

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ЭРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ

С.В.Сольский<sup>1</sup>, Д.П. Самофалов<sup>2</sup>, А.Н.Ефремова<sup>3</sup>, Е.В. Булганин<sup>4</sup>

В 2010 – 2013 гг. сотрудниками ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» выполнены полевые обследования состояния откосов ряда глубоких котлованов, которые по условиям строительства должны сохранять свою геометрию в течение продолжительного времени [1]. Разрушение откосов котлованов из-за водной эрозии (процесс размыва горных пород текущей водой [2]) может происходить, в частности, в результате образования на откосах ручейкового поверхностно стока за счет выпадения непосредственно на откос атмосферных осадков или таяния снега.

Такого рода водная эрозия откосов наблюдается на слабоводопроницаемых грунтах, интенсивность инфильтрации воды на поверхности которых ниже интенсивности выпадения осадков. Отмечено, что чем больше высота откосов, тем значительнее их эрозия за счет выпадения осадков. Эрозионные борозды, образованные от выпавших непосредственно на откос осадков, как правило, равномерно покрывают откос, расстояние между ними колеблется в пределах от 1,5 до 2,5 м. Обычно на откосах протяженностью более 3 – 4 м эрозия в виде борозд за счет стока от выпадения осадков начинает проследиваться на 1 – 2 м ниже бровки откоса.

Интенсивность процесса эрозии зависит в первую очередь от физико-механических характеристик грунтов, климатических условий и параметров откосов (заложения и высоты). Вопросам эрозионной устойчивости откосов строительных котлованов до настоящего времени не уделялось должного внимания. Проблемы, связанные с водной эрозией, детально рассматриваются в случаях, когда в результате строительства ожидается влияние эрозии на процессы формирования рельефа, на руслообразующие факторы, на вынос наносов речным стоком и т.д. Обычно делается оценка влияния размыва грунтов на устойчивость и сохранность сооружения, а также формирование твердого стока. Изучению процессов, связанных с вышеперечисленными проблемами, посвящено большое количество научных работ. В настоящее

---

<sup>1</sup> Доктор техн. наук  
Тел. (812) 493-93-47, E-mail: solskiysv@vniig.ru

<sup>2</sup> Канд. техн. наук  
Тел. (812) 493-93-47

<sup>3</sup> Инженер  
Тел. (812) 493-93-49 E-mail: arefievaan@vniig.ru  
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21

<sup>4</sup> Инженер  
Тел. (812) 458-56-62 E-mail: EBulganin@proektvodstroj.ru  
ООО «НПК Проектводстрой», 195220, Санкт-Петербург, пр. Непокоренных, 47А

время детально изучены эрозионные процессы, связанные с прогнозами русловых деформаций, с механизмом размыва русел, транспортом наносов и процессом их отложения. Весь перечисленный комплекс вопросов относится к теории динамики русловых потоков [3 – 4], описывающей практические рекомендации для прогнозирования эрозионных процессов на реках, озерах, водохранилищах и морях. Широко применяются аналитические расчеты при обосновании устойчивости русел и каналов [5, 6]. Для расчетов в качестве исходных данных необходимо знать гидравлические параметры русла, расходы воды и геотехнические характеристики грунтов русла. Расчетными критериями устойчивости русел являются так называемые неразмывающие скорости (за допускаемую неразмывающую скорость потока при расчете каналов принимается наибольшее значение средней скорости течения воды, при котором поток не может вызвать недопустимого для нормальной эксплуатации сооружения размыва русла [6]). Если скорости воды в потоке меньше допустимых неразмывающих, считается что водной эрозии от действия потока не ожидается.

Неразмывающие скорости обычно приводятся в нормативной или справочной литературе в таблицах. Существующие расчетные таблицы допустимых неразмывающих скоростей в настоящее время разработаны для русел, поток в которых имеет глубину от 0,5 до 5,0 м. Совершенно ясно, что процесс эрозии откосов при воздействии ручейкового стока значительно отличается от изученных русловых потоков. Глубина ручейков по эрозионным врезам, как правило, всего несколько сантиметров (не более 10 – 15 см). Формально по существующим формулам можно произвести расчет неразмывающих скоростей для малых глубин потока, но остается открытым вопрос надежности и достоверности расчетных скоростей.

