р. Оресса, ПК 76; б — р. Лань, ПК 151: 1 — измеренный профиль после стабилизации русла; 2 — параболическая кривая по расчетному уравнению (7); 3 — то же по каноническому уравнению при $r = v^2/8H$; 4 — косинусоида по уравнению (11); 5 — проектный профиль русла.

уменьшении уклона дна; внезапном увеличении живого сечения и т.д.

Для предупреждения заиления русл необходимо:

обеспечивать надлежащую устойчивость откосов и берегов;

создавать в руслах скорости, соответствующие "незаиляющим";

обеспечивать одинаковую по всей длине (или несколько возрастающую вниз по течению) транспортирующую способность потока;

намечать преимущественно луговое использование прилегающей в водотоку территории, а вдоль рек-водоприемников и крупных каналов сохранять существующие или создавать новые лесо-кустарниковые полосы, защищающие их от склоновой, водной и ветровой эрозий;

осуществлять надлежащий технический уход за водотоками в процессе их эксплуатации с периодической очисткой русл от наносов;

сооружать (при необходимости) устройства наносоловителей в зонах подпора, местах резких уширений русл, переломов уклонов с большего на меньший;

в местах слияния потоков впадающий канал сопрягать с принимающим каналом под углом $\alpha = 20-60^\circ$ (так как при $\alpha > 60^\circ$ имеют место большие подпоры, а при $\alpha = 90^\circ$ они достигают максимального значения, в результате чего наблюдается наибольшее отложение наносов).

Зарастание русла, вызывающее резкое снижение его пропускной способности, происходит, как правило, в местах заиления, где ил содержит питательные вещества для растений, так как русла проложены в низинных торфяных грунтах, пойменных аллювиальных отложениях, супесях и суглинках. Предупредить зарастание русла можно путем создания в нем средних скоростей течения воды, при которых наблюдается движение донных наносов.

Оценка устойчивости к размыву незакрепленного русла может производиться исходя из двух условий: 1) сохранения придонного проектного профиля практически без всяких его деформаций (создания русла статического или близкого к нему равновесия); 2) формирования русла динамического равновесия, характеризующегося наличием в русле допустимых обратимых деформаций (первоначально заданный профиль может несколько трансформироваться, если он отличается от равноустойчивого). Могут также происходить изменения русловых образований по отдельным периодам и сезонам; однако при этом основные гидрометрические параметры русла — ширина по верху B и средняя глубина $H_c = \frac{\omega}{B}$ (ω — площадь живого сечения при руслоформирующем расходе Q) практически остаются неизменными, обеспечивая в пределах заданной точности пропускную способность русла.

По первому условию рассчитывают русла трапецидального профиля, имеющие обычно глубину $H \leq 3-3,5$ м и максимальный расчетный расход воды $Q \leq 20-30$ м³/с. Устойчивость такого профиля определяется в первую очередь устойчивостью откосов, которые по сравнению с дном сильнее подвержены размывающему действию потока. Устойчивость русл с закрепленными откосами определяется сопротивляемостью дна размыву. Поэтому прогноз устойчивости такого профиля необходимо производить раздельно, исходя из устойчивости откосов и дна русла.

Для составления уравнения предельного равновесия откоса в подводной зоне (рис. 2) используем метод влекущей силы, предложенный в работе

[1], который является в значительной степени приближенным. Недостаточно изученными в нем являются характер распределения удельной влекущей силы потока (касательных напряжений) $\tau_{от}$ по откосу, а также учет физико-механических свойств грунта. По предложению Г.В.Васильченко [2], примем максимальные продольные касательные напряжения $\tau_{от}$ пропорциональными косинусу угла α заложения откоса (эта пропорциональность доказывается

