УДК 626.86

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРЕПЛЕНИЙ КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПЮР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ПО ШИРИНЕ РУСЛА

Докт. техн. наук, проф. МИХНЕВИЧ Э. И.

Белорусский национальный технический университет

Устойчивость каналов к размыву русловым потоком обеспечивается путем назначения в русле допускаемых скоростей или их креплением, если скорости течения воды превышают допустимые. Существующая методика проектирования креплений, исходя из средней по сечению скорости потока, как правило, требует одинакового типа крепления по всей высоте откоса, соответствующей пропуску расхода воды расчетной обеспеченности, что приводит к повышенной капитальности и стоимости креплений. Эта методика не отражает полную физическую картину воздействия руслового потока на откосы канала, так как фактические разрушения откосов вызывают не средние по живому сечению, а средние на вертикали скорости, которые неодинаковы на различной глубине воды на откосе. Эпюры распределения в русле средних по вертикали скоростей показывают, что они имеют практически постоянные значения только по ширине дна, а по ширине откоса изменяются от максимальных значений у его подошвы до минимальных к урезу воды. При этом допускаемые скорости, напротив, по мере приближения к урезу воды несколько увеличиваются (рис. 1).

Все это дало возможность предложить более рациональную методику проектирования креплений откосов, позволяющую снижать капитальность креплений, назначая их типы дифференцированно по высоте откоса с учетом эпюр распределения по ширине русла средних на вертикалях и допускаемых скоростей.

Для оценки устойчивости каналов к размыву нами [1, 2] разработаны более совершенные формулы для определения допускаемых на размыв скоростей.

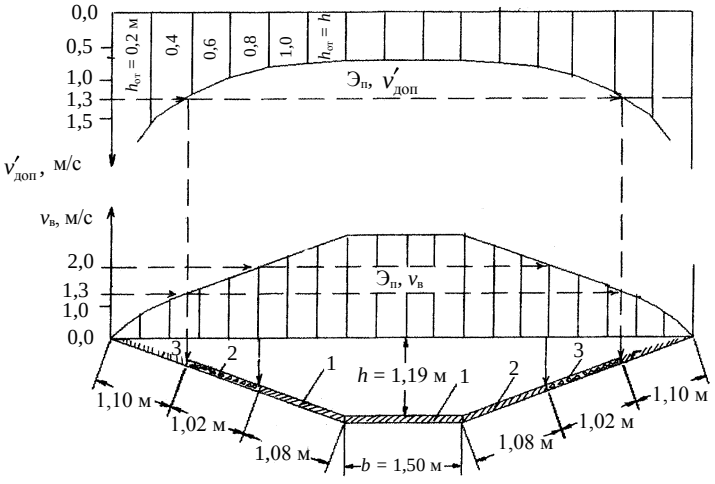

Рис. 1. Эпюры распределения средних на вертикалях $v_в$ и допускаемых $v'_{доп}$ скоростей в канале

и его крепления: 1 – плиты из пористого бетона; 2 – пригрузка из щебня; 3 – посев трав

Особенностью этих формул является то, что они позволяют раздельно оценивать устойчивость к размыву откосов и дна русла и учитывают все основные физические и физико-механические свойства грунта. При их выводе использован степенной закон распределения скоростей, позволяющий более достоверно оценивать русловой процесс в различных характерных стадиях движения наносов.