Для расчетов допустимых неразмывающих скоростей обычно используются наиболее общеизвестные формулы Ц.Е. Мирцхулавы [6]:

для расчета неразмывающей скорости для однородных по крупности несвязных грунтов

$$v_{н.доп.} = \left( \lg \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2m_y}{0,44\rho_0 n'} [g(\rho_r - \rho_0)d + 2C_{yh}^H K]}, \quad (1)$$

где  $H$  – глубина потока, м;  $\rho_r, \rho_0$  – плотность соответственно частиц грунта и воды, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – средний диаметр частиц грунта, м;  $C_{yh}^H$  – усталостная прочность на разрыв несвязного грунта, Па;  $m_y$  – коэффициент условий работы, учитывающий влияние наносов в коллоидном состоянии на размывающую способность наносов, при содержании в потоке глинистых частиц менее 0,1 кг/м<sup>3</sup>;  $n'$  – коэффициент перегрузки, учитывающий влияние пульсации скоростей;  $K$  – коэффициент, характеризующий вероятность отклонения сил сцепления от среднего значения;

для расчета неразмывающей скорости для неоднородных по крупности несвязных грунтов

$$v_{н.доп.} = \left( \lg \frac{8,8H}{d_{95}} \right) \sqrt{\frac{2m_y}{0,44\rho_0 n'} [g(\rho_r - \rho_0)D_{отм} + 2C_{yh}^H K]}, \quad (2)$$

где  $D_{отм}$  – средний диаметр частиц отмытой;

для расчета размывающей скорости для *связных грунтов* (глины суглинки, супеси с числом пластичности  $I_p \geq 0,01$ )

$$v_{н.доп.} = \left( \lg \frac{8,8H}{d} \right) \sqrt{\frac{2m_y}{2,6\rho_0 n'} [g(\rho_r - \rho_0)d + 1,25C_y^u K]} . \quad (3)$$

Принцип определения параметров, входящих в формулы (1) – (3), изложены в [10].

Очевидно, что имеющиеся эмпирические характеристики, полученные для довольно больших постоянных потоков, без должной апробации, не корректно применять для расчетов водной эрозии откосов. Необходимо провести проверку точности расчетов по формулам с использованием экспериментальных определений влияния скоростей потока на интенсивность размыва. Научно-исследовательских работ по полевому или лабораторному определению характера эрозии откосов котлованов от скорости стекания дождевых вод при анализе литературы, посвященной водной эрозии, не найдено. Есть рекомендации по определению устойчивости почв сельскохозяйственных угодий, а так же рекомендации по оценке водной эрозии грунтов обратной засыпки на линейной части трубопроводов. К сожалению, использование этих рекомендаций по оценке устойчивости грунтов к размыву в связи с водной эрозией сельскохозяйственных земель [7], а так же рекомендаций по определению водной эрозии грунтов на линейной части трубопроводов [8] нельзя использовать для оценки размыва откосов из-за несоответствия гидрографических и геотехнических характеристик грунтов на естественных ландшафтах и элементах искусственно устроенных откосов.

При расчетах водной эрозии, прежде всего, необходимо оценить возможность размыва ручейковым стоком грунтов откоса. То есть необходимо рассчитать скорости ручейкового стока и сравнить их с допустимыми размывающими скоростями для рассматриваемых грунтов, полученных для постоянных потоков. В связи с этим важной задачей на начальной стадии исследований являлось получение размывающих скоростей потока на моделях.

