

**А.Ю. Виноградов, О.В. Зубова, Е.А. Парфенов**

## **РАСЧЕТ ЭРОЗИОННОГО РАЗМЫВА СВЯЗНОГО ГРУНТА**

*Введение.* Проблема размыва связных грунтов значима при расчетах устойчивости проектируемых трубных, мостовых и гидротехнических сооружений лесохозяйственного комплекса. Обычно считается, что связные грунты достаточно устойчивы к размыву, поскольку главным фактором, определяющим устойчивость связных грунтов, является сцепление.

Касательное напряжение потока пропорционально второй степени скорости [Виноградов и др., 2020] и чаще всего не превышает десятых долей процента от удерживающего напряжения. Тем не менее, размыв имеет место, что требует дополнительных теоретических разработок в данной области [Боровков, Волинов, 2013; Виноградов и др., 2020; Мирцхулава, 1967]. Считается, что размыв связных грунтов происходит путем разрушения связей между отдельными микроагрегатами, что априори сводит на нет любые попытки математически описать физический процесс размыва и тем самым уйти от эмпирических зависимостей.

Попытки количественно описать процесс размыва предпринимались с 30 гг. прошлого века [Санталин, 1939; Бурлай, 1946; Великанов, 1952; Бочков, 1936; Шамов, 1949].

Согласно работе [Маккаев, 2003], процесс отрыва, растворения и смыва, рассматриваемый в пространстве и времени, а также во взаимосвязи с определяющими его факторами, определяет водную эрозию. Он же пишет, что судить об интенсивности эрозионного процесса можно косвенным путем по формам эрозионного рельефа.

Определение интенсивности эрозии предлагалось проводить на основе следующих методов [Маккаев, 2003]:

- посредством подсчета объема удаленного вещества;
- по геоморфологическим признакам;
- по объему транспортируемого материала.

При оценке размываемости конкретного участка русла, первые два метода еще можно использовать с учетом погрешности, сопоставимой с самой значимой величиной.

Она связана с трудностями установления первоначальных отметок участка, подвергшегося размыву, качественной и количественной карти-

ной первоначального вида земной поверхности. Оценка времени размыва обычно определяется с ошибкой в сотни процентов.

Третий метод дает интегральное представление о размыве всего русла, чаще всего не имеющее ничего общего с эрозией конкретного участка.

*Материалы и методы.* В результате, для расчетов размыва в связных грунтах используются только эмпирические зависимости (орфография подлинников сохранена):

1. СП 32-102-95<sup>1</sup>. К связным (п.5.3.1 СП) относятся глинистые, суглинистые и супесчаные грунты с числом пластичности  $W_n > 1, \%$ <sup>2</sup>. При расчете местных размывов к связным также относятся:

а) глинистые, суглинистые, супесчаные и песчаные грунты при заторфованности (содержании растительных остатков) более 10%;

б) пылеватые пески, содержащие более 20% по массе пылеватых частиц (мельче 0,10 мм).

Наибольшую глубину местного размыва при наличии в русле препятствия, шириной  $b$ , в связном грунте  $h$ , м, предлагается определять по формуле

$$h = 0,77H^{0,4} \left( \frac{V_0}{V_B} \right)^{1/2} \left( \frac{\epsilon_A V - V_H}{V_0 - V_H} \right)^{3/4} F(b),$$

$$V_H = V_0 \left( \frac{d}{b} \right)^{1/8} \mu,$$

$$\mu = \frac{0,95 + 0,5H/b}{0,4 + H/b}; \quad d = 3z = 3(0,35 + 0,6 c_p 10^{-4}); \quad V_B = (gWH)^{1/3},$$

где  $V_0$ ,  $V_B$  – размывающая и взмучивающая скорости потока для грунта, м/с;  $V$  – скорость потока, м/с;  $V_H$  – начальная скорость – минимальная скорость набегающего потока, при которой частицы грунта приходят в движение, м/с;  $c_p$  – расчетное сцепление, Па;  $b$  – расчетная ширина препятствия (опоры), возле которого происходит размыв в русле, м;  $d$  – средний диаметр частиц грунта, м;  $H$  – глубина размывающего потока, м;  $\epsilon_A$  – коэффициент абразивности (равен 1 при отсутствии наносов и 1,16 при поступлении в воронку размыва наносов);  $z$  – толщина отрывающихся отдельностей, мм;  $w$  – гидравлическая крупность размываемого грунта, м/с;  $g$  – ускорение свобод-

<sup>1</sup> СП-32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов.

