

УДК 624.138.9

# ПРОЧНОСТЬ ГЕОТЕКСТИЛЯ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ ГАЛЬКОЙ И ЩЕБНЕМ

Н. Г. БУГАЙ, А. И. КРИВОНОГ, В. В. КРИВОНОГ, В. Л. ФРИДРИХСОН

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 20.04.2009

Гибкое крепление откосов земляных гидротехнических сооружений из каменной наброски или железобетонными плитами с использованием геотекстиля находит все большее распространение [1–4]. Геотекстиль – это нетканый или тканый плоский материал из полимерных волокон, укладываемый по контакту крепления и грунта откоса, выполняет роль обратного фильтра, работает на разрыв и продавливание частицами защитного слоя из гальки или щебня. В статье приведены результаты экспериментальных исследований прочности геотекстиля при продавливании шаром и конусом, моделирующих продавливание галькой и щебнем. Показано, что при креплении земляного откоса из песка и лессовидной супеси при  $m \geq 3$  каменной наброской общей толщиной 0,6 м и высоте волн до 1 м нетканый материал Ровенской фабрики не будет продавливаться фракциями гальки или щебня крупностью 10 – 50 мм.

Гнучке кріплення укосів земляних гідротехнічних споруд з кам'яної накиді або залізобетонними плитами з використанням геотекстилю знаходить все більше розповсюдження [1–4]. Геотекстиль – це нетканый або тканый плоский матеріал з полімерних волокон, який укладається по контакту кріплення і ґрунта укоса, виконує роль зворотнього фільтра, працює на розрив та продавлювання часточками захисного шару з гальки або щебня. В статті наведено результати експериментальних досліджень міцності геотекстиля при продавлюванні шаром і конусом, що моделює продавлювання галькою і щебнем. Показано, що в випадку кріплення земляного укоса з піску і ліссовидним супіском при  $m \geq 3$  кам'яною накиддю загальною товщиною 0,6 м і висоті хвиль до 1 м нетканый матеріал Ровенської фабрики не буде продавлюватись фракціями гальки або щебня крупністю 10 – 50 мм.

Floppy attachment of acclivities of earthen hydraulic engineering buildings from stone riprap or reinforced-concrete tables with usage of geotextiles discovers the increasing propagation [1–4]. The geotextiles is unwoven or woven a flat material from polymeric fibres, stacked on contact the attachments and ground of an acclivity, are executed by a role the return filter, works on a breaking and pressing fragments protective layer from shingle or crushed aggregate. In paper the outcomes are reduced experimental studies of hardness of geotextiles at pressing by a sphere and cone modelling pressing by shingle and crushed aggregate. Is rotined, that at attachment of an earthen acclivity from sand and loess sandy soil at  $m \geq 3$  immovable stone riprap by communal thickness 0.6 m and altitude of surges up to 1 m unwoven material the Rovno factory will not be pressed through by fractions of shingle or crushed aggregate by fineness of aggregate 10 – 50 mm.

## ВВЕДЕНИЕ

Гибкие крепления откосов земляных гидротехнических сооружений с использованием геотекстиля находят все большее распространение [1–4].

Геотекстиль должен обеспечивать контактную устойчивость и отвод воды из водонасыщенного откоса при незначительных фильтрационных сопротивлениях. Кроме того, он должен быть прочным и долговечным в любых условиях при эксплуатации гидротехнических сооружений. Под прочностью геотекстиля понимается прочность на разрыв и на продавливание частицами защитного слоя из щебня или гальки. Современный геотекстиль обладает значительной прочностью на разрыв и может повысить местную устойчивость закрепленного откоса [1].

Прочность геотекстиля при продавливании обусловлена конструкцией крепления, так как в качестве защитного слоя для геотекстиля от повреждения каменной наброской или железобетонными плитами предусматривается слой щебня или гальки фракциями 10 – 50 мм толщиной 10 – 15 см. Таким образом, фракции щебня или гальки защи-

тного слоя передают давление крепления на геотекстиль и могут разрушить его продавливанием.

Так как фракции гальки и щебня существенно отличаются по форме, то рассматривали прочность геотекстиля при продавливании окатанными и неокатанными фракциями отдельно.

## 1. ПРОДАВЛИВАНИЕ ГЕОТЕКСТИЛЯ ФРАКЦИЯМИ ГАЛЬКИ

Форма частиц гальки изменяется от шаровой до эллипсоидной. В первом случае моделью может быть продавливание шаром, а во втором – цилиндром. Ниже излагается методика оценки прочности геотекстиля при продавливании шаром.