Для проведения опытов в лабораторных условиях было необходимо смоделировать фрагмент дневной поверхности откоса, габариты которого позволяли бы смоделировать струйное сосредоточенное движение воды по его поверхности, имитирующее потоки, наблюдаемые на откосах при выпадении дождя. Для этой цели был изготовлен лоток в виде желоба длиной 1900 мм из пластмассовой трубы диаметром 100 мм. В трубе был выполнен вырез таким образом, чтобы в полученный желоб можно было поместить образец грунта, пригодный для моделирования движения воды по грунтовой поверхности (рис.1).

В качестве фрагмента грунта ненарушенной структуры использовались керны, отобранные из разведочных геологических скважин при бурении непосредственно на площадях, отведенных под котлованы. Керны, представляющие собой монолиты ненарушенной структуры в виде цилиндров, разрезались по диаметру, то есть из каждого керна получалось 2 образца ненарушенной структуры (полуцилиндры) с гладкой плоской поверхностью (рис. 2). Такие образцы оказались пригодными для моделиро-

вания фрагмента откоса ненарушенной структуры, как наиболее точно отражающие натурные условия.

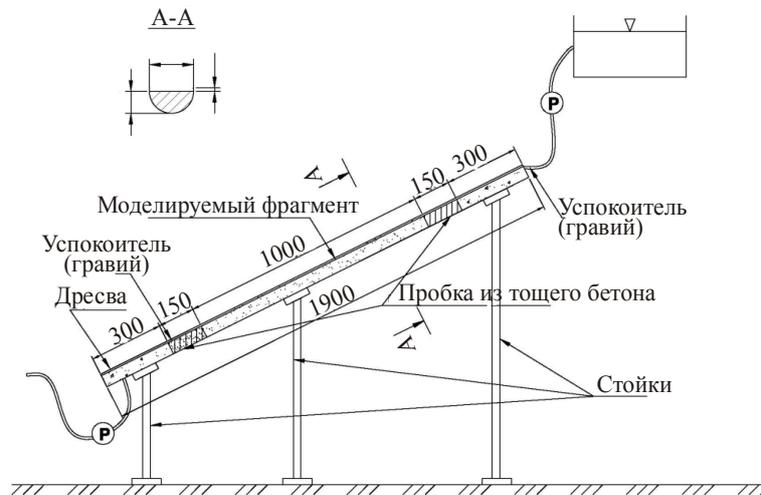


Рис. 1. Схема лотка для определения эрозионной устойчивости грунтов на образцах ненарушенной структуры



Рис. 2 Вид разрезанного керна

Для моделирования откоса полученные образцы плотно укладывались в лоток, выполненный в виде желоба, и создавался модельный фрагмент откоса протяженностью 0,6–0,8 м, площадью около 0,2 м<sup>2</sup>. Лоток устанавливался наклонно, и таким образом моделировался требуемый коэффициент заложения откоса. В лотке сверху над полученным модельным фрагментом откоса устанавливалась водоподающая трубка, оборудованная счетчиком расхода воды, и успокоитель, через который на модельный фрагмент откоса подавалась вода. В нижней части лотка устроен водоприемник с водовыпуском. Вода стекала в виде струйки с параметрами, кото-

рые определялись уклоном лотка, расходом воды и характером поверхности, по которой происходило ее стекание.

Во время опытов расходы определялись по счетчику, который устанавливался выше створа, в котором осуществлялась подача воды, а так же проводились определения объемным способом на выходе из лотка. Скорость движения воды определялась путем замера скорости движения пятна окрашенной воды между двумя сворами, с расстояниями между ними 0,5 м. Краситель в поток вводился выше пробки, измерения проводились пятикратно, при расчетах были взяты среднеарифметические величины. В процессе проведения опытов фиксировались параметры эрозионных борозд.

Эксперименты проводились при различных заложениях откоса и различных расходах потока (то есть моделировалась различная интенсивность водообразования и стока в результате атмосферных осадков, выпадающих на откос). В результате моделирования определялся характер эрозии (интенсивность размыва, количество каверн на единицу площади откоса; глубина, ширина каверн; динамика раскрытия каверн), расходы и скорости потока при различных заложениях откосов.