<sup>2</sup> ГОСТ 25100-2011, п.А.31 приложения А. Грунты. Классификация.

ного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $F(b)$  – параметр, учитывающий геометрию препятствия  $F(b) = \sum_{i=1}^n b_i^{0,6} M_i K_i f_i$ , где  $b_i$  – ширина поперечного сечения  $i$ -го

из  $n$  имеющихся выше отметки дна после общего размыва элементов препятствия с постоянной шириной,  $m$ ;  $M_i, K_i$  – коэффициенты формы и косины  $i$ -го элемента препятствия,  $f_i$  – весовой коэффициент, приходящийся на  $i$ -й элемент препятствия, определяемые по соответствующим эмпирическим формулам и таблицам (п.п.5.1.8-5.1.10 СП).

2. Пособие [Волченков, 1992], расчет размыва отводящих русел.

$$h = r \delta_M \Psi D_3 \left( \frac{Q}{Q_K} \right)^S \left( \frac{D_3^3}{(L/D_3 + 1)^{51} b b_p d} \right)^{0,2}$$

$r, S, SI$  – коэффициент и показатели степени, зависящие от типа русла и его крепления; масштабный коэффициент  $\delta_M = 0,85 \left( \frac{D_0}{D_3} \right)^{0,075}$   $D_0 = 1 \text{ м}$ ,

$D_3 = 1,13 \sqrt{\omega_{COOP}}$  – эквивалентный диаметр, равновеликий по площади поперечному сечению русла, отверстию водопропускного сооружения в размываемом месте,  $\omega_{COOP}$ ,  $\text{м}^2$ ;  $\Psi$  – коэффициент, учитывающий тип концевой части выходных русел, при наличии предохранительного откоса  $\Psi = 1$ , при его отсутствии или наличии вертикальной стенки  $\Psi = 0,6$ , для выходных русел с ребром  $\Psi = 1$  независимо от наличия стенки (тип выходного русла указан в соответствующих таблицах Пособия...);  $Q$  – максимальный расход расчетного паводка,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_K = 0,51 \sqrt{g} D_3^{5/2}$  – эталонный расход;  $L$  – длина крепления русла,  $m$ ;  $d$  – расчетный диаметр частиц связного грунта  $d = 7,5 (0,1 + 100 c_p)$ . Здесь  $c_p$  – расчетное сцепление, МПа;  $b$  – отверстие сооружения,  $m$ ;  $b_p$  – ширина сечения,  $m$ .

3. Методика ГрузНИИГиМ [Мирицхулава, 1967]. Для неразмывающих скоростей им предложены зависимости:

$$V_{\text{донная}} = 1,25 \sqrt{\frac{2mg}{2,6\rho \cdot n} [(\rho_e - \rho)d + 1,25kC_{\text{ун}}^n]};$$

$$V_{\text{средняя}} = 1g \left( \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2gm}{2,6\rho \cdot n} [(\rho_r - \rho)d + 1,25kC_{\text{ун}}^n]},$$

где  $C_{\text{ун}}^n$  – нормативная усталостная прочность на разрыв связного грунта при динамической нагрузке потока;  $m$  – эмпирический коэффициент, ха-

рактирующей условия течения;  $n$  – коэффициент перегрузки, зависящий от интенсивности турбулентности  $n = \left( \frac{V_{\max}}{V_{\text{донная}}} \right)^2$ ;  $k$  – коэффициент однородности грунта. Глубина размыва оценивается по зависимостям  $h = \alpha H \left( \frac{V_c}{V_d} \right)^\beta$ , или  $h = \alpha \left( \frac{Q}{BV_d} \right)^\beta$ , где  $B$  – ширина участка размыва, м;  $Q$  – расход воды на участке, м<sup>3</sup>/с;  $\alpha$  и  $\beta$  – численные эмпирические коэффициенты.

Оценка величин параметров, входящих в приведенные выше зависимости, указывает, что погрешности их определения составляют подчас десятки и сотни процентов от измеряемой величины. Любая эмпирическая зависимость всегда получена авторами исследований для конкретного объекта. Попытка перенести подобную зависимость на другие объекты приводит к ее загроможденности различными параметрами и коэффициентами, не имеющими физического смысла.