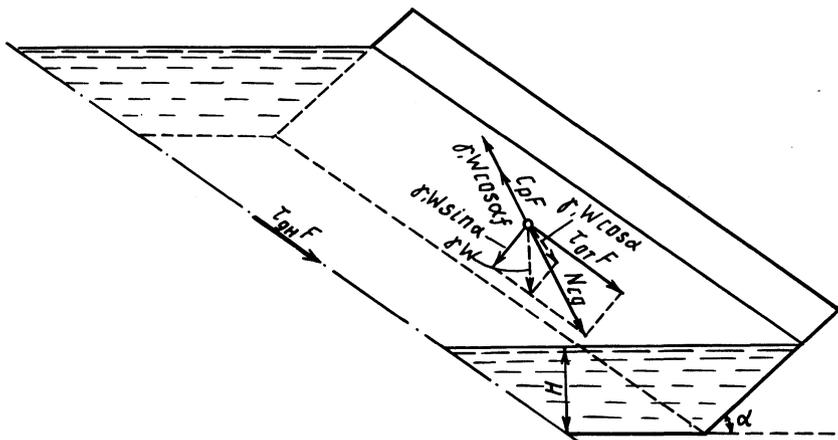


Рис. 2. Схема действия сил на элемент грунта в подводной зоне откоса.

также теоретически в работе [1]), а влияние соотношения размеров поперечного сечения b/H (b — ширина русла по дну, м; H — глубина наполнения русла при руслоформирующем расходе, м) на $\tau_{от}$ выразим приближенно по данным [1], аппроксимируя зависимостями для коэффициентов, соответственно для откоса ψ и дна ψ_1 :

$$\left. \begin{aligned} \psi &= 0,8 + 0,1 \sqrt{\frac{b}{H}} \text{ при } \frac{b}{H} \leq 4; \quad \psi = 1 \text{ при } \frac{b}{H} > 4; \\ \psi_1 &= 0,550 + 0,265 \sqrt[3]{\frac{b}{H}} \text{ при } \frac{b}{H} \leq 4; \quad \psi_1 = 1 \text{ при } \frac{b}{H} > 4. \end{aligned} \right\} (1)$$

Тогда расчетные значения максимальной удельной влекущей силы на откосе

$$\tau_{от} = \psi \gamma_0 H l \cos \alpha,$$

на дне

$$\tau_{дн} = \psi_1 \gamma_0 H l,$$

где γ_0 — плотность воды; H, l — соответственно глубина и уклон руслоформирующего потока.

С учетом сил взвешивания грунта водой, внутреннего трения и сцепления грунта при разрыве в воде (по А.Ф.Печурову [3]) суммарная сила $N_{\text{сд}}$, сдвигающая элемент (объем W , площадь проекции F) грунта на откосе (см. рис. 2) :

$$N_{\text{сд}} = \sqrt{W^2 \gamma_1^2 / (1 + m^2) + \psi^2 \gamma_0^2 H^2 l^2 m^2 / (1 + m^2) F^2}.$$

Удерживающая сила $N_{\text{уд}}$ определится как сумма сил трения и сцепления грунта в воде:

$$N_{\text{уд}} = W \gamma_1 f m / \sqrt{1 + m^2} + C_p F,$$

где γ_1 – плотность (объемная масса) грунта во взвешенном водой состоянии, $\gamma_1 = (\gamma - \gamma_0) (1 - n)$; γ – плотность частиц грунта; n – пористость грунта в долях единицы; m – коэффициент заложения откоса, равный $\text{ctg } \alpha$; f – коэффициент внутреннего трения грунта в воде; C_p – расчетное сцепление грунта при разрыве в воде.

Приравнивая сдвигающие и удерживающие силы и учитывая $W/F = d$, после преобразований и допущений, что множитель при сцеплении $\sqrt{1 + 1/m^2} \approx 1$, получаем приближенное уравнение равновесия:

$$\psi \gamma_0 H l = \gamma_1 d \sqrt{f^2 - 1/m^2 + C_p / \gamma_1 d (2f + C_p / \gamma_1 d)}, \quad (2)$$

где d – расчетный диаметр частиц грунта, для песчаных грунтов принимают равным d_{85} (диаметру частиц, мельче которых в грунте содержится 85 % по массе, – крупная фракция), m ; для глинистых грунтов – размер агрегатов, равный, по Мирцхулаве, $d = 0,003 - 0,004$ м.

