

**УДК 626-315.3**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРУТИЗНЫ ВОЛНОУСТОЙЧИВОГО  
НЕУКРЕПЛЕННОГО ОТКОСА ПЛОТИН ИЗ ПЕСЧАНОГО  
ГРУНТА**

**Качаев Александр Евгеньевич,**

к.т.н., заведующий кафедрой строительного производства,  
Коломенский институт (филиал) Московского политехническо-  
го университета

**Аннотация.** В статье представлена методика определения крутизны волноустойчивого неукрепленного откоса плотин из песчаного грунта при определенном профиле динамического равновесия. Методика отличается от существующей новизной представленных формулировок для расчета параметров откосов и их прочностных характеристик.

**Ключевые слова:** грунтовая плотина, гидротехническое сооружение, фильтрация, поровое давление, устойчивость, деформация.

**DETERMINATION OF THE STEEPNESS OF A WAVE-RESISTANT  
UNREINFORCED SLOPE OF SANDY SOIL DAMS**

**Kachaev Alexander Evgenievich,**

PhD, Head of the Department of Construction Production,  
Kolomna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University

**Abstract.** The article presents a method for determining the steepness of a wave-resistant unreinforced slope of dams made of sandy soil with a certain profile of dynamic equilibrium. The method differs from the existing one by the novelty of the presented formulations for calculating the parame-

ters of slopes and their strength characteristics.

**Keywords:** soil dam, hydraulic structure, filtration, pore pressure, stability, deformation.

**Введение.** Гидротехнические сооружения (ГТС) различного типа и устройства на сегодняшний день находятся в ведении федеральных министерств РФ или в частном использовании. Конструктивные особенности грунтовых плотин относятся прежде всего к той местности, на которой они возводятся. Грунты и рельеф для устройства грунтовой плотины играют очень важную роль и определяют их конструктивное исполнение.

На ряду со всем прочим гидротехнические сооружения насыпного типа могут быть представлены водосбросами, различными комплексами по сбору и спуску водохранилищ, оросительных каналов и дренажных систем. Всем этим сооружениям на земле необходима защита от наводнений, мероприятия по снижению береговой и канальной эрозии.

Водоподпорные ГТС в нашей стране используются в качестве сооружений для накопления, хранения и дифференциации водных масс в стационарных водохранилищах. такие ГТС наиболее распространены в нашей стране в сельском хозяйстве. Водосбросные ГТС тоже являются распространенными не только в сельском хозяйстве, но и в речном. Они необходимы для сброса избыточных водных масс из различных водохранилищ. ГТС, которые относятся к водопроводящим используются для транспортировки водных ресурсов на местности к необходимым координатам земной поверхности – оросительным каналам или водозабору. В свою очередь, водозаборные ГТС используются для извлечения водных масс из различных источников для потребления населением и в

технических целях.

Помимо всего прочего есть еще и корректирующие ГТС – они призваны улучшать водотоки и защищать русла рек.

Теперь перейдем к методам расчета, учитывающим прочностные характеристики плотины и свойства грунта для расчета крутизны волноустойчивого неукрепленного откоса плотин из песчаного основания.

**Основная часть.** Основываясь на экономике возведения гидротехнических сооружений для сельского хозяйства, целесообразно сооружать плоские волностойкие грунтовые откосы без специального укрепления (ядра плотины) или с облегченным укреплением (каменной засыпкой и трюмбровкой). Предварительная оценка параметров профиля динамического равновесия неармированного легко фильтруемого откоса грунтовой плотины на песчаных грунтах при волновом динамическом воздействии рассчитывается из выражения [4]:

$$k = k_e + m \lambda \sqrt[3]{\left( \frac{h_c}{d_1} \sqrt[3]{\frac{\lambda}{h_c}} \right)}, \quad (1)$$

