УДК 626.876.3

© Л. А. Сухляева, аспирант
(Кубанский государственный аграрный университет
им. И. Т. Трубилина)
E-mail: l8800019@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-2-71-78

© L. A. Sukhlyeva, post-graduate student
(Trubilin Kuban State Agrarian University)
E-mail: l8800019@yandex.ru

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЖЕСТКИХ СКВОЗНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДОКАМЕННЫХ СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ

METHOD OF CALCULATING THE SLIT RIGID STRUCTURES FOR CONTROLLING WATER-ROCK DEBRIS FLOWS

Применение жестких сквозных противоселевых конструкций ограничивается из-за трудностей, связанных с выполнением расчетов. Предложенная методика состоит из двух групп расчетов — гидравлических и статических. Посредством гидравлических расчетов определяются объем селехранилища (твердой составляющей), высота элементов и расстояние между ними; расстояние между конструкциями при каскадном расположении нескольких сооружений в русле; величины местного размыва основания. В статических расчетах вычисляют параметры, необходимые при определении прочностных характеристик сквозных противоселевых конструкций. Помимо основных нагрузок, для жестких противоселевых конструкций следует определять: величину ударного воздействия селя; статическое давление отложившейся твердой составляющей ранее прошедшего селевого потока; суммарное — статическое и динамическое — давление движущегося потока. Методика позволит сократить сроки выполнения работ по проектированию и верно назначить основные конструктивные параметры жестких сквозных селезадерживающих конструкций.

Ключевые слова: селя, селевые паводки, водокаменные селевые потоки, жесткие сквозные селезадерживающие конструкции, метод расчета для проектирования и строительства, защита дорог от селевых потоков.

The use of slit rigid dams for controlling debris flow is limited due to the problems associated with making calculations. The article provides the results of the study aimed at improving the design quality of slit dams for controlling stony debris flows. The proposed method of calculation consists of two groups of calculations, namely, hydraulic and static calculations. By means of hydraulic calculations, such parameters are determined as the debris basin volume (solid component), the height of the elements and the distance between them; the distance between the structures at the cascade arrangement of several structures in the flow; degree of the base local erosion. Static calculations are aimed at determining the parameters needed in evaluating the strength characteristics of slit dams to control debris flows. Apart from the main loads acting upon river hydraulic structures, it is necessary to assess the magnitude of the debris flow impact, the static pressure of the deposited solid component of the previously passed debris flow, as well as the total (static and dynamic) pressure of the moving debris flow. The proposed calculation method will allow reducing the time spent on the design work, as well as properly estimating the main parameters of the slit dams to control debris flows.

Keywords: debris, debris flood, water-rock debris flows, rigid slit dams for controlling debris flow, calculation method for the design and construction, protection of roads from debris flows.

Введение

Для борьбы с селевыми потоками разработано множество методов инженерной защиты (рис. 1). Выбор того или иного способа защиты зависит от большого количества факторов, и в первую очередь от характеристик селевого потока [2, 3]. Объем и другие параметры селево-

го потока определяются по методике, приведенной в ВСН 03-76 «Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей».

Все чаще для защиты автомобильных дорог от селей применяют сквозные селезадерживающие конструкции (рис. 2). Это эффективная защита мостов и малых искусственных водоотводных

сооружений от негативного воздействия селя (усиленной эрозии, занесения наносами, вплоть до полного перекрытия сечения). Данный тип сооружений позволяет существенно сократить требуемый объем селехранилища, продолжительность и стоимость строительства, увеличить срок эксплуатации [9, 10].

Основными функциями сквозной селезадерживающей конструкции (СЗК) являются: задержание крупных фракций твердой составляющей селя, уменьшение объема, плотности и скорости селя. Принцип работы конструкции заключается:

- в снижении скорости потока (за счет местных сопротивлений);
- ограничении величины твердого стока (за счет размера просветов между элементами).