Из уравнения (2) критерий устойчивости откоса η_y выражается следующим образом:

$$\eta_y = \frac{\gamma_1}{\psi \gamma_0} \frac{d}{H l} \sqrt{f^2 - 1/m^2 + C_p / \gamma_1 d (2f + C_p / \gamma_1 d)}; \quad (3)$$

максимально допустимый на размыв откоса уклон $l_{\text{доп}}$ руслоформирующего потока:

$$l_{\text{доп}} = \gamma_1 / \psi \gamma_0 \frac{d}{H} \sqrt{f^2 - 1/m^2 + C_p / \gamma_1 d (2f + C_p / \gamma_1 d)},$$

для несвязных грунтов (при $C_p = 0$) :

$$\eta_y = \frac{\gamma_1}{\psi \gamma_0} \frac{d}{H l} \sqrt{f^2 - 1/m^2}; \quad (3a)$$

$$l_{\text{доп}} = \frac{\gamma_1}{\psi \gamma_0} \frac{d}{H} \sqrt{f^2 - 1/m^2}. \quad (4a)$$

Полученные зависимости (3)-(4 а) уточняют расчеты устойчивости трапецидальных русел по сравнению с ранее предложенными нами [4] формулами и применимы в более широком диапазоне изменения коэффициента $m > 1$. В отличие от формул, приведенных в работе [5], они учитывают влияние парамет-

ров m и b/H поперечного сечения на удельную влекущую силу и более точно отражают действие сил сцепления.

Рассматривая предельное равновесие элемента грунта на дне русла, получаем критерий устойчивости дна $\eta_{кр}$ и максимально допустимый на размыв дна уклон $l_{кр}$ руслоформирующего потока:

$$\eta_{кр} = \frac{\gamma_1 df + C_p}{\psi_1 \gamma_0 H l}, \quad l_{кр} = \frac{\gamma_1 df + C_p}{\psi_1 \gamma_0 H}.$$

Исследования, проведенные лабораторией регулирования водоприемников БелНИИМВХ [3, 6 и др.], показывают, что откосы, а следовательно, и поперечное сечение русла устойчивы к размыву и зарастанию при $\eta_{доп} \geq 1$ или при $l \leq l_{доп}$. Соответственно, дно будет устойчивым при $\eta_{кр} \geq 1$ или при $l \leq l_{кр}$.

По указанному выше второму условию оценивают динамическую устойчивость русла методом подобия по так называемым морфометрическим зависимостям, которые получены в результате обобщения продолжительных наблюдений за развитием русловых процессов в той или иной группе водотоков, объединенных общими характерными признаками (географические зоны, генетические группы грунтов, размеры водотоков). Для естественных рек применяют зависимости С.Т.Алтунина, М.А.Великанова, В.А.Знаменского и др.

Применительно к регулируемым путем спрямления руслам рек-водоприемников, проходящим в песчаных грунтах с расходом воды $Q \geq 20 \text{ м}^3/\text{с}$, рекомендуются полученные нами ранее [6] морфометрические зависимости для определения ширины по верху B и средней глубины H_c динамически устойчивого русла:

$$B = l^{1/7} \left(\frac{Q}{C} \right)^{4/7} \left(\frac{\lambda_c \gamma_0}{\gamma_1 df + C_p} \right)^{3/7}; \quad (5)$$

$$H_c = \frac{1}{l^{3/7}} \left[\frac{Q (\gamma_1 df + C_p)}{\lambda_c \gamma_0 C} \right]^{2/7}, \quad (6)$$

где l , Q — соответственно уклон и расход руслоформирующего потока (расчетный максимальный расход); λ_c — коэффициент стабилизации русла (безразмерный) (его среднее значение для регулируемых русл рек с расходом $Q = 20\text{--}50 \text{ м}^3/\text{с}$ найдено равным 7 и для $Q = 50\text{--}100 \text{ м}^3/\text{с}$ 6,2 при расчетном диаметре $d = d_{85}$ (крупная фракция); численное значение λ_c можно приближенно принимать равным $Q^{0,42}$, используя в качестве расчетного $d = d_{50}$ (d_{50} — средний диаметр частиц грунта). Скоростной коэффициент C для рек, формирующихся в песчано-гравелистых отложениях (при отсутствии данных измерений), можно определять приближенно по экспериментальной формуле А.Д.Альтшуля; $C = 14,8/l^{1/6} - 26$.

При заданных уклоне l и расходе Q по зависимостям (5, 6) возможно прогнозировать размеры русла B и H_c , при которых будут обеспечены его пропускная способность и динамическая устойчивость в определенных грунтовых условиях.