где  $k$  – параметр грунтового откоса;  $k_e$  – параметр естественного откоса грунта, из которого состоит тело или ядро плотины под толщей водных масс;  $h_c$  – расчетная величина волны, м;  $\lambda$  – расчетная длительность волны, м;  $d_1$  – усредненный показатель диаметра частиц грунта, м;

$$d_1 = \sum_i \frac{p_i d_i}{100}, \quad (2)$$

здесь  $d_i$  – диаметр фракций частиц грунта, м;  $p_i$  – процентное содержание фракций, % по объему;  $k_l$  – параметр расчета фракционного состава,  $k_l = 0,368$ . Для массива равнинного откоса, находящегося под водой от расчетного показателя высоты воды в объеме водохранилища до нижней высотной отметки, ослабляющего размыванием волн ( $h_l$ ), можно

определить в соответствии с уравнением, представленным в работе [5]:

$$h_1 = 0,03 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{h_c \lambda}{\sqrt{d_1}}\right)^2} ; \quad (3)$$

$k_l = 0,17$  – параметр грунтового откоса на песчанном основании.

Данный параметр рассчитывается для части равнинного откоса, который находится над водными массами водохранилища, и находится в прямой зависимости от расчетной высоты воды до самой верхней отметки возможного при аварии или паводке механического воздействия волн  $h_2$ .

Для проверочного расчета начального уровня воды в водохранилище, показанного на рис. 1, примем, что  $h_2 = 0,53 h_c$ .

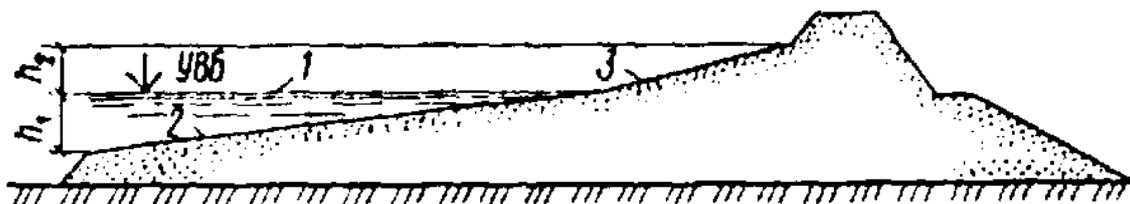


Рис. 1. Гидротехнические параметры откоса грунтовой плотины:

1 – стационарный уровень воды в водохранилище, используемый в методике расчета; 2 – расчетная область откоса грунтовой плотины, где

$k_l = 0,363$ ; 3 – расчетная область откоса грунтовой плотины,

где  $k_l = 0,170$

Если принять, что углы подхода волн находятся в диапазоне от  $45^\circ$  до  $57^\circ$ , то при аналитической оценке крутизны динамически устойчивого грунтового неукрепленного откоса необходимо учитывать влияние его размыва на его эксплуатационный ресурс.

На практике грунтовые откосы насыпных плотин подвергаются интенсивному динамическому воздействию по причине наличия различных природных и техногенных факторов: такие ситуации могут быть вызваны воздействием ветра, атмосферными осадками, течением в водоеме, движением льда и прочее, помимо этого могут влиять деформации и усадки различных по морфологии глинистых грунтов.

Исходя из вышеизложенного, необходимо укреплять верхнюю часть грунтового откоса плотины в несколько этапов.

Определить размещение основного укрепления в зоне максимального динамического воздействия волн и льда, когда эксплуатируется сооружение. Использовать облегченное укрепление, которое устраивается ниже уровня основного укрепления. Здесь важно соблюсти, что верхний уровень основного укрепления определяется по высотному размеру гребня грунтовой плотины.

Поэтому должно выполняться следующее условие: если высотная отметка гребня плотины существенно выше расчетного уровня водных масс водохранилища, тогда основное укрепление сооружения необходимо устроить таким образом, чтобы он располагался ниже уровня высотной отметки гребня – на так называемом уровне наката  $H_{гип}$ , тогда, следовательно, облегченное укрепление сооружения будет устраиваться так, чтобы оно доходило до самого гребня.