Перед сооружением образуется подпор и происходит уменьшение кинетической энергии потока. Далее снижается транспортирующая способность и часть твердой составляющей селя

осаждается перед сооружением, а оставшаяся — пропускается в нижний бьеф. Лишенный крупных включений, селевой поток трансформируется в наносоводный паводок, который не представляет опасности [5].

После заполнения верхнего бьефа СЗК возможно несколько вариантов работы. Один предполагает восстановление перехватывающей способности путем очистки верхнего бьефа от наносов, другой — эксплуатацию заполненной конструкции. Во втором случае снижение скорости селевого потока происходит за счет выполаживания тальвега (уклон отложений перед запрудой более пологий, чем естественный). Этот тип противоселевых сооружений требует меньшего расхода строительных материалов, чем массивные сплошные сооружения. Обладая относительно малой площадью конструкции, СЗК имеют значительный коэффициент гидравлической сплошности [12]. Небольшие по весу

Рис. 1. Типы противоселевых сооружений: а — дамбы; б — селеспуски; в — террасирование; г — галереи

Рис. 2. Сквозные противоселевые конструкции: а, б — жесткие; в, з — гибкие

элементы конструкции не вызывают затруднений при перевозке и монтаже.

В данной статье более подробно рассматриваются конструкции противоселевых сооружений жесткого типа, так как материалы для их устройства универсальны, относительно дешевы и легкодоступны, а монтаж не требует узкоспециализированного персонала. Но отсутствие четкой методики, изложенной «инженерным языком», ограничивает их применение. Поэтому, основываясь на анализе имеющихся натурных материалов, был предложен алгоритм расчета жестких СЗК, основанный на объединении и дополнении существующих наработок в этой области. Выбор формул основан на сравнении данных обследования селеактивных русел и противоселевых конструкций (балки и ручьи Черноморского побережья Краснодарского края) [6] и параметров, вычисленных по различным формулам. Полученная методика определения основных па-

раметров жестких СЗК состоит из гидравлических и статических групп расчетов и приводится ниже.

Гидравлические расчеты

Гидравлические расчеты жестких противоселевых конструкций включают определение:

- объема селехранилища, необходимого для задержания расчетного объема твердой фракции селя;
- высоты элементов;
- расстояния между конструкциями;
- расстояния между элементами конструкции;
- величины местного размыва.

При расчете объема основными определяющими параметрами являются геометрия русла перед сооружением и высота элементов селезадерживающей конструкции.

Расчетный объем наносов, задерживаемый конструкцией V , м³, определяется по формуле

ОДМ 218.2.052–2015 «Проектирование и строительство противоселевых сооружений для защиты автомобильных дорог»:

$$V = V_{\max} - V_{\text{сбр}} + TV_{\text{с.а}}, \quad (1)$$

где $V_{\max}$ — максимальный объем селевого потока в створе конструкции м^3 ; $V_{\text{сбр}}$ — объем жидкой составляющей, сбрасываемый в нижний бьеф в процессе аккумуляции (вычисляют только для наносоводных селей), м^3 ; T — время заилиения, принимаемое не менее 25 лет (при повторяемости селей менее 1 раза в 25 лет принимают $T=0$); $V_{\text{с.а}}$ — среднегодовой объем аккумулируемых наносов, м^3 .

Высота конструкции должна быть больше глубины селевого потока минимум в 2–3 раза [7], но не выше 3–4 м (рекомендуется). Элементы, расположенные в центре, рекомендуется делать ниже, чем по краям, для предотвращения размыва бортов русла при переливе селевого потока через гребень конструкции.