В текстильной промышленности установлена стандартная методика испытания тканей при продавливании [5]. Материал жестко закрепляется в виде диафрагмы диаметром  $d_0 = 25$  мм, на которую передается нагрузка  $P$  через шар диаметром  $d = 20$  мм. При испытании фиксируется сила  $P$  и перемещение шара  $\delta$  при разрушении ткани. В [5] приведена таблица для растяжимости ткани  $\varepsilon_{\text{ТК}}$

в зависимости от  $\delta$ . Физически  $\varepsilon_{\text{тк}}$  представляет собой относительное изменение площади геотекстиля по сравнению с первоначальной площадью. Результаты испытания ткани могут быть приведены в ТУ на материал.

Считаем, что описанная выше методика может быть использована при исследовании прочности геотекстиля при продавливании фракциями защитного слоя. При этом, изменяя диаметр фракции  $d$ , диаметр диафрагмы  $d_o$  определяем из условия  $\Delta d/d \approx 0.25$ , где  $\Delta d = d_o - d$ . Последнее условие предполагает тесное расположение фракций на поверхности геотекстиля.

На рис. 1 приведено поперечное сечение контакта шара с геотекстилем при испытании его на продавливание.

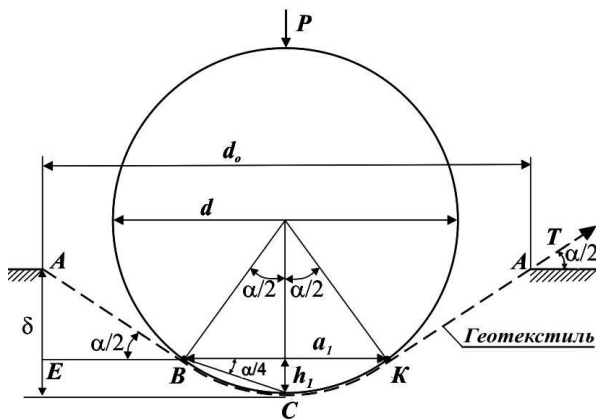


Рис. 1. Поперечное сечение при продавливании геотекстиля шаром

Для рис. 1 можно записать следующие зависимости:

$$\varepsilon_{\text{тк}} = \frac{S_1 + S_2 - \frac{\pi d_o^2}{4}}{\frac{\pi d_o^2}{4}},$$

где  $S_1$  – боковая поверхность усеченного конуса высотой  $AE$  и шарового сегмента с хордой  $a_1$  и высотой  $h_1$ ,

$$S_1 = \pi \frac{\delta - h_1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \left( \frac{d_o}{2} + \frac{a_1}{2} \right), \quad S_2 = \pi \left( \frac{a_1^2}{4} + h_1^2 \right),$$

$$\frac{\delta}{d} = \sin \frac{\alpha}{2} \left( \frac{1 + \frac{\Delta d}{d} - \sin \frac{\alpha}{2}}{2 \cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{tg \frac{\alpha}{4}}{2} \right), \quad (1)$$

$$T = \frac{P}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad \sigma_{\text{к}} = \frac{T}{\pi a_1 \delta_o} = \frac{P}{\pi d \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \delta_o},$$

(здесь  $\sigma_{\text{к}}$  – напряжение в геотекстиле по контуру отрыва геотекстиля от шара, точка  $K$ ,  $\delta_o$  – толщина геотекстиля.) Для зависимости (1) построены вспомогательные графики для определения угла  $\alpha/2$  в зависимости от  $\delta/d$  при  $\Delta d/d = 0.25$  и  $0.43$ .

Исследования проводились экспериментально. Были испытаны три различных образца геотекстиля (образцы 1, 2 и 3) при  $d = 20$  мм и  $d_o = 25$  мм и один образец (образец 1) при  $d = 11$  мм и  $d_o = 13.8$  мм,  $d = 20$  мм и  $d_o = 25$  мм,  $d = 40$  мм и  $d_o = 50$  мм. По результатам испытаний построены экспериментальные зависимости  $P = f(\delta/d)$  представленные на рис. 2. Кроме того, были проведены испытания образца 1 при  $d = 17.5$  мм и  $d_o = 25$  мм,  $\Delta d/d = 0.43$  для двух случаев: в первом случае геотекстиль испытывали по методике, описанной выше, а во втором случае – основанием для геотекстиля был мелкозернистый рыхлый песок (рис. 3).