Натурные наблюдения показывают, что регулированные русла динамического равновесия в песчаных грунтах имеют обычно параболический профиль со вставкой, близкой к горизонтальной, при $Q \geq 20-30 \text{ м}^3/\text{с}$ (см. рис. 1). Текущие ординаты ветви b_1 (при соответствующих h) параболы с началом координат в ее вершине находят из уравнения $b_1 = \sqrt{2pH}$, где p — параметр параболы, определяемый из условия устойчивости откоса в верхней точке сечения по формуле

$$p = 2Hm^2, \quad m \geq \frac{1}{f + C_p / \gamma_1 d}.$$

Для несвязных грунтов ($C_p = 0$) $m \geq 1/f$. С учетом значения p уравнения устойчивости параболы принимают вид

$$b_1 = \frac{2}{f + C_p / \gamma_1 d} \sqrt{Hh}, \quad (7)$$

при $C_p = 0$

$$b_1 = 2/f \sqrt{Hh}. \quad (8)$$

Задаваясь рядом значений h в пределах от 0 до H , по (7) или (8) получаем соответствующие им значения b_1 , изменяющиеся от 0 до B_1 . Длина донной вставки $b = B - 2B_1$.

Площадь параболического сечения с донной вставкой, определяемая по формуле

$$\omega = H(4/3B_1 + b), \quad (9)$$

равна площади, получаемой из расчета по морфометрическим зависимостям, т.е. $\omega = BH_c$.

Из формулы (7) при $h = H$ получаем $b_1 = B_1$; с учетом значения $m, B_1 = 2mH$, $b = B - 4mH$. Подставляя B_1 и b в формулу (9), получаем уравнение $4/3mH^2 - BH + \omega = 0$, из которого можно определить значение максимальной глубины русла H (при известной площади $\omega = BH_c$):

$$H = \frac{B - \sqrt{B^2 - \frac{16}{3} m\omega}}{8/3 m}. \quad (10)$$

Натурные наблюдения показали хорошую сходимость расчетного профиля и стабилизированных сечений регулированных русел рек. Для примера на рис. 1 показаны характерные профили рек Орессы и Лани. Небольшое отклонение от измеренного профиля дает также косинусоида, уравнение которой с началом координат, отстоящим от уреза воды на расстоянии B'_1 (см. рис. 1), для несвязных грунтов, по В.Т.Чоу [1], имеет вид $h = H \cos\left(\frac{f}{H} b'_1\right)$, (11), где угол над знаком косинуса измеряется в радианах. Ширина B'_1 рассчитывается из (11) при $h = 0$, т.е. $B'_1 = H\pi/2f$.

Профиль, рассчитанный по каноническому уравнению параболы с параметром p , который определяется непосредственно из этого уравнения, т.е. $p = B^2/8H$, значительно отклоняется от измеренных в натуре сечений.

Для защиты откосов и дна русла от размыва их крепят часто наброской (пригрузкой) из сыпучих крупнозернистых материалов (щебня, гравия, камня и т.п.). Средний диаметр D_{50} зерен материала наброски (пригрузки) назначают из условия недопущения подвижки ее отдельных зерен под действием руслового потока: для откоса $D_{50} = \frac{10\psi H I}{\sqrt{f_n^2 - \frac{1}{m^2}}}$; для дна $D_{50} = \frac{10\psi_1 H I}{f_n}$,

где f_n — коэффициент внутреннего трения материала наброски: для сортированных щебня и гравия $f_n = 0,9-1,0$, гравийно-песчаных смесей $0,75-0,9$, каменной наброски $1,0$; ψ и ψ_1 определяют по выражению (1).

Для песчаных незакрепленных откосов допустимую скорость $v_{сн.д}$ снижения уровня воды в русле (бьефе сооружения) можно приближенно определить по формуле, аппроксимирующей полученную нами ранее точную зависимость [7]:

$$v_{сн.д} = \frac{6Kmh_{вд}^2}{\mu(m+0,5)^2(h_{сн} - h'_{вд})h_{сн}}, \quad (12)$$

где K, μ — соответственно коэффициент фильтрации и водоотдача (в долях единицы) грунта; $h_{сн}$ — заданная высота снижения уровня воды; $h'_{вд}$ — допустимая высота высачивания грунтовых вод на откос при неустановившейся фильтрации;

$$h'_{вд} = \frac{600[\gamma_1 d_{90}(mf-1) + mC_p]}{\gamma_0}.$$

Здесь d_{90} — диаметр частиц крупной фракции грунта.