При устройстве каскада расстояние между жесткими селезадерживающими конструкциями по горизонтали L , м, подбирается исходя из условия: поверхность отложившихся наносов, берущая начало от верхней грани ниже расположенной конструкции, должна подходить к основанию выше расположенной конструкции [8]. Этот параметр определяется по формуле

$$L = \frac{H}{\text{tg } \alpha - \text{tg } \alpha_y}, \quad (2)$$

где H — высота жесткой селезадерживающей конструкции; $\text{tg } \alpha$ — уклон естественного русла; $\text{tg } \alpha_y$ — уравнильный уклон селевых отложений, принимаемый согласно СП 116.13330.2012 «Инженерная защита от опасных геологических процессов. Основные положения» по формуле

$$\text{tg } \alpha_y = (0,5 \dots 0,7) \text{tg } \alpha. \quad (3)$$

Коэффициент 0,5 принимается при естественном уклоне селевого русла менее 0,30. Уравнильный уклон селевых отложений должен быть менее критического уклона $i_{\text{кр}}$, т. е. уклона, при котором прекращается движение твердой фазы потока [4]. Значение критических уклонов для различной крупности наносов несвязных селевых потоков согласно руководству по проектированию и строительству противоселевых и противооползневых сооружений магистральных трубопроводов приведено в табл. 1.

Также длина участка между конструкциями должна быть больше длины инерционного пробега обломков на величину, обеспечивающую установившееся и равномерное движение селевого потока на участке пути перед нижерасположенной конструкцией. Рекомендуемые минимальные расстояния между конструкциями приведены в табл. 2.

Расстояние между элементами конструкции зависит от состава селевой массы, а именно от усредненного диаметра каменных включений и их процентного содержания в общей массе. Так, максимальная перехватывающая способность жесткой СЗК наблюдается в том случае, если справедливо выражение [13, 14]:

$$\frac{l}{d_{\max}} = 1,5 \dots 2,0, \quad (4)$$

где l — расстояние между элементами конструкции, м; $d_{\max}$ — максимальный диаметр наносов, перемещаемых селевым потоком, м.

При проектировании каскада жестких СЗК расстояние между элементами в конструкции вниз по течению рекомендуется уменьшать.

Жесткие сквозные сооружения должны рассчитываться на пропуск дождевого расхода с вероятностью превышения 2 %. Определение местного размыва зависит от грунтовых условий в створе конструкции. Согласно наставлению по изысканиям и проектированию железнодорож-

Таблица 1

Значения критических уклонов

Размер фракции, м	Критический уклон, доли ед.
Свыше 0,4–0,5	0,06–0,07
0,2–0,4	0,03–0,07
0,1–0,2	0,02–0,025
0,03–0,04	0,01–0,015

Таблица 2

Значения минимальных расстояний между конструкциями

Параметры селя	Расстояние, м
Сели с обломками не более 0,4–0,5 м	
при $\text{tg } \alpha_y \geq 0,05$	50–60
$\text{tg } \alpha_y < 0,05$	40–50
Сели с мелкими валунами	30–40

ных и автодорожных мостовых переходов через водотоки возможны следующие условия:

- русло сложено однородным несвязным грунтом (на глубину, превышающую величину размыва);
- русло сложено неоднородным несвязным грунтом;
- русло сложено связным грунтом.

Грунт относится к несвязным, если число пластичности меньше или равно единице; однородным, если средняя скорость потока больше размывающей для наносов максимального диаметра, которые составляют не менее 2 % веса грунта.

Наибольшую глубину размыва у элемента h_p , м, для первого условия рассчитывают по формуле

$$h_p = \left(h_0 + 0,014 \frac{v - v_0}{\omega} b \right) M, \quad (5)$$

где h_0 — предельная глубина местного размыва у цилиндрического элемента при $v = v_0$, м; b — расчетная ширина элемента, м; v — средняя скорость потока на вертикали перед элементом, м/с; v_0 — размывающая скорость для данного грунта, м/с; ω — гидравлическая крупность частиц грунта; M — коэффициент формы элемента, принимаемый по формуле

$$M = M_1 M_2 \eta_0, \quad (6)$$

где M_1 — коэффициент формы отдельного элемента, принимаемый для цилиндрической формы равным 1, прямоугольной — 1,24;

$$M_2 = 0,56 \left(\frac{Hv}{S\sqrt{gd}} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

где S — наименьшее расстояние в свету между элементами (по переднему ряду при многорядной конструкции), м;

$$\eta_0 = \frac{(S + 2a)n}{a(n+1) + \sum S}, \quad (8)$$

где a — ширина элемента, м; n — число просветов между элементами.