В таблице 1 приведены характеристика испытанных образцов геотекстиля и значения  $\sigma_{\text{к.р}}$ ,  $\sigma_o$  и  $\sigma_{\text{к.р}}/\sigma_o$ , где  $\sigma_o$  – напряжение при одноосном разрыве и  $\sigma_{\text{к.р}}$  – напряжение при разрыве при продавливании геотекстиля.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Геотекстиль при продавливании шаром работает на разрыв. Разрыв геотекстиля происходит вблизи сечения, которое проходит через точку  $K$ . Сравнивая напряжение в геотекстиле  $\sigma_{\text{к.р}}$  в момент разрыва при продавливании шаром и при одноосном растяжении  $\sigma_o$  для одного и того же образца, видно, что  $\sigma_{\text{к.р}} = (1.1 \div 1.3)\sigma_o$ .

При опирании геотекстиля на грунт основания значительная часть силы  $P$  при продавливании шаром воспринимает грунт. Например, при  $d = 17.5$  мм,  $d_o = 25$  мм разрыв ткани без грунта происходит при  $P = 530$  Н и  $\delta/d = 1.2$ , а при опирании на грунт основания при  $P = 950$  Н разрыва ткани нет, но при этом  $\delta/d = 0.85 < 1.2$ . Видно, что при  $P = 950$  Н ткань воспринимает нагрузку в 250 Н, а грунт –  $(950 - 250) = 700$  Н.

## 2. ПРОДАВЛИВАНИЕ ГЕОТЕКСТИЛЯ ФРАКЦИЯМИ ЩЕБНЯ

Фракции щебня имеют остроугольную форму, поэтому в качестве модели для оценки прочности

Табл. 1.

NN образца	Фабрика-изготовитель и характеристика образца геотекстиля	$d$ , мм	$\sigma_o$ , МПа	$\sigma_{к.р}$ , МПа	$\frac{\sigma_{к.р}}{\sigma_o}$
1	Ровенская фабрика нетканых материалов, $\delta_o = 2.06$ мм, $\gamma_s = 220$ г/м <sup>2</sup> . Обработка – пропитка латексом + иглопробивание	11	5.5	6.5	1.18
		20	-	7.1	1.28
		40	-	6.1	1.10
2	То же, $\delta_o = 2.55$ мм, $\gamma_s = 350$ г/м <sup>2</sup>	20	6.2	6.25	1.04
3	Луцкая фабрика нетканых материалов, $\delta_o = 2.10$ мм, $\gamma_s = 285$ г/м <sup>2</sup> . Обработка – термоусадка + иглопробивание	20	4.6	6.0	1.30

геотекстиля при продавливании щебнем принимаем продавливание конусом (рис. 4).

Для рис. 4 можно записать такие зависимости:

$$T = \frac{P}{\sin \frac{\alpha}{2}}, \quad \varepsilon_{\text{тк}} = \frac{S_1 - \frac{\pi d_o^2}{4}}{\frac{\pi d_o^2}{4}},$$

$$S_1 = \frac{\pi d_o}{2} \sqrt{\frac{d_o^2}{4} + \delta^2}.$$

Конус брали металлический,  $d = 20$  мм,  $d_o = 25$  мм, раскрытие конуса –  $90^\circ$ , острие конуса – закругленное, радиус закругления – 1 мм. При испытании фиксировали силу  $P$  и перемещение  $\delta$  диафрагмы из геотекстиля. Испытание проводили до прорыва геотекстиля. На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости  $P = f(\delta/d_o)$  для образца 1 Ровенской фабрики нетканых материалов.

Интересен анализ результатов опытов с использованием идеи о том, что прокол геотекстиля происходит при достижении напряжения в геотекстиле в зоне, близкой к т.  $K$ , когда  $\sigma_k > \sigma_o$ . При радиусе закругления острия конуса  $r = 1$  мм и толщине ткани  $\delta_o = 2.06$  мм принимаем при определении  $\sigma_k$  в т.  $K$  диаметр шарового сегмента  $a_1 = 2r + 2\delta_o = 6.12$  мм. В наших опытах при  $d = 20$  мм,  $d_o = 25$  мм прокол произошел при  $P = 230$  Н,  $T = 290$  Н,  $\sigma_k = 7.2$  МПа,  $\sigma_{к.р}/\sigma_o = 1.3$ .

Необходимо отметить, что при продавливании конусом, так же как и при продавливании шаром, значительное влияние оказывает физико-механическое состояние грунта, на который опирается геотекстиль. Из рис. 5 видно, что при опирании геотекстиля на рыхлый песок прокол ткани происходит при  $P = 820$  Н и  $\delta/d_o = 0.73$ , а при отсутствии песка – при  $P = 300$  Н и  $\delta/d_o = 0.73$ . Противодействие грунта составляет при  $(820 - 300) = 520$  Н. При опирании геотекстиля на

уплотненный песок противодействие грунта возрастает и составляет  $(965 - 230) = 735$  Н. Таким образом, разрушение геотекстиля при опирании на грунт определяется не силой  $P$ , а разрушающей деформацией геотекстиля, которая для проведенных опытов составляет  $\delta/d_o = 0.63 \div 0.73$ .

