

Ганчиков В. Г., Косиченко Ю. М. Защитные покрытия оросительных каналов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 160 с.

2. Косиченко Ю. М. Водопроницаемость противофильтрационных облицовок из полимерных материалов // Известия СКНЦВ. Технические науки. – 1984. – № 2. – С. 24–25.

3. Косиченко Ю. М. Расчет противофильтрационной эффективности облицовок с пленочными экранами // Гидротехническое строительство. – 1983. – № 12. – С. 33–38.

4. Природообустройство: учебник / А. И. Голованов [и др.] – М.: Колос, 2008. – 552 с.

5. Веников В. А., Веников Г. В. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1984. – 438 с.

6. Колганов А. В., Питерский А. М., Лисконов А. Т. Планирование эксперимента в гидромелиоративных исследо-

вания. – М.: Мелиоводинформ, 1999. – 214 с.

7. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных. – Л.: Судостроение, 1980. – 383 с.

8. Каганов Г. М., Волков В. И., Секисова И. А. Приближенная оценка глубины затопления территории в нижнем бьефе при прорыве напорного фронта низконапорных гидроузлов // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 4. – С. 22–26.

9. Багин А. В., Козлов Д. В. Обобщенная математическая модель воздействия ледовых образований на гидротехнические сооружения из габионов // Гидротехническое строительство. – 2011 – № 2. – С. 31–37.

Материал поступил в редакцию 18.02.14.

Баев Олег Андреевич, аспирант

Тел. 8 (8635) 26-65-00

E-mail: Oleg-Baev1@yandex.ru

УДК 502/504:627.8.059

Е. В. БАРАНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ГЕОРЕШЕТОК

Рассмотрены особенности работы противоэрозионного покрытия с применением объемных георешеток. Особое внимание уделено вопросу выбора расчетной схемы по определению устойчивости системы «водный поток + элемент заполнителя георешетки». Даны предложения автора.

Противоэрозионное покрытие, объемная георешетка, ячейка, устойчивость, критерий устойчивости, водный поток, размыв, заполнитель, каменная наброска.

There are considered the peculiarities of the work of the erosion preventive coating using volumetric geoscreens. Special attention is paid to the problem of choosing a design diagram on determination of the system steadiness “water flow + aggregate element of the geoscreen”. There are given the author’s proposals.

Erosion preventive coating, volumetric screen, cell, stability, stability criterion, water flow, scouring, aggregate, rock-fill.

При проектировании гидротехнических сооружений, укрепленных полимерными объемными георешетками, для безопасной эксплуатации откосов необходимо учитывать ряд условий, в частности условие соблюдения устойчивости отдельных элементов заполнителя при воздействии на них

водного потока. Данное условие подразумевает равновесие системы «водный поток + камень», а в случае применения объемных георешеток с некоторым предварительным уплотнением заполнителя – соблюдение устойчивости на опрокидывание, что было подмечено несколькими авторами, занима-

ющимися исследованиями устойчивости несвязного грунта, в частности каменной наброски [1–5]. Некоторые исследователи отмечают, что момент подвижек элементов крепления при определенной их крупности в обычной каменной наброске наступает заметно раньше, чем, например, в мостовой кладке [3]. Это связано с более плотным и обжатым совместным расположением элементов мостовой кладки, для перемещения которых требуются большие усилия. Аналогично работает противозэрозийное укрепление откоса с применением георешеток. При некотором уплотнении заполнителя в ячейках происходит обжатие (заклинивание) его элементов – это повышает устойчивость. Сила обжатия $F_{сж}$ напрямую зависит от интенсивности и способа применяемого уплотнения. Передача усилий происходит в точках соприкосновения элементов. Число точек соприкосновения n может колебаться от двух и более в зависимости от порозности материала заполнителя.

При создаваемом воздействии водного потока на какой-либо отдельный элемент заполнителя в каждой точке соприкосновения возникает сила трения, определяемая по следующей зависимости:

$$F_{тр\ n} = F_{сж\ n} \cdot f, \quad (1)$$

где $F_{сж\ n}$ – сжимающее усилие в n -й точке; $f = \tan \varphi$ – коэффициент трения, характеризующий материал и физическое состояние трущихся поверхностей (коэффициент трения определяется в лабораторных условиях).

Общая сила трения при n -м числе точек соприкосновения:

$$F_{тр\ общ} = f \cdot \sum F_{сж\ n}. \quad (2)$$

Очевидно, что $F_{тр\ общ}$ – величина комплексная, зависящая от расположения отдельно рассматриваемого элемента относительно соседних, природы материала используемого камня и величины силы обжатия. Учет силы трения $F_{тр\ общ}$ в случае применения георешеток играет особую роль в устойчивости отдельных элементов крепления.