Минимальная высотная отметка основного укрепления определяется, исходя из ориентира, где находится самый низкий уровень срабатывания водохранилища на глубине [б], который определяется из следующего уравнения:

$$H = 2 \cdot h_{1\%}. \quad (4)$$

К вопросу проектирования размера толщины каменного укрепле-

ния на грунтовой откосе плотины необходимо подойти дифференцировано. При этом необходимо учесть и рассчитать откос на предмет частичного выноса мелких частиц грунта из общего объема укрепления при динамике волнового воздействия, а также движение в укреплении крупных камней, материала, который используется в устройстве плотины в качестве уплотнения для надежного укрепления грунтовых масс. Здесь необходимо помнить, что эксплуатация аналогичных укреплений должна быть условно оценена как не менее  $3d_{0,85}$ .

Данный параметр  $d_{0,85}$  – является условным диаметром камня, размер которого определяется в объеме 85 % массы всей каменной массы, уложенной на грунтовой откос для ее укрепления [7].

Массу каждого дифференцированного элемента грунтовой откоса  $M$  или  $M_z$  рассчитываем по следующему алгоритму:

- определяем значение при местоположении каменного объема на участке грунтовой откоса от высотной отметки верха сооружения до его глубины,  $W = 0,7 \cdot H$  по формуле [8]:

$$m = \sqrt{\frac{\bar{\lambda}}{h}} \cdot \frac{3,61 \cdot k_r \cdot \rho_M \cdot h^3}{\left(\frac{\rho_M}{\rho_0} - 1\right)^3 \cdot \sqrt{1 + \text{ctg}^3 \varphi}}; \quad (5)$$

значит, при  $Z > 0,7 \cdot H$  по формуле из работы [11]:

$$M_z = M \cdot e^{-\left(\frac{8,25 \cdot z^2}{\bar{\lambda} h}\right)}; \quad (6)$$

где  $k_r$  – параметр грунта, значение которого можно определить в [8] по табл. 3.1; если значение  $\bar{\lambda}/h > 15$ ,  $k_r$  следует определять по экспериментальным данным из работы [7];  $\rho_0$  – параметр плотности вод-

ных масс, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_M$  – параметр плотности каменной отсыпки, кг/м<sup>3</sup>.

В качестве защитных устройств грунтовой плотины зарубежными авторами рекомендуется определять те же значения в соответствии с действующими нормативными документами и физико-механическими характеристиками грунтов. Значит, объемную массу дифференцированного защитного элемента, который входит в объем грунтового откоса, рассчитаем на основании работ [9-12] по формуле:

$$Q_r = \frac{\rho_M g^P}{C_\epsilon (\rho_M / \rho_0 - 1)^3 \text{ctg} \varphi}, \quad (7)$$

где  $Q_r$  – массовая характеристика дифференцированного защитного элемента плотины, кг;  $\rho_M$  – параметр плотности материала, из которого выполняется дифференцированный защитный элемент, т/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – угловая характеристика наклона грунтового откоса по отношению к горизонту, град;  $C_\epsilon$  – обезличенный коэффициент, принимаем равным  $C_\epsilon = 1/1,75 - 1/25$ ).

Таблица 1

Значения параметра  $C_\epsilon$

Дифференцированные элементы укрепления откоса	Параметр $C_\epsilon$	
	при произвольной накидке	при упорядоченной установке
Каменное укрепление	0,027	-
Цементно-песчаные блоки	0,020	-
Иные цементно-песчаные фигурные блоки - тетраподы	0,01	0,005

Значение  $C_\epsilon$ , как показывает анализ данных таблицы 1, соответствует минимальному весу дифференцированного элемента грунта и значительно зависит от конструкции дифференцированного защитного элемента.