Формулы имеют следующий вид:

• для дна

$$v_{\text{доп}} = a\left(\frac{R}{d}\right)^x \sqrt{\frac{n_y}{\rho_в} P_s}; \qquad (1)$$

• для откоса

$$v'_{\text{доп}} = a\left(\frac{R}{d}\right)^x \left(\frac{g\rho_1 d n_y h}{\rho_в h_{от}}\right)^{0,5} \times \times\left[f^2 - \frac{1}{m^2} + \frac{c_р}{g\rho_1 d}\left(2f + \frac{c_р}{g\rho_1 d}\right)\right]^{0,25}. \qquad (2)$$

В формулах приняты следующие обозначения: R – гидравлический радиус, м; d – расчетный диаметр грунта, м, который принимают в однородных грунтах (коэффициент неоднородности $\eta_н = d_{85}/d_{10} \le 4$) $d = d_{50}$ – средний диаметр и в неоднородных грунтах ($\eta_н > 4$) $d = d_{85}$ – диаметр крупной фракции, образующей естественную отмостку; ρ_1 – плотность грунта с учетом взвешивания его водой, кг/м^3,

$$\rho_1 = \rho_s - \rho_в \quad 1 - n_s \;, \text{ или } \rho_1 = \frac{\rho_s - \rho_в}{1+\varepsilon}, \qquad (3)$$

ρ_s, $\rho_в$ – плотность соответственно частиц грунта и воды, кг/м^3; n_s, ε – пористость и коэффициент пористости грунта; g – ускорение силы тяжести, м/с^2; f – коэффициент внутреннего трения грунта в воде; $c_р$ – удельное сцепление грунта при разрыве в воде, Па, определяется по методике А. Ф. Печкурова [3] путем отрыва цементируемой на поверхности грунта пластинки; для однородных песчаных грунтов при d = = 0,1–1,0 мм приближенное значение $c_р$ можно получить по формуле

$$c_р = \frac{0,0032}{\sqrt{d}}, \qquad (4)$$

где d – средний диаметр, м, при $d > 1$ мм $c_р = 0$; m – коэффициент заложения откоса; n_y – коэффициент условий работы, при содержании в потоке наносов в коллоидном состоянии $S <$ < 0,1 кг/м^3 $n_y = 1$, а при $S \ge 0,1$ кг/м^3 $n_y = 1,3–1,5$ – для песчаных грунтов; P_s – показатель прочности (размывоустойчивости) грунта, Па,

$$P_s = g\rho_1 df + c_р; \qquad (5)$$

h – глубина воды в русле, м; $h_{от}$ – глубина от уреза воды до точки откоса, в которой определяется допускаемая средняя по вертикали скорость, м.

Коэффициент a и показатель степени x учитывают характер гидравлических сопротивлений, пульсацию скоростей и др., их значения принимают в зависимости от стадии движения наносов:

$a = 2,06$; $x = 0,17$ – для стадии начала влечения отдельных зерен грунта (неразмывающие скорости);

$a = 3,16$; $x = 0,14$ – для стадии начала образования гряд;

$a = 5,96$; $x = 0,10$ – для начала взвешивания грунта.

Расчетные стадии движения наносов выбирают в зависимости от вида водотока и задачи обеспечения его устойчивости. Водоотводящие каналы трапецеидального профиля с расходом воды $Q \le 15–20$ м^3/с рассчитывают обычно на допускаемые скорости в пределах между значениями, соответствующими стадиям начала влечения отдельных зерен и грядообразования, принимая чаще всего за расчетную стадию начало образования гряд (подвижность донных наносов препятствует зарастанию русла), а для крупных каналов и канализированных рек с паводковым расходом $Q > 20$ м^3/с – на начало взвешивания грунта при пропуске паводковых расчетных расходов (учитывая их непродолжительное воздействие на русло). Расчет устойчивости откосов и крупнозернистого материала пригрузки (наброски) для крепления дна и откосов выполняют исходя из их статического равновесия и недопущения срыва отдельных зерен, т. е. за расчетную принимается стадия начала влечения отдельных зерен грунта.