Точность измерения скорости потока в лотке составила около 10–15%. За размывающую скорость принимается скорость, при которой визуально отличим переход от единичного отрыва частиц грунта к процессу непрерывного отрыва отдельных частиц, что приводит к заметному усилению процесса размыва.

Кроме определения размывающих скоростей на откосах, интерес представляют вопросы, связанные с гидравликой стока по откосу: динамикой расходов воды и скоростей стекающих потоков, а также проверок эффективности различных мероприятий по защите откосов от размыва. Для указанных целей был сконструирован лоток больших габаритов.

Лоток имеет прямоугольное сечение и длину 2500 мм, с внутренними размерами сечения 350x250 мм. Испытания проводились при заданных уклонах лотка – 1:1,5; 1:2,0; 1:2,5. Испытуемый грунт засыпался в лоток на высоту 150 мм, утрамбовывался до плотности, соответствующей естественной (постепенное послойное заполнение с трамбовкой во влажном состоянии). В начале и в конце лотка испытуемый грунт замещается участками щебня длиной 300 мм, которые служат успокоителями потока. Схема лабораторной установки представлена на рис. 3.

Продолжительность опыта в лотке зависела от динамики изменения состояния образцов. В ходе опытов измерялся расход воды двумя способами – по водомеру (**P**) и объемным способом на водоотводящей трубке, рассчитывалась скорость и производилась фотофиксация состояния грунта. Моделирование дождевых осадков в лотке осуществлялось с помощью дождевальной установки, расположенной над лотком и имеющей три створа водоподачи.

Таким образом, моделировался природный процесс нарастания расхода по длине откоса за счет бокового притока воды. Расходы воды, поступающие в каждый створ (см.рис. 3), определялись объемным способом как среднее из трех замеров. Кроме того, по счетчику определялся суммарный расход воды, а объемным способом – из водоотводящей трубки. Скорость течения определялась по скорости течения подкрашенной воды. Краситель запускался сразу же за успокоителем, время перемещения окрашенной воды фиксировалось в трех створах, перед створами водоподачи.

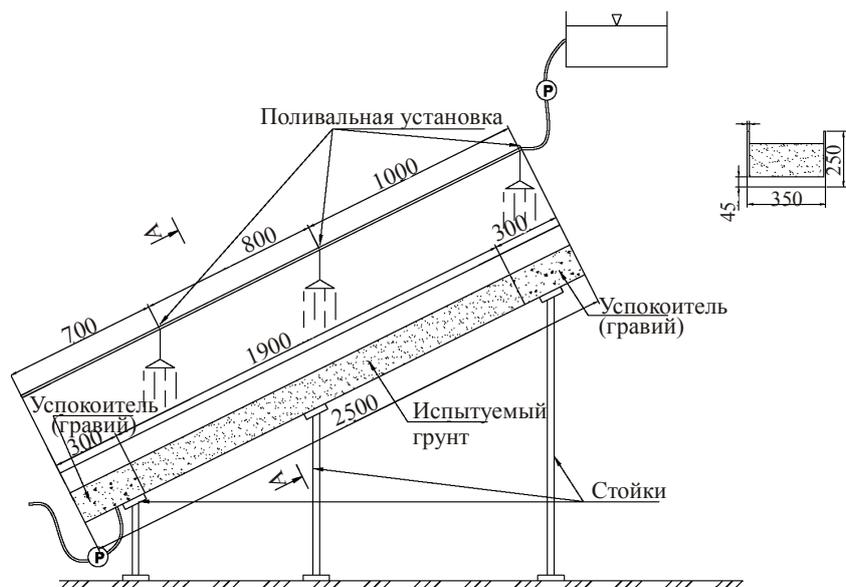


Рис.3. Схема лотка для оценки воздействия пригрузок на водно-эрозионные характеристики откоса

Кроме определения гидравлических характеристик потока по откосу, лоток использовался для оценки эффективности влияния на процесс водной эрозии откоса пригрузок из гравия, щебня и гальки различной крупности. Для этих опытов поверх уплотненного грунта, имитирующего откос, укладывался слой пригрузки мощностью около 10 см. Методика производства опытов с пригрузкой практически не отличается от вышеизложенной. Наблюдение за продвижением красителя осуществлялось посредством небольших лунок, оборудованных в толще пригрузки.