Обозначим результирующую $F_{тр\ общ}$ на некоторой линии действия, расположенной относительно точки опрокидывания на расстоянии $l_{F_{тр}}$. Момент, создаваемый силой $F_{тр\ общ}$ с плечом $l_{F_{тр}}$, должен быть равен сумме моментов всех сил $F_{тр\ n}$ с соответствующими им плечами. Известно, что место приложения

силы может находиться в любой точке ее линии действия, поэтому данную точку можно назначить произвольно.

Определившись с ролью сил трения в устойчивости элементов заполнителя георешеток, перейдем к обзору проводимых исследований устойчивости каменного крепления.

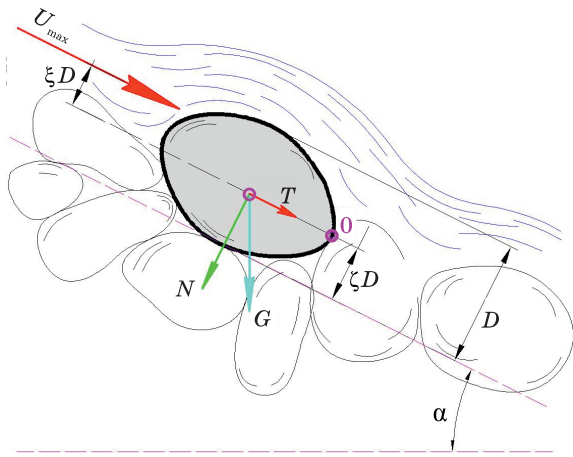
Изучением влияния параметров водного потока, в частности его скорости движения, на устойчивость элементов крупнозернистого материала занимался ряд исследователей. Выделим работы С. В. Избаша и В. С. Кнороза [1, 2, 4, 6].

В одной из своих работ С. В. Избаш представил результаты исследований наброски, выполняемой отсыпкой камня в текущую воду [1]. Были выделены четыре характерные стадии совместного воздействия водного потока и тела каменной насыпи: начальная и переходная, стадия быстрого тока и заключительная стадия. Для стадии быстрого тока была предложена расчетная схема и формула (3) по определению предельно допустимой неразмывающей скорости водного потока (рисунок, а).

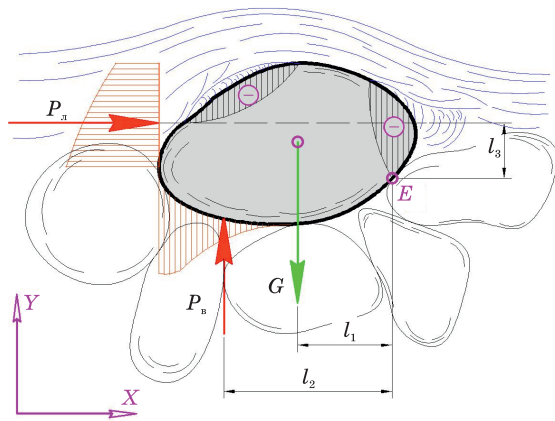
$$v_{разм} = \sqrt{\frac{1}{k_3 \xi}} \cdot \sqrt{2g \frac{\gamma_K - \gamma}{\gamma}} \cdot \sqrt{D} \times \sqrt{\cos \alpha} = Y_B \Pi \sqrt{D} \sqrt{\cos \alpha}, \quad (3)$$

где $Y_B = \sqrt{1/(k_3 \xi)}$ – коэффициент устойчивости рассматриваемого камня на опрокидывание; k_3 – коэффициент, учитывающий структуру наброски, форму и условия обтекания камня, а также его «защищенность» соседними камнями; ξ – величина, определяющая, какую часть от размера D составит плечо действующей скорости потока $v_{разм}$; $\Pi = \sqrt{2g((\gamma_K - \gamma)/\gamma)}$ – коэффициент природных свойств; γ_K – объемный вес материала заполнителя; γ – объемный вес жидкости; D – приведенный размер рассматриваемого элемента наброски (в случае элемента в виде куба – длина его ребра, в виде шара – его диаметр); α – угол наклона откоса по сравнению с горизонтальной поверхностью.