Для глинистых грунтов с уменьшением размера частиц растет их удельная поверхность и сила сцепления между ними.

Опыты Фортгера и Скобея показали, что для отрыва со дна частицы размером 0,001 мм необходима скорость течения порядка 1,3 м/с – такая же, как для отрыва камешка диаметром 0,015 м [Маккавеев, 2003].

При скоростях течения ниже некоторой условной неразмывающей скорости размыв становится весьма медленным, недоступным для инструментального определения, но не прекращается полностью. В частности, илы и глины даже при скоростях течения менее 0,01 м/с все же размываются, постепенно разжижаясь и переходя в суспензии или коллоидные растворы. Так, при опытных работах на Тихвинском стационаре Центрального научно-исследовательского института водного транспорта в 1935-1937 гг. установлено, что облицовка лотка, сделанная из слоя плотно трамбованной глины, была смыта на 8-12 мм в течение 85 дней, хотя скорость течения в этом лотке не превышала 0,01 м/с. Следовательно, даже плотная трамбовка не является достаточным условием для прекращения размыва связного грунта [Маккавеев, 2003].

Опыты показывают, что размыв в связных грунтах происходит вследствие раскрытия макропор между отдельными агрегатами под воздействием воды. Такое раскрытие приводит к уменьшению связей между соседними агрегатами и выносу последних в поток.

Цель исследования – разработать универсальную методику расчета размывов в русле реки с учетом физики процесса.

*Результаты и обсуждение.* Предположим, что скорость размыва прямо пропорциональна энергии струи потока и обратно пропорциональна удерживающему напряжению размываемого грунта тела плотины, площади размываемого участка и времени, затрачиваемого на размыв.

В результате получена следующая зависимость:

$$\frac{dh}{dt} = k \frac{E}{\tau_{уд} S \cdot t}, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина размываемого слоя за расчетный шаг времени, м;  $t$  – время, с;  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от наличия в размываемых грунтах камней и растительности;  $E$  – энергия струи потока,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$ ;  $\tau_{уд}$  – удерживающее напряжение,  $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}^2$ :

$$\tau_{уд} = \rho_r (1 - \varepsilon) g h \cdot \cos \alpha \cdot \text{tg } \varphi + c,$$

$\alpha$  – уклон размываемого участка, доли единицы;  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, град;  $c$  – сцепление грунта,  $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}^2$ ;  $B$  – ширина размыва, м;  $S$  – площадь размываемого участка, длиной  $L$ , м,  $\rho_r$  – плотность размываемого грунта,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\varepsilon$  – пористость грунта, доли единицы.

Энергию потока за время  $t$  на выделенном участке между сечениями 1-1 и 2-2 можно определить как разность энергии потока в этих сечениях на основании уравнения Бернулли:

$$E = \rho g W \left( Z_1 - Z_2 + \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} + \frac{a_1 V_1}{2g} - \frac{a_2 V_2}{2g} \right).$$

Учитывая, что в естественных условиях разность кинетической энер-

гии в сечениях 1-1 и 2-2  $\left( \frac{a_1 V_1}{2g} - \frac{a_2 V_2}{2g} \right) \rightarrow 0$ , для открытых водотоков ( $P_1 = P_2$ ) энергию и мощность водотока можно определить по формулам:  $E = gW(Z_1 - Z_2)$ ;  $E = Nt$ ;  $N = qQ(Z_1 - Z_2)$ , где  $Q$  – средний расход реки на выделенном участке,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $N$  – средняя мощность водотока за время  $t$  на выделенном участке, кВт;  $E$  – энергия водотока на выделенном участке, Дж;  $W$  – объем стока воды,  $\text{м}^3$ ;  $Z_1$  и  $Z_2$  – геометрическая высота над плоскостью сравнения в сечениях 1-1 и 2-2, м;  $P_1$  и  $P_2$  – давление в сечениях 1-1 и 2-2, Па;  $V_1$  и  $V_2$  – средняя скорость воды в сечениях 1-1 и 2-2, м/с;  $a_1$ ,  $a_2$  – коэффициент кинетической энергии в сечениях 1 и 2 (Кориолиса).