При этом данный параметр является существенным параметром,

который в предложенной формуле, показывает отсутствие учета длительности волнового воздействия. Помимо всего прочего он также оказывает влияние на эксплуатационные характеристики гидротехнического сооружения.

Размер толщины для дифференцированного защитного слоя основного укрепления грунтовой плотины определяется в виде равной максимальному размеру подобных друг другу двух дифференцированных элементов. А это значит, что в расчете будем иметь наличие этих двух дифференцированных элементов в слое защиты укрепленного откоса грунтовой плотины.

Поэтому для расчетов укрепления откоса размер рекомендуемой ширины гидротехнического сооружения по высоте уровня воды составляет три максимальных показателя дифференцированных защитных элементов в объеме укрепленного откоса.

При проектировании и моделировании укрепленных откосов из несортированной каменной массы необходимо учесть, что значение параметра  $k_g$ , который оценивает зерновой состав каменной насыпки, должен быть в пределах заштрихованной зоны, представленной на рис. 2.

На графике (рис. 2) показано, что необходимо сделать для определения допустимого зернового состава несортированной каменной насыпки, чтобы правильно запроектировать необходимые укрепления грунтовых откосов.

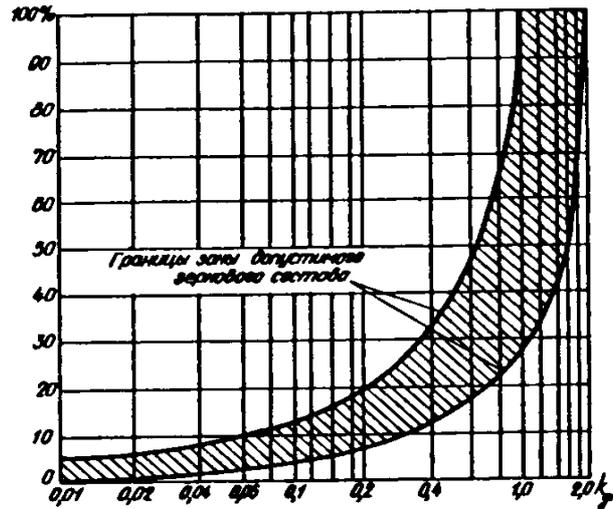


Рис. 2. Предельные показатели зернового состава несортированной каменной наброски для укрепления откосов грунтовых плотин

При проектировании плотин и откосов каналов величина параметра  $k_g$  рассчитывается в соответствии с выражением, представленным в работе [13]:

$$k_g = 3 \sqrt{\frac{M_j}{M_i}} = \frac{D_{Б\beta j}}{D_{Б\beta i}}, \quad (8)$$

где  $M$  – масса каменного укрепления, кг;  $M_j$  – масса каменного укрепления, кг;  $D_{Б\beta j}$  и  $D_{Б\beta i}$  – фракционные параметры каменной засыпки, мм, сферической формы по массам  $M_j$  и  $M_i$ .

В таблице 2 даны рекомендации по выбору параметра  $C_v$ . они носят обязательный характер и учитываются при определении параметра  $k_g$ .

Таблица 2

Величина параметра  $C_v$ 

Ширина дифференцированного элемента защиты	Грунтовой объем откоса	Волна	
		Дифференцируемая	Недифференцируемая
Тетраподная форма	2	4,4	5,2
Долос	2	8,1	15,7
Рваная каменная засыпка	2	1,5	2,75

Зерновой состав несортированной каменной наброски, используемой для укрепления откосов в пределах заштрихованной зоны (см. рис. 2), можно считать подходящим для конструкций с углом наклона, удовлетворяющим условию  $3 \leq \text{ctg } \varphi \leq 5$ , это условие справедливо только при высоте волны 3 м.

Ориентируясь на угол наклона грунтового откоса  $\text{ctg } \varphi$ , который может превышать значение равное 5, то для расчетов массы каменной засыпки  $M$ , следует использовать специальное выражение, умножая полученное значение на коэффициент  $k_\varphi$ , который по данным из табл. 3 определяется из работы [12].