### 3. УЧЕТ ПРОТИВОДАВЛЕНИЯ ГРУНТА

В реальных условиях геотекстиль опирается на грунт и при продавливании геотекстиля отдельными фракциями щебня или гальки будет деформироваться не только геотекстиль, но и грунт откоса. Таким образом, часть общей силы, которая действует на крепление, будет восприниматься грунтом при его сжатии, а другая часть – геотекстилем при его растяжении.

На рис. 1 приведена схема испытания геотекстиля при продавливании шаром, а на рис. 4 – при продавливании конусом. Диафрагма из геотекстиля опирается на грунт, ограниченный трубкой диаметром  $d_o$  с жесткими стенками высотой  $h_{гр}$ . Влиянием стенок пренебрегаем, так как рассматриваемая модель является фрагментом защитного слоя, образованного множеством фракций диаметром  $d$ .

При малых значениях  $\delta$  деформация грунта будет происходить с выпором, но очень быстро при  $\delta > d/4$  выпор становится невозможным и деформацию слоя грунта высотой  $h_{гр}$  можно рассматривать без бокового расширения, используя известные зависимости при равномерно распределенной нагрузке, когда грунт считается линейно деформированным телом [6, 7]. Приводим эти зависимости:

$$\lambda = a_o p, \quad \lambda = \frac{\Delta V}{V}, \quad a_o = \frac{a}{1 + e_1}, \quad a = \frac{e_1 - e_2}{p},$$

где  $p$  – давление на грунт,  $\Delta V$  – изменение объема грунта,  $V$  – объем грунта до нагружения.

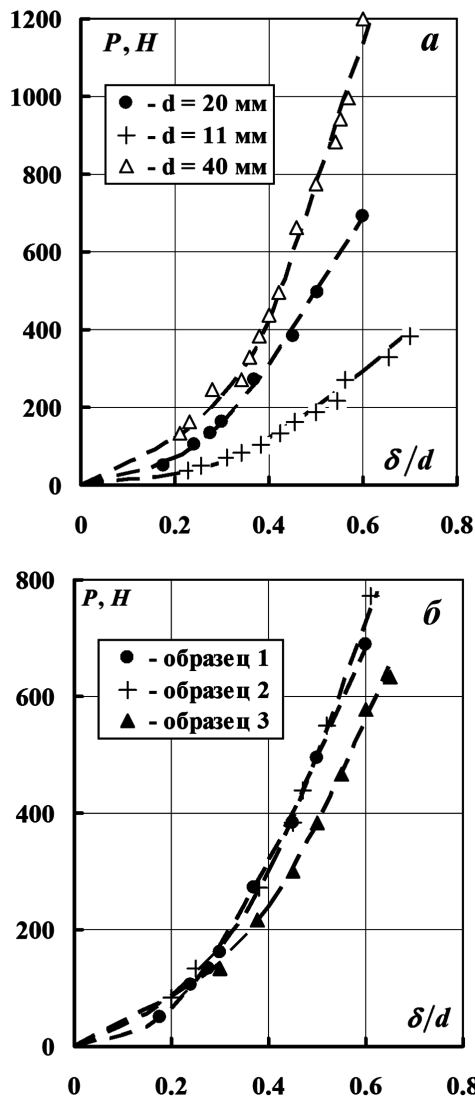


Рис. 2. Экспериментальные зависимости  $P = f(\delta/d)$  при продавливании геотекстиля шаром: а – образец 1,  $\Delta d/d = 0.25$ , б – образцы 1, 2, 3 при  $d = 20$  мм,  $\Delta d/d = 0.25$

$$V = \frac{\pi d_o^2}{4} h_{гр}, \quad h_{гр} \geq 5d_o.$$

При продавливании шаром

$$\Delta V = \frac{\pi(\delta - h_1)}{12} (d_o^2 + a_1^2 + d_o a_1) + \frac{\pi}{3} h_1^2 \left( \frac{3d}{2} - h_1 \right).$$