При $M_2 < 1$ принимают $M_2 = \eta_0 = 1$.

Для второго условия наибольшую глубину размыва определяют по формулам:

$$h_p = h_0 \left(\frac{v - v_n}{v_0 - v_n} \right)^{3/4} M; \quad (9)$$

$$h_0 = \frac{6,2\beta H}{\left(\frac{v_0}{\omega} \right)^\beta}, \quad (10)$$

где v_n — начальная скорость размыва, м/с; β — коэффициент, определяемый по формуле

$$\beta = 0,18 \left(\frac{b}{H} \right)^{0,867}, \quad (11)$$

где H — глубина потока перед опорой, м.

Глубину местного размыва в связном грунте находят по формуле

$$h = \frac{6,2\beta H}{\left(\frac{v_0}{\omega} \right)^\beta} \left(\frac{2v}{v_0} - 1 \right)^{0,75} M. \quad (12)$$

Если глубина размыва превышает толщину слоя одного типа грунта, а следующий слой относится к другому, то величина размыва определяется для каждого слоя. Во всех случаях глубина местного размыва принимается не более, чем дает формула (9).

Минимальная глубина заделки элементов в основание назначается на 1,0 м ниже максимальной глубины размыва.

Статические расчеты

Статические расчеты направлены на проверку прочности и устойчивости [11]. Помимо основных нагрузок, действующих на речные гидротехнические сооружения, для жестких противоселевых конструкций следует определять:

- статическое давление отложившейся твердой составляющей ранее прошедшего селевого потока;
- суммарное — статическое и динамическое — давление движущегося селевого потока;
- ударное воздействие селя.

Согласно П-814-84 «Рекомендации по проектированию противоселевых защитных сооружений» нагрузки на сквозные сооружения следует принимать как на сплошные селезадерживающие сооружения. Так, статическое давление отложившейся массы наносоводного селевого потока $P_{ст.н}$, Па, рекомендуется определять по формуле

$$P_{ст.н} = g(\rho_{нв} - \rho_{в})h_n t g^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi_n}{2} \right), \quad (13)$$

где g — ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; $\rho_{нв}$ — плотность водонасыщенного грунта наносов, кг/м³; $\rho_{в}$ — плотность воды, кг/м³; h_n — высота наносов перед плотиной, м; φ_n — угол внутреннего трения грунта наносов.

Суммарное (статическое и динамическое) давление селевого потока P_d , Па, на конструкцию определяется по формуле

$$P_d = k \rho_c v_{cp}^2, \quad (14)$$

где k — экспериментальный коэффициент, равный 4,5; ρ_c — плотность селевого потока, кг/м³; v_{cp} — средняя скорость селевого потока перед сооружением, м/с.

Расчетные схемы приложения статических и динамических нагрузок рекомендуется принимать по П-814–84.

Сила удара селевого потока о поперечную жесткую конструкцию P_y , т, вычисляется по формуле СН 518–79 «Инструкция по проектированию и строительству противоселевых защитных сооружений»

$$P_y = \frac{k V_c^2 \omega \gamma_c}{g}, \quad (15)$$

где k — экспериментальный коэффициент, равный 4,5; V_c — скорость селевого потока, м/с; ω — площадь сечения, м²; γ_c — плотность селевой массы, т/м³.

Также при проектировании жестких сооружений расчетная ударная сила [1] может быть принята по табл. 3.

Основание жестких сквозных селезадерживающих конструкций должно обеспечивать достаточную устойчивость при воздействии ударной нагрузки селевого потока.

Практическое применение

Предлагаемый метод расчета был применен для проверки существующих жестких сквозных селезадерживающих сооружений и проектирования новых. Ниже приведены результаты расчета конструкции из отдельно стоящих элементов (рис. 3), выполненных из стальных труб диаметром 0,53 м.