Таблица 3

Величина показателя  $k_\varphi$ 

$\text{ctg } \varphi$	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5
Показатель $k_\varphi$ , если выполняется условие что $\bar{\lambda}/h \geq 10$	0,71	0,57	0,44	0,27	0,25

Минимальное количество фракций с диаметром  $D_{B\beta j}$ , необходимое для расчетной массы в несортированной каменной наброске, должно соответствовать параметрам, указанным в таблице 4.

Таблица 4

Фракционный состав для  $D_{Б\beta j}$ 

Параметр $D_{60}/D_{10}$	5	10	20	40 - 100
Минимум по содержанию групп частиц диаметром $D_{Б\beta j}$ , % (по объемной массе)	50	30	25	20

Если разрабатывать монолитные железобетонные укрепления откосов, то при проектировании обычно рекомендуется разделить их на относительные секции размером не более 50×50м, при этом рекомендуется использовать термоусадочные поперечные и осадочные продольные швы. Секции из железобетона должны состоять из отдельных плит, несвязанных между собой.

Железобетонные плиты, рекомендуется использовать прямоугольной формы. Укрепления откосов каналов и плотин из сборных железобетонных плит следует разрабатывать с возможностью их монолитного устройства, при этом допускается нормативными документами использование немонолитных плит, при условии, что будет проведен расчет грунтов и оценена их характеристика и динамика во времени.

**Заключение.** В работе представлена методика для определения необходимых параметров при укреплении откосов грунтовых плотин. получены следующие результаты. Обратные фильтры, установленные на укрепленных каменными набросками откосах, плиты с открытыми швами, сквозные отверстия могут состоять как из одного слоя разнозернистых материалов, так и из двух слоев с различной крупностью частиц. Могут быть из искусственных водопроницаемых материалов, а могут быть и неводопроницаемыми.

При проектировании для откосов, выполненных из глинистых, мелкозернистых песчаных или подвижных при динамических нагрузках грунтов, должна быть уложена песчаная подушка. Гранулометрический состав зерен песка и толщина этого слоя определяются на основе проведенных исследований и расчетов.

Для конструкций укреплений, состоящих из монолитных или сборных железобетонных плит, на песчаных или глинистых откосах рекомендуется использовать однослойный обратный фильтр. При выполнении определенных условий возможно применение монолитных бесфильтровых железобетонных креплений, которые должны гарантировать надежное функционирование всего устройства откоса.

#### Список литературы

1. Альхименко А.И., Беляев Н. Д., Фомин Ю. П. Безопасность морских гидротехнических сооружений: Учебное пособие / Под ред. Альхименко А. И. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 288с.
2. Белецкий Б.Ф. Технология и механизация строительного производства: Учебник. – Ростов н/Д, Феникс, 2004. – 752 с.
3. Галямина И.Г. Курс комплексного использования водных ресурсов в задачах: учебное пособие. – М.: МГУП, 2003. – 111 с.
4. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. – М. Издательство строительных вузов. 2006. – 482 с.
5. Кумсиашвили Г.П. Гидроэкологический потенциал водных ресурсов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 270 с.
6. Мелиорация и водное хозяйство. Т. 5. Водное хозяйство / под ред. И.И. Бородавченко. – М.: Агропромиздат, 1988. – 399 с.

7. Нестеров М.В. Гидротехнические сооружения. – Минск: Новое знание, 2006. – 616 с.

8. Попов М.А., Румянцев И.С. Природоохранные сооружения. – М: КолосС, 2005. – 520 с.

9. Раткович Д.Я. Актуальные проблемы водообеспечения. – М.: Наука, 2003. – 352 с.

10. Яковлев С.В., Губий И.Г., Павлинова И.И. Комплексное использование водных ресурсов: учебн. пособие. – М.: Высш. шк., 2005. 384 с.