На основании выполненных в лотках опытов по оценке развития водно-эрозионных процессов на откосе удалось обосновать ряд гидравлических критериев, необходимых для оценки возможности размыва откоса ручейковым стоком.

Для определения расчетных скоростей были использованы результаты наблюдений за характеристиками стока по лотку, в зависимости от расходов и коэффициентов заложения откоса. На рис. 4–5 представлены зависимости, отражающие связь расхода воды со скоростью ее движения по эрозионной борозде как в условиях отсутствия каких-либо мероприятий по повышению эрозионной устойчивости грунтов откоса, так и при защите поверхности откоса пригрузкой из мелкого гравия и крупной гальки.

Вероятностно-статистическая обработка данных лабораторных исследований в соответствии с рекомендациями [9] дала возможность получить аналитические зависимости скоростей ручейкового стока по эрозионным бороздам от расходов воды:

для непригруженного откоса

$$v = 4,75 I^{0,5} Q^{0,53}, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость движения воды, см/с;  $I$  – уклон откоса, в долях единицы;  $Q$  – расход, см<sup>3</sup>/с;

для откоса, пригруженного гравием крупностью 5 – 10 мм,

$$v = 3,95 I^{0,5} Q^{0,29} ; \quad (5)$$

для откоса, пригруженного галькой крупностью 20 – 30 мм,

$$v = 3,85 I^{0,5} Q^{0,32} . \quad (6)$$

Как следует из графиков (см.рис. 4, 5), пригрузка откосов резко снижает скорость движения воды и, следовательно, пригрузка откоса может использоваться как мероприятие, направленное на снижение водной эрозии. По результатам расчета по формулам (1) – (3) для рассматриваемых нами грунтов получена допустимая неразмывающая скорость для супеси, для легкого и тяжелого суглинков, соответственно, 25, 50, 110 см/с. Полученные размывающие скорости по формулам примерно в 2 раза выше полученных экспериментально.

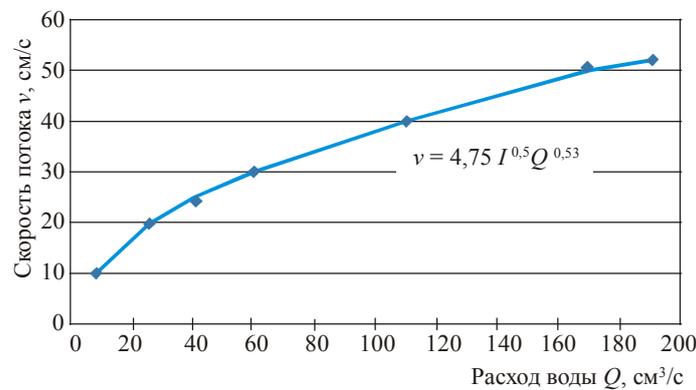


Рис. 4. График связи расхода воды  $Q$  при стоке по эрозионной борозде со скоростью потока  $v$  (при коэффициенте заложения откоса 2) для непригруженного откоса