При продавливании конусом

$$\Delta V = \frac{\pi d_o^2 \delta}{12},$$

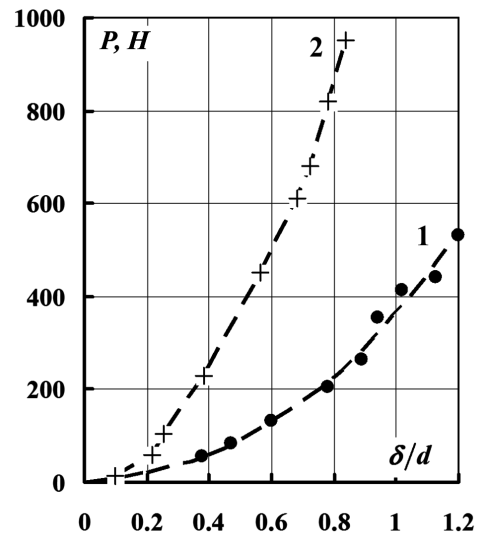


Рис. 3. Экспериментальные зависимости  $P = f(\delta/d)$  при продавливании геотекстиля шаром: 1 – образец 1 при  $d = 17.5$  мм,  $\Delta d/d = 0.43$ , ткань не опирается на грунт, 2 – образец 1 при  $d = 17.5$  мм,  $\Delta d/d = 0.43$ , ткань опирается на рыхлый песок

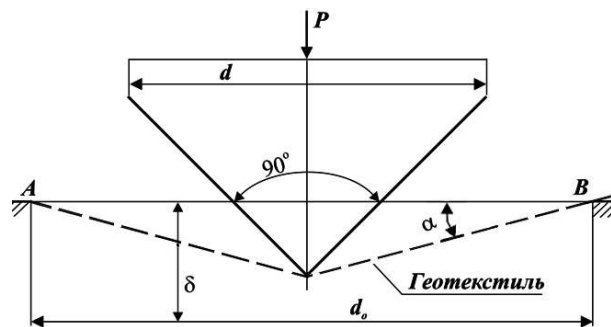


Рис. 4. Поперечное сечение при продавливании геотекстиля конусом

где  $a$  – коэффициент сжатия (уплотнения) грунта, определяется по компрессионной кривой;  $e_1$  – коэффициент пористости грунта до нагружения;  $e_2$  – коэффициент пористости грунта при давлении  $p$ .

Силу противодействия грунта  $P_{гр}$  находим по зависимости

$$P_{гр} = \frac{\pi d_o^2}{4} p.$$

В таблицах 2 и 3 приведены результаты определения  $P_{гр}$  при продавливании геотекстиля шаром и конусом для различных грунтов. В этих таблицах в опытах с песком рыхлым –  $p = 0 \div 1$  кг/см<sup>2</sup> и  $a_o = 0.0183$  см<sup>2</sup>/кг,  $p = 1 \div 2$  кг/см<sup>2</sup> и  $a_o = 0.0116$  см<sup>2</sup>/кг,  $p = 2 \div 4$  кг/см<sup>2</sup> и  $a_o = 0.0083$  см<sup>2</sup>/кг; с песком плотным –  $p = 0 \div 3$  кг/см<sup>2</sup> и  $a_o = 0.055$  см<sup>2</sup>/кг; в опытах с

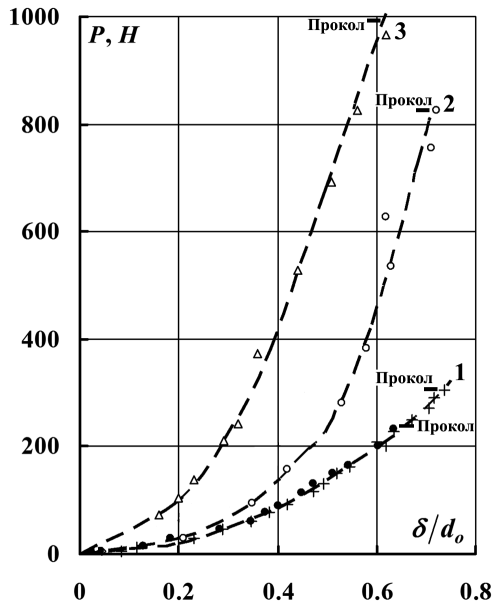


Рис. 5. Экспериментальные зависимости  $P = f(\delta/d_o)$  при продавливание конусом нетканого материала Ровенской фабрики  $\delta_o = 2.06$  мм,  $\gamma_s = 220$  г/м<sup>2</sup>:  
 1 – при  $d = 20$  мм,  $d_o = 25$  мм, 2 – материал уложен на рыхлый мелкозернистый песок при  $d = 20$  мм,  $d_o = 25$  мм, 3 – материал уложен на уплотненный мелкозернистый песок при  $d = 20$  мм,  $d_o = 25$  мм

суглинком моренным –  $p = 0 \div 3$  кг/см<sup>2</sup> и  $a_o = 0.067$  см<sup>2</sup>/кг, с суглинком лессовидным –  $p = 1 \div 3$  кг/см<sup>2</sup> и  $a_o = 0.033$  см<sup>2</sup>/кг. Значения коэффициентов  $a_o$  были получены в результате обработки компрессионных кривых, приведенных в [6].