Проинтегрируем зависимость (1):

$$\int \frac{dh(\rho(1-\varepsilon)gh \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + c)}{kgVi} = \int \frac{dt}{t},$$

$$\frac{1}{kgVi} \left( \rho(1-\varepsilon)g \frac{h^2}{2} \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + ch \right) = \ln|t| + C.$$

Граничные условия:  $V = 0, h = 0 \rightarrow C = 0$ .

Полученное квадратное уравнение

$$\frac{h^2}{2} \rho_r (1-\varepsilon) g \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + ch - gVi \ln t = 0$$

имеет один положительный корень:

$$h = \frac{-c + \sqrt{c^2 + 2\rho_r(1-\varepsilon)\ln t \cdot g \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi \cdot kgVi}}{\rho_r(1-\varepsilon)g \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi}.$$

Полученная формула выражает зависимость величины размыва от плотности и пористости грунта, его прочностных характеристик, скорости потока и времени воздействия потока на грунт. Единственный эмпирический коэффициент  $k$  в первом приближении принят равным единице.

*Выводы.*

1. В настоящее время при проектировании водопропускных и водоотводных сооружений не учитывается размокаемость связных грунтов, что приводит к значительным ошибкам в определении скорости и времени размыва.
2. В существующих методах не рассматривается гидрофильность глинистых частиц, которая приводит к их разбуханию и уменьшению сцепления между агрегатами грунта.
3. Предлагаемая методика расчета глубины размыва учитывает показатели, влияющие на касательное напряжение в глинистом грунте, такие как сцепление, угол внутреннего трения, плотность и пористость грунта.
4. Для подтверждения достоверности методики расчета средней глубины размыва необходимо проведение ряда экспериментальных исследований как в лабораторных, так и в полевых условиях.

#### Библиографический список

Виноградов А.Ю., Обязов В.А., Виноградова Т.А., Кадацкая М.М. Неразмывающие скорости потока для несвязных грунтов // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. № 2(1). С. 82–89. doi.org/10.34753/HS.2020.2.1.82.

Боровков В.С., Волинов М.А. Размыв речного русла в грунтах, обладающих сцеплением // Вестник МГСУ. 2013. Т. 8. № 4. С. 143–149. DOI:10.22227/1997-0935.2013.4.143-149

Мирицхулава Ц.Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости. М.: Колос, 1967. 179 с.

Санталин К. Размываемость грунтов в зависимости от их физических свойств // Метеорология и гидрология. 1939. № 6.

Бурлай И.Ф. О начальной скорости донного влечения // Метеорология и гидрология. 1946. № 6.

Бочков Н.М. Механическая суффозия грунта. НКТП СССР. Главстройпром. ВНИИ водоснабжения, канализации, гидротехнических сооружений и инж. гидрогеологии ВОДГЕО. М., 1936. 45 с.

Шамов Г.И. Сток взвешенных наносов рек СССР // Труды ГГИ. 1949. Вып. 20 (74).

Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне. М.: Географический факультет МГУ. 2003. 355 с.

Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений / под ред. Г.Я. Волченкова. М.: Транспорт, 1992. 408 с.

Великанов М.А. За физически обоснованную теорию движения взвешенных наносов // Изв. АН СССР, ОТН. 1952. № 12.

## References

Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Vinogradova T.A., Kadatskaya M.M. Non-blurring flow rates for cohesive soils. *Hydrosphere. Dangerous processes and phenomena*, 2020, no. 2 (1), pp 82–89. doi.org/10.34753/HS.2020.2.1.82. (In Russ.)

Borovkov V.S., Volynov M.A. Erosion of the river channel in soils with adhesion. *Vestnik MGSU*, 2013, vol. 8, no. 4, pp. 143–149. DOI: 10.22227 / 1997-0935.2013.4.143-149. (In Russ.)

Mirtskhulava Ts.E. Erosion of channels and methods for assessing their stability. М.: Kolos, 1967. 179 p. (In Russ.)

Santalin K. Washability of soils depending on their physical properties. *Meteorology and Hydrology*, 1939, no. 6. (In Russ.)

Burlai I.F. On the initial speed of bottom attraction. *Meteorology and Hydrology*, 1946, no. 6. (In Russ.)