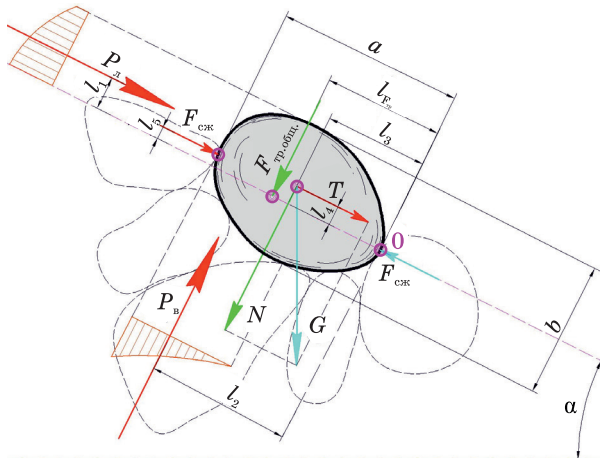
Автором подробно рассмотрены работы В. С. Кнороза и С. В. Избаша. В результате анализа предложенной В. С. Кнорозом схемы устойчивости (рисунок, б) и представленных С. В. Избашем формул для сил, воздействующих на отдельный элемент крупнозернистого грунта, составлено уравнение равновесия моментов относительно некоторой точки опрокидывания (в данном случае точки Е). В результате преобразований относительно скорости $v_{разм}$ получено следующее уравнение (3):



а



б



в

Схемы к определению устойчивости элемента каменного крепления на опрокидывание по предложению: а – С. В. Избаша; б – В. С. Кнороза; в – автора статьи Е. В. Баранова при использовании георешеток

$$v_{\text{разм}} = \Psi \sqrt{\frac{C_{\phi}}{2C_x l_3 + 2C_y l_2}} \cdot \sqrt{2g \frac{\gamma_K - \gamma}{\gamma}} \times \sqrt{D} = Y_{B^*} \Pi \sqrt{D}, \quad (4)$$

где $Y_{B^*} = \Psi \sqrt{C_{\phi} / (2C_x l_3 + 2C_y l_2)}$ – коэффициент устойчивости; C_x и C_y – коэффициенты, учитывающие

форму элемента и условия обтекания водным потоком в соответствующих рассматриваемых плоскостях; C_{ϕ} – коэффициент формы, учитывающий геометрические и объемные параметры элемента; $\Psi = v_{\text{разм}}^0 / v_{\text{дон}}^0$ – коэффициент, учитывающий разницу между средней скоростью потока $v_{\text{разм}}^0$ и действующей донной скоростью $v_{\text{дон}}^0$.

Сопоставляя формулы (3) и (4), убеждаемся в их аналогичности, а вместе тем и в схожести коэффициентов Y_B и Y_{B^*} .

Анализируя представленные расчетные схемы к устойчивости и методы по определению предельно допустимой скорости $v_{\text{разм}}^0$, автор статьи выявил достоинства и недостатки каждой и на основе этого предложил свою адаптированную расчетную схему к определению устойчивости любого элемента заполнителя в ячейках объемных георешеток (рисунок, в).

Сумма моментов относительно точки опрокидывания О будет равна:

$$\sum M_0 = P_L l_1 + P_B l_2 - N l_3 + T l_4 + F_{\text{сж}} l_5 - F_{\text{тр обш}} l_{F_{\text{тр}}} = 0, \quad (5)$$

где $P_L = k_L \gamma \omega_L (v_{\text{разм}}^2 / 2g)$ – лобовое давление потока [1, 2, 7]; k_L – коэффициент, схожий по определению с коэффициентом C_x ; ω_L – площадь элемента, подверженная воздействию силы P_L ; $P_B = k_B \gamma \omega_B (v_{\text{разм}}^2 / 2g)$ – выталкивающее давление потока [7]; k_B – коэффициент, схожий по определению с коэффициентом C_y ; ω_B – площадь элемента, подверженная воздействию силы P_B ; $T = k_{\phi} (\gamma_K - \gamma) W_K \sin \alpha$ – составляющая веса элемента [1, 2]; $N = k_{\phi} (\gamma_K - \gamma) W_K \cos \alpha$ – составляющая веса элемента [1, 2]; k_{ϕ} – коэффициент, как и C_{ϕ} , учитывающий геометрические и объемные особенности элемента; $F_{\text{сж}}$ – сила обжатия (заклинивания); $F_{\text{тр обш}}$ – равнодействующая сил трения.

Отметим, что момент $F_{\text{сж}} l_5$ ничтожно мал из-за незначительной величины l_5 . При возможном увеличении плеча l_5 произойдет и увеличение момента, создаваемого силой $F_{\text{сж}}$ (см. рисунок, в). При этом повысится «защищенность» самого элемента, соответственно уменьшится величина ω_L , тем самым и сила P_L . Поэтому можно принять момент $F_{\text{сж}} l_5 = 0$.