Из таблиц 2 и 3 видно, что противодействие грунта может достигать значительных величин. Оценить реально  $P_{гр}$  можно только для конкретного расчетного случая, но во всех случаях влияние  $P_{гр}$  на прочность геотекстиля будет позитивным, так как сила, действующая на геотекстиль  $P_{гт}$ , будет

$$P_{гт} = P - P_{гр},$$

где  $P$  – нагрузка на защитный слой с учетом собственного веса крепления и дополнительных нагрузок.

На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости  $P = f(\delta/d_o)$  при продавливании геотекстиля конусом для случаев, когда геотекстиль опирается на песок рыхлый, плотный и для стандартного испытания – без грунта. Для момента прокола геотекстиля при  $\delta/d_o = 0.65$  при стандартном испытании  $P_{гт} = 225$  Н, а при опирании геотекстиля на рыхлый песок  $P = 575$  Н,  $P_{гр} = 575 - 225 = 350$  Н

по опыту и  $P_{гр} \approx 250$  Н по расчету, таблица 3. При опирании на уплотненный песок  $P = 1000$  Н,  $P_{гр} = 1000 - 225 = 775$  Н по опыту и  $P_{гр} \approx 400$  Н по расчету. Считаем, что изложенная выше методика расчета  $P_{гр}$  может быть использована при оценке прочности геотекстиля при продавливании фракциями щебня и гальки защитного слоя крепления откосов гидротехнических сооружений.

#### 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ГЕОТЕКСТИЛЯ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ ФРАКЦИЯМИ ГАЛЬКИ И ЩЕБНЯ

Рассматриваем гибкое крепление из каменной наброски толщиной  $\delta_{кр}$  с использованием геотекстиля при  $m = 3$  и  $m = 5$ . Крепление состоит из геотекстиля, защитного слоя из щебня или гальки фракциями 10 – 50 мм толщиной 10 – 15 см и камня диаметром 10 – 25 см толщиной 45 – 50 см. В качестве геотекстиля используем нетканый материал Ровенской фабрики нетканых материалов  $\delta_o = 2.0$  мм,  $\gamma_s = 220$  г/м<sup>2</sup>,  $\sigma_o = 5.5$  МПа.

Давление на откос от собственного веса крепления составляет

$$p = \delta_{кр} \gamma_{кр} \cos \alpha \cdot g,$$

где  $\gamma_{кр}$  в кг·с/м<sup>3</sup>,  $\delta_{кр}$  в м,  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>,  $\cos \alpha = m/\sqrt{1+m^2}$ ,  $p$  в Н/м<sup>2</sup>.

При действии волн на крепление нагрузка на откос возрастает за счет максимального давления при обрушении волны, которое находим по зависимости П. А. Шанкина [8]

$$p_{max} = 0.11 (8 - m) \sqrt{\lambda} \cdot h,$$

где  $h$  – высота волны в м,  $\lambda = 10 - 20$ ,  $m = 3$  и  $5$ ,  $p_{max}$  в т·с/м<sup>2</sup>.

Вводим коэффициент динамичности 2. Тогда давление на откос будет

$$\Sigma p = p + 2p_{max}.$$

Давление на геотекстиль передается через фракции гальки или щебня защитного слоя. Силу, с которой давит отдельная фракция защитного слоя на геотекстиль и грунт откоса, находим по зависимости

$$P_{з.с} = \frac{\pi d_{з.с}^2}{4} \cdot \frac{\Sigma p}{1 - n}, \quad (2)$$

где  $n$  – пористость защитного слоя крепления,  $d_{з.с}$  – диаметр фракции защитного слоя. Зависимость (2) не учитывает взвешивание аэрированным потоком воды крепления при обрушении волны, что идет в запас прочности.