Для построения эпюры допускаемых скоростей на откосе задаются различными значениями $h_{от}$ в (2), выбрав шаг изменения ширины (например, через 0,2 м), и при каждом значении $h_{от}$ определяют по расчетным характеристикам грунта значения допускаемых скоростей в заданных точках откоса. На этих же вертикалях рассчитывают средние по глубине фактические скорости потока и затем строят эпюру распределения их по ширине откоса (рис. 1). По эпюре находят значение средней скорости на вертикали, которому соответствует допускаемая скорость для менее капитального типа крепления, назначаемого по откосу выше точки, из которой выходит данная вертикаль. По эпюре распределения по откосу допускаемых скоростей устанавливается точка на откосе, в которой допускаемая скорость равна средней на вертикали скорости потока, и соответственно участок откоса от этой точки до уреза воды, на котором крепление от размыва русловым потоком не потребуется. Обычно эта часть откоса закрепляется посевом трав – одерновкой или гравийной пригрузкой для предупреждения его разрушения стекающими по откосу поверхностными водами.

Распределение средних по вертикали скоростей по ширине откоса можно определить по формуле

$$v_{в} = \frac{I^{0,5}}{n} h_{от}^{0,5+y} \cos^{0,5+y} \alpha, \qquad (6)$$

где I – уклон руслового потока; $h_{от}$ – глубина погружения рассматриваемой точки под урез воды, м; y – показатель степени в формуле Павловского для определения коэффициента Шези:

$$C = \frac{1}{n} R^{y} \ (y = 1,5\sqrt{n} \ \text{при} \ R \le 1 \ \text{м}$$
$$\text{и} \ y = \ 1,3\sqrt{n} \ \text{при} \ R > 1 \ \text{м}); \qquad (7)$$

n – коэффициент шероховатости; α – угол наклона откоса к горизонту.

Если в русле созданы допускаемые для дна средние скорости, то достаточно закрепить от размыва русловым потоком нижнюю наиболее неустойчивую часть откоса до точки, отстоящей на глубину $h'_{от}$ от расчетного уровня воды, а в верхней части предусмотреть ее защиту (при необходимости) от действия фильтрационного потока и поверхностной эрозии. Высоту $h'_{от}$ определяют из условия равенства допускаемых придонных скоростей для откоса и дна по формуле

$$h'_{от} = \frac{g\rho_1 dh\sqrt{f^2 - \frac{1}{m^2} + \frac{c_р}{g\rho_1 d}\left(2f + \frac{c_р}{g\rho_1 d}\right)}}{g\rho_1 df + c_р}. \qquad (8)$$

Для несвязных грунтов, у которых можно принять $c_р = 0$:

$$h'_{от} = h\sqrt{1 - \frac{1}{m^2 f^2}}. \qquad (9)$$

Высота крепления $h_к$ откоса от размыва в этом случае $h_к = h - h'_{от}$. Значение $h'_{от}$ можно найти также непосредственно с эпюры распределения скоростей.

Крупность зерен пригрузки (наброски) можно рассчитывать, используя приведенные выше формулы (1) и (2), решая их относительно диаметра, принимая при этом скорость $v = v_{доп.нер}$, т. е. соответствующей стадии начала влечения отдельных зерен грунта ($\alpha = 2,06$; $x = 0,17$).

Так, для дна, принимая $c_р = 0$; $\rho_1/\rho = 1$; $n_у = 1$, можно получить следующую формулу для определения среднего диаметра материала пригрузки $D_д$:

$$D_д = \frac{v^{3,03}}{8,93R^{0,515}(gf_n)^{1,515}}, \qquad (10)$$

где f_n – коэффициент внутреннего трения крупнозернистого материала в воде, принимается равным 0,80–0,90 – для гравия; 0,9–1,0 – для мелкого щебня; 0,7–0,8 – для гравийно-песчаных смесей; $f_n = 1$ – для каменной наброски и крупных сортированных фракций щебня.