Bochkov N.M. Mechanical suffusion of soil. НКТП USSR. Glavstroyprom. VNIИ of water supply, sewerage, hydraulic structures and engineer. hydrogeology VODGEO. М., 1936, 45 p. (In Russ.)

Shamov G.I. Suspended sediment runoff from rivers of the USSR, *Proceedings of GGI*, 1949, vol. 20 (74). (In Russ.)

Makkaveev N.I. River bed and erosion in its basin. М.: Faculty of Geography, Moscow State University. 2003. 355 p. (In Russ.)

Manual for hydraulic calculations of small culverts. Ed. G.Ya. Volchenkova. M.: Transport. 1992. 408 p. (In Russ.)

*Velikanov M.A.* For a physically substantiated theory of suspended sediment movement. *Izv. USSR Academy of Sciences, OTN*, 1952, no. 12. (In Russ.)

*Материал поступил в редакцию 09.04.2021*

---

**Виноградов А.Ю., Зубова О.В., Парфенов Е.А.** Расчет эрозионного размыва связного грунта // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 187–195. DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.187-195*

Проведен анализ существующих способов оценки размыва грунтов в гидротехнических и водопропускных сооружениях, показывающий, что определение глубины и скорости размыва проводится без учета физических свойств связных грунтов. Таким образом, данные параметры оцениваются по эмпирическим зависимостям и с существенными погрешностями. Опытные данные по размыву связных грунтов доказывают, что большая удельная поверхность и гидрофильность глинистых частиц приводят к разуплотнению и выносу микроагрегатов грунта в поток. Предложена математическая модель расчета глубины размыва связных грунтов в зависимости от касательного напряжения в грунте. Учет показателей сцепления и угла внутреннего трения в данной модели позволит избежать погрешностей в расчетах.

**Ключевые слова:** водная эрозия, размыв грунта, связные грунты, прочностные характеристики грунтов.

**Vinogradov A.Yu., Zubova O.V., Parfenov E.A.** Calculation of erosion scour of cohesive soil. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2021, is. 235, pp. 187–195 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2021.235.187-195

The analysis of existing methods for assessing soil erosion in hydraulic engineering and culverts, showing that the determination of the depth and rate of erosion is carried out without taking into account the physical properties of cohesive soils. Thus, these parameters are estimated using empirical relationships and with significant errors. Experimental data on erosion of cohesive soils prove that the large specific surface area and hydrophilicity of clay particles lead to decompaction and the removal of soil microaggregates into the flow. A mathematical model is proposed for calculating the depth of erosion of cohesive soils depending on the shear stress in the soil. Taking into account the adhesion indicators and the angle of internal friction in this model will avoid errors in the calculations.

**Key words:** water erosion, soil erosion, cohesive soils, strength characteristics of soils.



**ВИНОГРАДОВ Алексей Юрьевич** – директор ООО НПО «Гидротехпроект», доктор технических наук. WoS ResearcherID: D-3751-2016. ORCID: 0000-0001-8838-8676,

199155, а/я 136, 14-я линия В.О., д. 97, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: gd@npogtp.ru

**VINOGRADOV Alexey Yu.** – DSc (Technical), Director of the NPO «Gidrotekhproekt», WoS ResearcherID: D3751-2016. ORCID: 0000-0001-8838-8676.

199155. PO Box 136. 14th line V.O. 97. St. Petersburg. Russia. E-mail: gd@npogtp.ru

**ЗУБОВА Оксана Викторовна** – доцент кафедры промышленного транспорта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. WoS ResearcherID: AAE-4427-2020. ScopusAuthorID: 57217966252. ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ok\_z19@mail.ru

**ZUBOVA Oksana V.** – PhD (Technical), Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. WoS ResearcherID: AAE-4427-2020. ScopusAuthorID: 57217966252. ORCID: 0000-0002-6263-4688.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ok\_z19@mail.ru

**ПАРФЕНОВ Евгений Александрович** – Инженер ООО НПО «Гидротехпроект», ORCID: 0000-0003-1365-6183.

199155, а/я 136, 14-я линия В.О., д. 97, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ep@npogtp.ru

**PARFENOV Evgeny A.** – Engineer of NPO Gidrotekhproekt, ORCID: 0000-0003-1365-6183.

199155. PO Box 136. 14th line V.O. 97. St. Petersburg. Russia. E-mail: ep@npogtp.ru