Табл. 2. Продавливание геотекстиля шаром

$\frac{\delta}{d}$	$\delta$ , мм	$\frac{\alpha^o}{2}$	$a_1$ , мм	$h_1$ , мм	$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	$\lambda = \frac{\Delta V}{V}$	П е с о к				С у г л и н о к			
							рыхлый		плотный		моренный		лессовидный	
							$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н	$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н	$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н	$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н
При $d_o = 25$ мм, $d = 20$ мм, $h_{\text{гр}} = 12.5$ см, $V = 61.5$ см <sup>3</sup>														
0.05	1	6	2.1	0.05	0.17	0.003	0.16	8	0.55	26	0.05	2.4	0.085	4.1
0.10	2	10	3.5	0.16	0.33	0.005	0.29	14	1.00	48	0.08	3.8	0.155	7.5
0.15	3	16	4.5	0.39	0.53	0.009	0.49	24	1.63	78	0.13	6.3	0.26	12
0.25	5	27	9.1	1.04	0.98	0.016	0.87	43	2.90	139	0.24	11.7	0.47	23
0.35	7	37	12	1.8	1.58	0.026	1.42	70	4.7	226	0.39	19	0.76	36
0.50	10	53	16	3.5	2.20	0.035	3.0	147	6.3	303	0.52	25	1.00	48
1.00	20	75	19.4	5.8	2.50	0.041	4.90	242	7.4	355	0.61	29	1.2	57

Табл. 3. Продавливание геотекстиля конусом

$\frac{\delta}{d_o}$	$\delta$ , мм	$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	$\lambda = \frac{\Delta V}{V}$	П е с о к				С у г л и н о к			
				рыхлый		плотный		моренный		лессовидный	
				$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н	$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н	$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н	$\frac{p,}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{\text{гр}},$ Н
При $d_o = 25$ мм, $d = 20$ мм, $h_{\text{гр}} = 12.5$ см, $V = 61.5$ см <sup>3</sup>											
0.04	1	0.164	0.0027	0.147	7.1	0.49	23.5	0.04	1.9	0.082	4.05
0.08	2	0.328	0.0054	0.295	14.4	1.00	48	0.08	3.9	0.164	8.1
0.12	3	0.493	0.0081	0.441	29.7	1.47	71	0.12	5.8	0.246	12.1
0.20	5	0.820	0.0135	0.740	36.0	2.45	118	0.20	9.6	0.410	20.0
0.30	7.5	1.150	0.0200	1.090	53.0	3.64	171	0.30	14.5	0.615	30.0
0.40	10	1.640	0.0270	2.320	114.0	4.90	235	0.40	19.3	0.820	40.0
0.60	15	2.460	0.0405	4.800	240.0	7.35	353	0.60	29.0	1.230	61.0
0.80	20	3.280	0.0540	6.100	294.0	9.80	470	0.80	38.6	1.640	81.0

Выше было получено, что прочность геотекстиля при разрыве, независимо от того, опирается геотекстиль на грунт или нет, продавливается шаром или конусом, можно оценить напряжением при разрыве  $\sigma_{к.р} \approx (1 \div 1.3)\sigma_o$ , где  $\sigma_o$  – прочность геотекстиля при одноосном растяжении, а деформация геотекстиля при разрыве  $\delta/d \approx 0.63$ .

Условие прочности геотекстиля

$$P_{з.с} < P_{\text{гр}} + P_{\text{гт.р.}}$$

Противодавление грунта  $P_{\text{гр}}$  находим, используя методику, изложенную выше. Силу  $P_{\text{гт.р}}$  при разрыве геотекстиля находим по таким зависимостям:

при продавливании шаром или галькой

$$\sigma_{к.р} = \frac{P_{\text{гт.р}}}{\pi d \sin^2 \frac{\alpha}{2} \cdot \delta_o} = [\sigma_o],$$

при продавливании конусом или щебнем

$$\sigma_{к.р} = \frac{P_{\text{гт.р}}}{\pi (2 + 2\delta_o) \delta_o \sin \alpha_1} = [\sigma_o].$$

Допустимое напряжение  $[\sigma_o] = 0.5\sigma_o$ . Уменьшением допустимого напряжения учитываем возможные изменения физико-механических свойств геотекстиля при длительной эксплуатации крепления.

В таблицах 5 и 6 в опытах с песком мелкозернистым  $a_o = 0.0116$  см<sup>2</sup>/кг, а с супесью лессовидной –  $a_o = 0.017$  см<sup>2</sup>/кг.