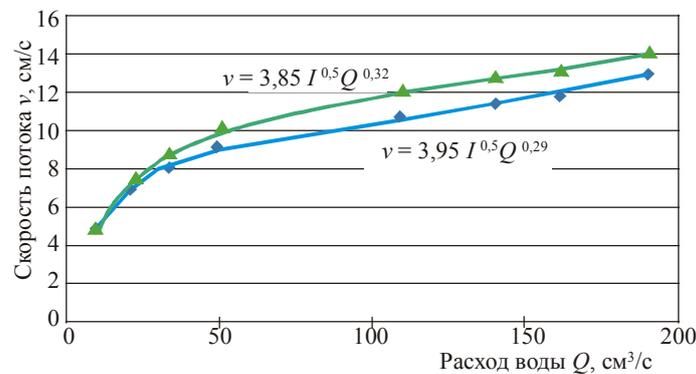


Рис. 5. График связи расходов воды  $Q$  при стоке по эрозионной борозде со скоростью потока  $v$  (при коэффициенте заложения откоса 2) для пригруженного откоса:  
 ◆ — пригрузка гравием крупностью 5 – 10 мм; ▲ — пригрузка галькой крупностью 10 – 20 мм

Как считает М.А. Великанов [3], неразмывающая скорость примерно в 1,4 ниже размывающей. Полученные опытным путем неразмывающие скорости на ручейковой сет откоса в 2,8 раза меньше неразмывающих скоростей, рассчитанных по формуле Ц.Е. Мирцхулавы. На основе получен-

ных нами результатов предлагается в первом приближении на откосах рассчитывать допустимую неразмывающую скорость по формулам Мирцхулавы, вводя коэффициент 0,36.

Значительное расхождение расходов, полученных в лабораторных условиях, от расчетных, по-видимому, объясняется различными условиями стока по откосу и по водотоку. Ц.Е.Мирцхулава, как и другие известные исследователи, моделировал условия размыва дна естественных водотоков и каналов. Уклон дна этих объектов на два-три порядка меньше уклонов тех откосов, которые моделировались нами. Очевидно, при больших уклонах предельные неразмывающие скорости существенно уменьшаются.

### Выводы

1. Выполнен комплекс лабораторных исследований по изучению водной эрозии откосов. Были сконструированы и изготовлены лотки, позволяющие получать экспериментальным путем размывающие скорости для различных грунтов, в том числе ненарушенного сложения, изучать элементы гидравлического потока дождевых вод по откосу, а так же проводить оценку эффективности различных мероприятий по защите откосов от водной эрозии.

2. Допустимые размывающие скорости для грунтов, полученные в результате экспериментов в лотках, оказались значительно ниже рекомендованных в нормативных документах и справочниках, а так же полученных по формулам Мирцхулавы Ц.Е., что можно объяснить несоответствиями характера стока в руслах и на откосах. Рекомендуется в первом приближении рассчитывать неразмывающие скорости дождевого ручейкового стока на откосах по формулам (1) – (3) с вводом понижающего коэффициента, равного 0,36.

3. Наиболее эффективным мероприятием по защите откосов от водной эрозии является пригрузка поверхности откосов щебнем, гравием или другими сыпучими инертными материалами с диаметром фракций от 5 до 40 мм. В соответствии с лабораторными исследованиями, пригрузка указанным материалом слоем 100 мм позволяет снизить скорость движения дождевых вод по откосу в 3 – 4 раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Проблемы** проектирования и эксплуатации откосов глубоких котлованов / С.В.Сольский, Д.П.Самофалов, А.Н.Арефьева, Е.В.Булганин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2014. Т. 271. С.44-53.
2. **Словарь-справочник** гидротехника-мелиоратора. М.: Сельхозгиз. 1955.
3. **Великанов. М.А.** Динамика русловых потоков. Т. 2: Наносы и русло. М.: Гостехиздат. 1955.
4. **Гончаров В.Н.** Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометиздат. 1962.
5. **Мирцхулава Ц.Е.** Размыв русел и методики оценки их устойчивости. М.: Колос 1967.

6. **ВТР-П-25-80.** Руководство по определению допускаемых неразмы-  
вающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов.  
М.: 1981.
7. **ГОСТ 17.4.4.03-86.** Охрана природы. Почвы. Метод определения по-  
тенциальной опасности эрозии под воздействием дождей.
8. **РД 51-24-007-97.** Борьба с водной эрозией грунтов на линейной части  
трубопроводов.
9. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование экспе-  
римента при поиске оптимальных условий. М.: Наука. 1976.