Для откоса, решая аналогично формулу (2) относительно диаметра $D_{от}$, получим

$$D_{от} = \frac{v^{3,03}}{8,93R^{0,515}(gh/h_{от})^{1,515}(f_n - 1/m^2)^{0,758}}. \qquad (11)$$

Для наиболее неустойчивой нижней зоны откоса принимают $h_{от} = h$

$$D_{от} = \frac{v^{3,03}}{284R^{0,515}(f_n - 1/m^2)^{0,758}}. \qquad (12)$$

Предлагаемая методика подбора типов креплений по эпюрам распределения скоростей в русле внедрена на трех опытно-производственных объектах мелиорации в Минской области. Проводящие каналы, крепления которых запроектированы и построены по данной методике, находятся в эксплуатации уже более 10 лет в устойчивом состоянии. Каналы на этих объектах проложены в песчаных грунтах, имеют большие уклоны дна (i = 0,0045–0,017) и высокие скорости течения воды (v = 1,7–2,7 м/с). Для защиты их от размыва в проекте были предусмотрены крепления дна и откосов плитами из пористого (фильтрующего) бетона размерами 2×2×0,1 и 1,5×1×0,1 м в два-три ряда по высоте откоса. Применение новой методики позволило снизить капитальность креплений и оставить только нижний ряд плит, а на отдельных участках – исключить их полностью. Вместо их использовали облегченные конструкции: пригрузку из щебня по слою геотекстиля «дорнит» или без него в зависимости от грунтовых условий, а в верхней зоне откосов – гидропосев трав, что дало значительный экономический эффект и при этом обеспечило надлежащую устойчивость каналов.

Практическое использование предлагаемой методики подбора креплений откосов по эпюрам распределения скоростей показано ниже на примере проектирования креплений канала «Городейка» на участке ПК 50–54 (объект – совхоз «Городейский» Несвижского района). Эпюры распределения скоростей по ширине русла приведены для ПК 50 + 50 (рис. 1). Выбранный участок имеет большой продольный уклон i = 0,0045 и соответственно скорости течения воды в русле v > 2 м/с, значительно превышающие допускаемые для дна $v_{доп}$ = 0,56 м/с и откосов (при $h = h_{от}$) $v'_{доп}$ = 0,70 м/с.

Параметры запроектированного канала на данном участке следующие: коэффициент заложения откоса m = 2,5; ширина по дну b = 1,5 м; расчетная глубина воды в русле h = 1,19 м; гидравлический радиус R = 0,67 м.

Грунт на откосах имеет следующие физико-механические характеристики: коэффициент внутреннего трения грунта в воде f = 0,70; удельное сцепление $c_р$ = 0,153 Па. Крупность зерен грунта: средний диаметр d_{50} = 0,88 мм; диаметр крупной фракции d_{85} = 3,3 мм; диаметр мелкой фракции d_{10} = 0,135 мм. Показатель прочности грунта при $d = d_{50}$ P_s = 6,19 Па; при $d = d_{85}$ P_s = 23,1 Па – расчетное значение, так как грунт неоднородный (коэффициент $\eta_н$ > 4).

Для грунта со дна русла: f = 0,68; $c_р$ = 0,30 Па; d_{50} = 0,195 мм; d_{85} = 1,2 мм; d_{10} = 0,075 мм; P_s = = 1,62 Па при $d = d_{50}$ и расчетное значение P_s = = 8,40 Па при $d = d_{85}$.

Плотность грунта, взвешенного водой, ρ_1 = = 1013 кг/м^3; плотность воды $\rho_в$ = 1000 кг/м^3.

В результате применения данной методики первоначально запроектированные крепления канала плитами из пористого (фильтрующего) бетона в три ряда по откосу заменены на следующие типы креплений: нижняя часть откосов и дно – плиты из пористого бетона, средняя зона – пригрузка из щебня и верхняя зона откосов – гидропосев трав (рис. 1).

ВЫВОД

Механизм разрушения откосов русловым потоком обусловлен воздействием средних по вертикалям скоростей, которые изменяются по ширине откоса от максимальных значений у его подошвы до минимальных к урезу воды. Устойчивость каналов к размыву рекомендуется оценивать по формулам допускаемых скоростей раздельно для откосов и дна русла.