11. Сидоренко Д. А., Качаев А. Е. BIM-технологии в строительстве: что будет дальше? // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XXI Международной научно-технической конференции, посвящённой 35-летию полета орбитального корабля-ракетоплана многоразовой транспортной космической системы "Буран", Рязань, 12–14 апреля 2023 года / Под редакцией А.Н. Паршина. – Рязань: Рязанский институт (филиал) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Московский политехнический университет", 2023. – С. 490-492.

12. Хитров, Я. И. Использование BIM-технологий для объекта промышленного назначения при реконструкции одного из его действующих производств / Я. И. Хитров, А. Е. Качаев // Новые технологии. Наука, техника, педагогика = New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: Материалы Всероссийской научно-практической конференции = Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference, Москва, 19–26 февраля 2024 года. – Москва: Московский Политех, 2024. – С. 293-298.

13. Хитров, Я. И. Применение BIM-модели объекта промышлен-

ного назначения при реконструкции действующего производства / Я. И. Хитров, А. Е. Качаев // Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета: Сборник научных трудов. – Москва: Московский политехнический университет, 2024. – С. 347-352.

14. Сорока, В. В. Информационное моделирование зданий и сооружений как инструмент снижения рисков инвестиционного строительства / В. В. Сорока, А. Е. Качаев // Вестник Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета: Сборник научных трудов. – Москва: Московский политехнический университет, 2024. – С. 341-346.

#### References

1. Alkhimenko A.I., Belyaev N.D., Fomin Yu.P. Safety of Marine Hydraulic Structures: Textbook / Ed. Alkhimenko A.I. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2003. – 288 p.

2. Beletsky B.F. Technology and Mechanization of Construction Production: Textbook. – Rostov n / D, Phoenix, 2004. – 752 p.

3. Galyamina I.G. Course of Integrated Use of Water Resources in Problems: Textbook. – Moscow: Moscow State University of Printing Arts, 2003. – 111 p.

4. Gordeev V.N., Lantukh-Lyaschenko A.I., Pashinsky V.A. Loads and Impacts on Buildings and Structures. – Moscow: Publishing House of Construction Universities. 2006. – 482 p.

5. Kumsiashvili G.P. Hydroecological potential of water resources. – M.: ITC "Akademkniga", 2005. – 270 p.

6. Land reclamation and water management. Vol. 5. Water management / edited by I.I. Borodavchenko. – M.: Agropromizdat, 1988. – 399 p.
7. Nesterov M.V. Hydrotechnical structures. – Minsk: New knowledge, 2006. – 616 p.
8. Popov M.A., Rummyantsev I.S. Nature protection structures. – M.: KolosS, 2005. – 520 p.
9. Ratkovich D.Ya. Actual problems of water supply. – M.: Nauka, 2003. – 352 p.
10. Yakovlev S.V., Gubiy I.G., Pavlinova I.I. Integrated use of water resources: textbook. allowance. – M.: Higher. school, 2005. 384 p.
11. Sidorenko D. A., Kachaev A. E. BIM technologies in construction: what will happen next? Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University". 2023. Pp. 490-492.
12. Khitrov Ya. I. Use of BIM technologies for an industrial facility during the reconstruction of one of its existing production facilities // New Technologies. Science, Engineering, Pedagogics: Proceedings of the All-Russian scientific-practical conference, Moscow, February 19–26, 2024. – Moscow: Moscow Polytechnic, 2024. – Pp. 293–298.
13. Khitrov Ya. I. Application of a BIM model of an industrial facility during reconstruction of an existing production facility // Bulletin of the Kholmna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University: Collection of scientific papers. - Moscow: Moscow Polytechnic University, 2024. - Pp. 347-352.
14. Soroka V. V. Information modeling of buildings and structures as a tool for reducing the risks of investment construction // Bulletin of the Kholmna Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University: Collection

of scientific papers. - Moscow: Moscow Polytechnic University, 2024. - Pp.  
341-346.