Табл 4. Значения  $P_{з.с}$

$m$	$p$ , Н/М <sup>2</sup>	$2p_{max}$ , Н/М <sup>2</sup>	$\Sigma p$ , Н/М <sup>2</sup>	$P_{з.с}$ , Н при $d_{з.с}$ , мм				
				10	20	30	40	50
3	8900	44800	53700	4.2	16.8	37.8	67	105
5	9200	29000	38200	3	12	27	48	75

Табл 5. Защитный слой – галька

$d$ мм	$d_o$ , мм	$\delta$ , мм	$\frac{\alpha^o}{2}$	$a_1$ , мм	$h_1$ , мм	$V$ , см <sup>3</sup>	$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	$\lambda = \frac{\Delta V}{V}$	Песок мелко- зернистый		Супесь лессовидная		$P_{ГТ}$ Н	$P_{з.с}$ Н
									$\frac{p}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{ГР}$ , Н	$\frac{p}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{ГР}$ , Н		
Откос $m = 3$ , грунт – песок мелкозернистый рыхлый и супесь лессовидная, $\delta/d = 0.63$														
10	12.5	6.3	62°	8.8	2.6	7.7	0.35	0.046	4.0	49	2.7	32.5	67	4.2
20	25.0	12.6	62°	17.6	5.3	61	3.0	0.049	4.2	202	2.9	139	134	16.8
30	37.5	19.0	62°	26.4	7.9	208	11.3	0.054	4.6	500	3.2	346	200	37.8
40	50.0	25.2	62°	35.2	10.6	490	27.1	0.055	4.6	890	3.2	625	268	67.0
50	62.5	31.5	62°	44.0	13.2	955	56.3	0.059	5.1	1530	3.5	1040	335	105.0

Табл 6. Защитный слой – щебень

$d_o$ , мм	$\delta$ , мм	$\sin \alpha_1$	$h_{ГР}$ , см	$V$ , см <sup>3</sup>	$\Delta V$ , см <sup>3</sup>	$\lambda = \frac{\Delta V}{V}$	Песок мелко- зернистый		Супесь лессовидная		$P_{ГТ}$ Н	$P_{з.с}$ Н
							$\frac{p}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{ГР}$ , Н	$\frac{p}{\text{кг}} \frac{\text{см}^2}$	$P_{ГР}$ , Н		
Откос $m = 3$ , грунт – песок мелкозернистый рыхлый и супесь лессовидная, $\delta/d_o = 0.63$												
10	6.3	0.78	5	3.9	0.165	0.042	3.6	28	2.5	19.2	81	4.2
20	12.6	0.78	10	31.4	1.32	0.042	3.6	112	2.5	77	81	16.8
30	19.0	0.78	15	106	4.46	0.042	3.6	252	2.5	172	81	37.8
40	25.2	0.78	20	250	10.6	0.042	3.6	449	2.5	317	81	67
50	31.5	0.78	25	490	20.6	0.042	3.6	700	2.5	480	81	105

Принимаем при расчетах  $\delta_{кр} = 0.6$  м,  $\gamma_{кр} = 1600$  кг·с/м<sup>3</sup>,  $m = 3$  и  $5$ ,  $h = 1$  м,  $\lambda = 20$ ,  $n = 0.4$ ,  $d_{з.с} = 10, 20, 30, 40$  и  $50$  мм,  $\sigma_o = 5.5$  МПа.

Результаты расчетов приведены в таблицах 4 – 6.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований, которые позволили разработать методику расчета прочности геотек-

тильных рулонных материалов при продавливании фракциями защитного слоя крепления откосов земляных гидротехнических сооружений. Показано, что при защите откоса из песка или лессовидной супеси типовым креплением из каменной наброски толщиной 0.6 м с использованием геотекстиля Ровенской фабрики нетканых материалов при высоте волны до 1 м и защитном слое из гальки или щебня, разрушения геотекстиля при продавливании фракциями диаметром 10–50 мм не будет.

1. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Кривоног В. В., Фридрихсон В. Л. Гибкие крепления откосов земляных плотин гидротехнических сооружений с использованием геотекстиля // Прикладна гідромеханіка.– 2006.– 8(80), N 1.– С. 3-22.
2. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Рычко В. А. Дренаж с волокнистыми фильтрами.– Киев: Наукова думка, 1980.– 214 с.
3. Heerten G., Meyer H., Muhring W. Experience with a flexible interlocking revetment system at the Mittellandkanal in Germany // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 106–114.
4. Pilarczyk K. W. Prototype tests of slope protection systems // Proc. Int. Conf., Institution of Civil Engineers.– London, 1984.– P. 126-136.
5. ГОСТ 29104.8-91 Ткани технические. Метод определения прочности и растяжимости при продавливании шариком.– М.: Издательство стандартов, 1992.– 9 с.
6. Цытович Н. А. Механика грунтов.– М.: Высшая школа, 1979.– 272 с.
7. Гидротехнические сооружения Справочник проектировщика.– М.: Стройиздат, 1983.– 543 с.
8. Шанкин П. А. Воздействие волн на гидротехнические сооружения.– Л.: Речной транспорт, 1955.– 146 с.