Типы креплений откосов предлагается назначать дифференцированными по глубине на основе эпюр распределения скоростей, что позволяет снижать капитальность креплений к урезу воды и соответственно их стоимость. Каналы, запроектированные и построенные на опытно-производственных объектах по предлагаемой методике, находятся в устойчивом состоянии в течение длительного периода эксплуатации, что позволяет рекомендовать эту методику к широкому внедрению.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Михневич, Э. И.** Определение допускаемых скоростей течения воды в каналах / Э. И. Михневич // Гидротехническое строительство. – 1989. – № 1. – С. 14–18.

2. **Михневич, Э. И.** Совершенствование методов рас-

чета устойчивости русел регулируемых рек – водоприемников и проводящих каналов мелиоративных систем / Э. И. Михневич // Экологические аспекты мелиорации. – Минск: БелНИИМ и ВХ, 1990. – С. 50–63.

3. **Печкуров, А. Ф.** Устойчивость русл рек и каналов / А. Ф. Печкуров. – Минск: Ураджай, 1989. – 644 с.

Поступила 24.04.2009

УДК 620.192: 624.05

РАСЧЕТ ДЛИНЫ И ШИРИНЫ РАСКРЫТИЯ ТРЕЩИНЫ, РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ВО ВРЕМЕНИ

Доктора техн. наук, профессора ЛЕОНОВИЧ С. Н., ПИРАДОВ К. А.

Белорусский национальный технический университет,
Московский государственный открытый университет

Расчет длины трещины. При определении длины развивающейся во времени трещины представляется важным учесть изменение во времени реологических свойств материала и величины критического коэффициента интенсивности напряжений. Процесс трещинообразования в бетоне рассмотрен в рамках модели Леонова – Панасюка – Дагдейла. С использованием локального энергетического критерия с учетом диссипации энергии в концевой зоне трещины получено выражение для скорости роста трещины нормального отрыва. В случае постоянных внешних нагрузок скорость развития трещины определяется по формуле

$$\frac{dl_{crc}}{dt} = \frac{\pi \frac{d}{dt} J(0)}{24\sigma^2 J(0)} \frac{K_I^4}{\frac{2D}{1-\nu^2 J(0)} - K_I^2(t)}, \qquad (1)$$

где σ – напряжения в концевой зоне; $K_I(t)$ – коэффициент интенсивности напряжений; D – энергия разрушения; ν – коэффициент Пуассона; $J(0)$ – функция ползучести $J(t)$ в момент времени $t = 0$.

Как известно, функция $J(t)$ при отсутствии пластической составляющей равна величине, обратной модулю упругости:

$$J(t) = \frac{1}{E}. \qquad (2)$$

Рост трещин в условиях ползучести для инвариантного во времени материала может быть описан при замене упругих постоянных некоторыми операторами. Учитывая, что в случае постоянной длительно действующей нагрузки напряжения с момента времени t являются постоянными и $C(t, \tau) = 0$, этот оператор примет вид

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E\ \tau} + C\ t,\tau\ , \qquad (3)$$

где $C(t, \tau)$ – мера ползучести.

В соответствии с этим

$$J\ t\ = \frac{1}{E\ \tau} + C\ t,\tau\ . \qquad (4)$$

Для описания величины $C(t, \tau)$ существуют в соответствии с теориями ползучести различные выражения. Приняв во внимание теорию старения, имеем

$$C\ t,\tau\ = C\ \infty,\tau \left[1 - e^{-\beta\ t-\tau\ }\right], \qquad (5)$$

где $C(\infty, \tau)$ – конечная величина меры ползучести; γ – численный коэффициент, характеризующий скорость нарастания ползучести.

Отметим, что возможно применение любого другого известного выражения для $C(t,\tau)$, что приведет лишь к некоторым математическим усложнениям.