Для дальнейшего упрощения уравнения (5) рассмотрим силу $F_{\text{тр обш}}$, а также P_B , параллельную ей. Используем теорему о параллельном переносе сил (лемму Пуансо) в точке опрокидывания О для силы $F_{\text{тр обш}}$ и заменим создаваемый ей момент ($F_{\text{тр обш}} l_{F_{\text{тр}}}$) эквивалентной величиной ($P_B \cdot \Delta l$). При этом сила P_B

должна быть равна вводимой силе P'_B . В результате получим момент от сил $F_{\text{тр общ}}$ и P_B , но уже в измененном виде:

$$\sum M = P_B l_2 - F_{\text{тр общ}} l_{F_{\text{тр}}} = P_B l_2 - P'_B \Delta l = P_B (l_2 - \Delta l). \quad (6)$$

Сравним величины $(l_2 - \Delta l)$ и l_2 , выразим их соотношение в долевом эквиваленте через некоторый коэффициент $k_{\text{тр}} = (l_2 - \Delta l) / l_2$, по сути определяющий влияние силы трения $F_{\text{тр общ}}$ на положение линии действия выталкивающей силы P_B . Очевидно, что при $k_{\text{тр}} = 1,0$ силы трения отсутствуют.

Тогда в результате всех преобразований из уравнения (5) получим:

$$\sum M_0 = P_{\text{Л}} l_1 + P_B l_2 k_{\text{тр}} - N l_3 + T l_4 = 0; \quad (7)$$

$$\sum M_0 = k_{\text{Л}} \gamma \omega_{\text{Л}} \frac{\vartheta_{\text{разм}}^2}{2g} l_1 + k_B \gamma \omega_B \frac{\vartheta_{\text{разм}}^2}{2g} l_2 k_{\text{тр}} - k_{\phi} (\gamma_K - \gamma) W_K \cos \alpha \cdot l_3 + k_{\phi} (\gamma_K - \gamma) W_K \sin \alpha \cdot l_4 = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение (8) относительно $\vartheta_{\text{разм}}$, получаем следующее выражение:

$$\vartheta_{\text{разм}} = Y = \sqrt{\frac{k_{\phi} (\cos \alpha \cdot l_3 - \sin \alpha \cdot l_4)}{k_{\text{Л}} l_1 + k_B l_2 k_{\text{тр}}}} \times \sqrt{2g \frac{\gamma_K - \gamma}{\gamma}} \sqrt{D} = Y \cdot \Pi \sqrt{D}, \quad (9)$$

где $Y = \sqrt{k_{\phi} (\cos \alpha \cdot l_3 - \sin \alpha \cdot l_4) / (k_{\text{Л}} l_1 + k_B l_2 k_{\text{тр}})}$ – коэффициент, являющийся критерием устойчивости для элементов крепления каменной наброски с применением георешеток.

Как видно из формулы (9), коэффициент Y зависит не только от формы элементов и особенностей обтекания их потоком, но и от угла наклона α защищаемого откоса, а также от особенностей уплотнения заполнителя.

Одной из основных задач дальнейших гидравлических исследований противоэрозионного каменного крепления откосов гидротехнических сооружений с применением полимерных объемных георешеток станет определение значения коэффициента устойчивости Y , правильная оценка которого напрямую повлияет на их дальнейшую безаварийную эксплуатацию.

1. **Избаш С. В.** Постройка плотин наброской камня в текущую воду. – Ленинград: Госстройиздат, 1932. – 124 с.

2. **Избаш С. В.** Гидравлика производства работ по преграждению русла. – Ленинград: Госстройиздат, 1939. – 222 с.

3. **Шанкин П. А.** Воздействие волн на гидротехнические сооружения. – М.: Речной транспорт, 1955. – 240 с.

4. **Кнороз В. С.** Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие // Известия ВНИИГ. – 1958. – № 59. – С. 62–81.

5. **Леви И. И.** Динамика русловых процессов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1957. – 252 с.

6. **Избаш С. В.** Основы гидравлики: учеб. пособие. – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1952. – 424 с.

7. **Штеренлихт Д. В.** Гидравлика: учеб. для вузов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: КолосС, 2004. – 656 с.

Материал поступил в редакцию 15.05.14.

Баранов Евгений Викторович, аспирант
Тел. 8-925-199-90-42