В формуле (12) сохраняется принцип размерностей и поэтому K и $v_{сн.д}$ выражаются в одинаковых размерностях, например в м/ч. Водоотдача минерального грунта может быть определена по формуле Эркина, которая при размерности K в м/ч имеет вид:

$$\mu = 0,275 \sqrt{K} \sqrt[3]{h_{сн}}.$$

Применение приведенных выше расчетных зависимостей для оценки устойчивости русел и прогноза их деформаций позволит проектировать устойчивые к размыву и заилению регулируемые русла рек-водоприемников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ч о у В.Т. Гидравлика открытых каналов: (перевод с англ.) М., 1969. — 464 с.
2. В а с и л ь ч е н к о Г.В. Расчет неразмываемых откосов инженерных сооружений без крепления. НТИ Минводхоза БССР. — Минск, 1979, № 10, с. 17—20.
3. П е ч к у р о в А.Ф. Основы проектирования водоприемников и каналов осушительно-увлажнительных систем. — В кн.: Проблемы Полесья. Минск, вып. 2, 1973, с. 374—414.
4. М и х н е в и ч Э.И. Новые типы крепления мелиоративных каналов. — Минск, 1978. — 128 с.
5. Б е л ь е в А.Н. Оценка допустимых скоростей на размыв для мелиоративных водоприемников и каналов в несвязных грунтах. — В кн.: Научные основы проектирования и строительства гидромелиоративных систем. Минск, 1981, с. 81—94.
6. М и х н е в и ч Э.И. Морфо-

метрические зависимости для расчета параметров устойчивых русл регулируемых рек-водоприемников.— В кн.: Конструкции и расчеты осушительно-увлажнительных систем. Минск, 1980, с. 104—115. 7. М и х н е в и ч Э.И. Допустимая скорость снижения уровня воды в канале с незакрепленными песчаными откосами. — В кн.: Научные основы проектирования и строительства гидромелиоративных систем. Минск, 1981, с. 65—80.

УДК 627.8

В.Е.ЛЕВКЕВИЧ (ЦНИИКИВР)

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЕЙ БЕРЕГОВЫХ СКЛОНОВ МАЛЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Длина береговой линии водохранилищ Белоруссии (за исключением прудов) составляет около 1300 км [1]. Из них 1/4 — абразионные берега. При среднем значении линейной переработки берегов водохранилищ (приблизительно 20 м) площадь земель, изымаемых из сельскохозяйственного оборота, составляет около 5000 га. Развитие абразионных процессов вызывает активизацию так называемых вторичных отрицательных явлений (овражной эрозии, оползней, осовов, в некоторых случаях — суффозионного выноса), которые также способствуют увеличению площади отторгаемых земельных угодий.

Берегозащитные мероприятия требуют значительных капитальных вложений. Так, по данным Ю.Н.Сокольников [2], стоимость 1 км защищаемого берега в условиях крупных равнинных водохранилищ составляет 1—2 млн. руб. В условиях же малых водоемов этот показатель достигает 50,0 тыс. руб. (Заславльское водохранилище). Во многих случаях традиционные способы берегозащиты являются неоправданно дорогостоящими и малоэффективными [3].

В нашей республике эксплуатируется более 100 малых водоемов, а на стадии строительства и проектирования находится около 15—20 объектов. Строительство водохранилищ осуществляется, как правило, в обжитых густонаселенных районах республики.

Автором данной статьи на основе анализа и обобщения многочисленных натуральных и лабораторных исследований [4, 5] разработаны основы управления деформацией берегов проектируемых малых водохранилищ без применения инженерных конструкций. В основе методики управления процессом деформации абразионных берегов — следующие положения литодинамики береговой зоны и гидролого-морфологической теории берегового процесса [6]:

береговой процесс обладает инерционностью и изменчивостью. Инерционность заключается в сохранении основных черт переработки в период продолжительного отрезка времени, изменчивость — в потере свойств инерционности из-за наличия естественных причин;

указанный процесс протекает под воздействием большого количества факторов;