Расчетный объем твердого стока селя составил 1356 м³. С учетом уравнительного уклона высота конструкции должна быть не менее трех

Рис. 3. Сквозная конструкция для защиты от селевых потоков

метров. Оптимальное расстояние между элементами 0,5–0,6 м. Исходя из полученной глубины размыва (0,7 м) минимальная величина заделки элементов принята 1,7 м.

Закключение

На основе комплексного анализа расчетов по различным формулам были определены зависимости, дающие результаты, наиболее близкие к натурным. Объединение данных формул в единый алгоритм позволяет вычислить основные параметры жестких СЗК и состоит из двух групп расчетов.

Гидравлические расчеты конструкций включают определение объема селехранилища, высоты элементов, расстояния между конструкциями, расстояния между элементами конструкции, глубины местного размыва.

Статические расчеты направлены на проверку прочности и устойчивости конструкции. Дополнительно к расчетам для гидротехнических сооружений следует определять статическое давление отложившейся твердой составляющей ранее прошедшего селевого потока, суммарное — статическое и динамическое — давление движущегося селевого потока, и ударное воздействие селя.

Предложенный алгоритм расчета позволит сократить сроки проектирования и верно назначить основные параметры жестких селезадерживающих конструкций.

Библиографический список

1. Научно-технические достижения и передовой опыт в области автомобильных дорог. Защита от селевых потоков: Информационный сборник / под ред. Ж. Б. Байнатов. М.: Росавтодор, 1992. 50 с.

Таблица 3

Расчетные значения ударной силы селя

Мощность селевого потока	Максимальная глубина потока, м	Наибольший размер обломков, м	Ударная сила селя, т/м ²
Слабый	≤2	≤0,5	5–6
Средний	2–3	≤0,7	7–8

2. Благовещенский В. П. Опыт защиты от селей в Казахстане // Инженерная защита. 2015. № 11. С. 37–48.

3. Боброва Д. А. Инженерные мероприятия по защите линейных сооружений от селей на о. Сахалин // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 2-й конф., посвящ. 100-летию С. М. Флейшмана. М.: Географический факультет МГУ, 2012. С. 13–14.

4. Квасов А. И. Селевые потоки и их воздействие на сооружения. Алма-Ата: Наука, 1987. 130 с.

5. Маций С. И., Михеева Л. А., Любарский Н. Н. Особенности расчета параметров селевых потоков на Черноморском побережье Краснодарского края // Сергеевские чтения. Юбилейная конф., посвящ. 100-летию со дня рождения академика Е. М. Сергеева. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: ИГЭ РАН, 2012. С. 362–366.

6. Морозов М., Кривцов А. Сели и селезащита // Инженерная защита. 2014. № 3. С. 50–59.

7. Натишвили О. Г., Тевзадзе В. И. Определение максимальной высоты препятствия, преодолеваемого селевым потоком // Гидротехническое строительство. 2008. № 8. С. 23–25.

8. Флейшман С. И. Сели. 2-е изд. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 312 с.

9. Херхеулидзе И. И. Сквозные защитные и регулирующие сооружения из сборного железобетона на горных реках. М.: Гидрометеиздат, 1967. 131 с.

10. Fiebigier G. Experiences with the Chain of Functions in debris flow control // Debris flows: disasters, risk, forecast, protection: materials of the International Conference. Pyatgorsk: Sevkavgirovodkhoz Institute, 2008. Pp. 367–371.

11. Graf C., Haller B., Luis R. Field observations in barrier systems against debris flows // Debris flows: disasters, risk, forecast, protection: materials of the International Conference. Pyatgorsk: Sevkavgirovodkhoz Institute, 2008. Pp. 339–343.

12. Jakob M., Hungr O. Debris-flow hazards and related phenomena. UK: Chichester: Praxis Publishing, 2005. Pp. 464–476.

13. Lien H. P. Design of slit dams for controlling stony debris flows // International Journal of Sediment Research. 2003. Vol. 18, N 1. Pp. 74–87.

14. Takahashi T. Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures. UK: London: Taylor and Francis Group, 2014. Pp. 368–379.

References

1. Nauchno-tekhnicheskie dostizheniya i peredovoy opyt v oblasti avtomobil'nykh dorog. Zashchita ot selevykh potokov. Informatsionnyy sbornik [Scientific and technical achievements and best practices in the field of motor

roads. Reference coll. works "Protection against debris flows"]. Ed. by Baymatov Zh. B. Moscow, Rosavtodor Publ., 1992, 50 p.

2. Blagoveshchenskiy V. P. Opyt zashchity ot seley v Kazakhstane [Experience of protection against mudflows in Kazakhstan]. *Inzhenernaya zashchita – Engineering protection*, 2015, no. 11, pp. 37–48.

3. Bobrova D. A. *Inzhenernye meropriyatiya po zashchite lineynykh sooruzheniy ot seley na o. Sakhalin* [Engineering measures for the protection of linear structures from debris flows on the Sakhalin Island]. *Trudy 2-y konf., posvyashch. 100-letiyu S. M. Fleyshmana «Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita»* [Proc. of the 2-nd conf. devoted to the 100-th anniversary of S. M. Fleishman "Debris flows: disasters, risk, forecast, protection"]. Moscow, Geograficheskiy fakul'tet MGU Publ., 2012, pp. 13–14.

4. Kvasov A. I. *Selevye potoki i ikh vozdeystvie na sooruzheniya* [Debris flows and their impact on structures]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1987, 130 p.

5. Matsiy S. I., Mikheeva L. A., Lyubarskiy N. N. *Osobennosti rascheta parametrov selevykh potokov na Chernomorskom poberezh'e Krasnodarskogo kraya* [Features of calculating the mudflows parameters on the Black Sea coast of Krasnodar Region]. *Sergeevskie chteniya. Yubileynaya konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya akademika E. M. Sergeeva. Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* [Proc. of the sci. conf. devoted to the 100-th anniversary of Academician E. M. Sergeev "Sergeyev Readings". Proc. of the Annual session of the RAS Scientific Council on geoecology, engineering geology and hydrogeology]. Moscow, IGEH RAN Publ., 2012, pp. 362–366.

6. Morozov M., Krivtsov A. *Seli i selezashchita* [Debris and anti-debris protection measures]. *Inzhenernaya zashchita – Engineering protection*, 2014, no.3, pp. 50–59.

7. Natiashvili O. G., Tevzadze V. I. *Opreделение maksimal'noy vysoty prepyatstviya, preodolevaemoy selevym potokom* [Determination of the maximum height of the obstacle overcome by the debris flow]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo – Hydraulic engineering*, 2008, no. 8, pp. 23–25.

8. Fleyshman S. I. *Seli* [Debris flows]. 2-nd ed. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 312 p.

9. Kherkheulidze I. I. *Skvozhnye zashchitnye i reguliruyushchie sooruzheniya iz sbornogo zhelezobetona na gornykh rekakh* [Slit dam protection and regulation structures from precast concrete structures to be built at mountain rivers]. Moscow, Gidrometeoizdat Publ., 1967, 131 p.

10. Fiebigier G. *Experiences with the Chain of Functions in debris flow control*. Proc. of the International Conference

“Debris flows: disasters, risk, forecast, protection”. Pyatgorsk, Sevkavgirovodkhoz Institute Publ., 2008, pp. 367–371.

11. Graf C., Haller B., Luis R. *Field observations in barrier systems against debris flows*. Proc. of the International Conference “Debris flows: disasters, risk, forecast, protection”. Pyatgorsk, Sevkavgirovodkhoz Institute Publ., 2008, pp. 339–343.

12. Jakob M., Hungr O. *Debris-flow hazards and related phenomena*. UK, Chichester, Praxis Publ., 2005, pp. 464–476.

13. Lien H. P. Design of slit dams for controlling stony debris flows. *International Journal of Sediment Research*, 2003, vol. 18, no. 1, pp. 74–87.

14. Takahashi T. *Debris flow: mechanics, prediction and countermeasures*. UK, London, Taylor and Francis Group Publ., 2014, pp. 368–379.