

УДК 502/504:626.823.91:519.242

О. А. БАЕВ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ЭКРАНА ИЗ ГЕОМЕМБРАНЫ

С использованием численного эксперимента получены расчетные эмпирические формулы для оценки водопроницаемости облицовки с экраном из геомембраны, проверена адекватность значений по F-критерию Фишера (приведено сравнение результатов расчета по теоретическим и эмпирическим формулам).

Численный эксперимент, водопроницаемость, геомембрана, облицовка, фильтрация.

In this paper using numerical experiments there are received design empirical formulas for estimating water permeability of the facing with geomembrane diaphragm, the adequacy of the values on the F-Fisher criterion is checked (comparison of the calculations results according to theoretical and empirical formulas is given).

Numerical experiment, water permeability, geomembrane, facing, filtering.

В процессе строительства противо-фильтрационных облицовок с полимерными геомембранами наиболее вероятны механические повреждения при их укладке или устройстве защитных покрытий [1–3]. При этом возможны повреждения геомембран в виде малых отверстий – проколов. Для оценки водопроницаемости экрана из геомембраны целесообразно провести исследования с применением плана численного эксперимента.

Представим схему водопроницаемости облицовки с точки зрения физики явления (рис. 1).

Процесс фильтрации через повреждение в виде малых отверстий экрана из геомембраны происходит под действием пьезометрического напора относительно плоскости сравнения 0–0 (рис. 1а): $H = h_0 + \delta_0$.

При этом в зоне влияния отверстия наблюдается движение фильтрационного потока, которое имеет осесимметричный характер относительно оси. В подэкрановом основании происходит растекание фильтрационного потока вниз и в стороны не только под действием напора H , но и под влиянием

капиллярных сил, с образованием куполообразной формы области фильтрации. Если в защитном слое движение фильтрационного потока будет при полном насыщении всех пор грунта с коэффициентом фильтрации $k_{\text{защ}}$, то в подэкрановом основании – при неполном насыщении пор, с коэффициентом влажностепроводности k_w , определяемом, например, по формуле А. И. Голованова [4]:

$$k_w = k_{\text{гр}} \left(\frac{w - w_m}{p - w_m} \right)^5,$$

где w – влажность при полной влагоемкости; w_m – максимальная гидроскопичность; p – пористость грунта.

В случае, когда в подэкрановом основании залегают грунты с отношением коэффициентов фильтрации $k_{\text{гр}}/k_{\text{защ}} < 10$, то пьезометрический напор в месте отверстия относительно плоскости сравнения 0–0 будет положительным, $h_1 > 0$. При наличии в подэкрановом основании малопроницаемых грунтов с ярко выраженными капиллярными свойствами пьезометрический напор в плоскости может быть отрицательным, $h_1 < 0$, это свидетельствует о наличии вакуума (рис. 1б). В случае, когда в основании будут залежать более проницаемые грунты с $k_{\text{гр}}/k_{\text{защ}} \geq 10$, то в

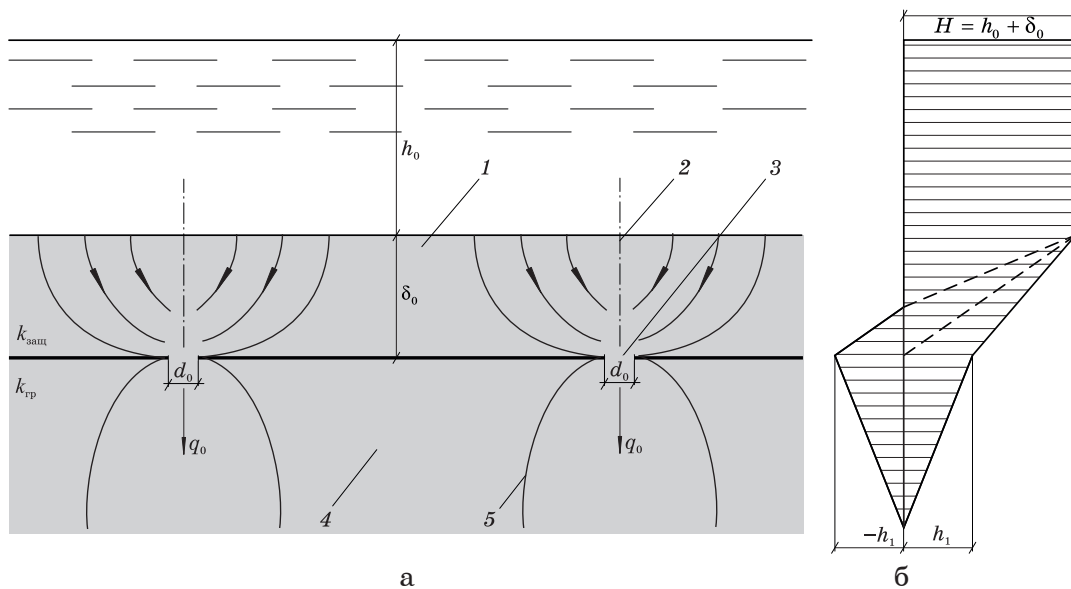


Рис. 1. Схема к водопроницаемости облицовки с экраном из геомембраны: а – расчетная схема; б – эпюра пьезометрического напора по оси отверстия; 1 – защитный слой грунта; 2 – активная зона фильтрации к отверстию экрана в защитном слое; 3 – прокол (микрповреждение) в экране; 4 – подэкрановое основание из коренного грунта; 5 – локальная область фильтрации в подэкрановом основании

плоскости 0–0 экрана пьезометрический напор можно принять равным нулю, $h_1 = 0$.

Имеющиеся расчетные зависимости для оценки водопроницаемости полимерных экранов получены только при наличии повреждений в виде протяженных щелей [1–3]. В связи с этим автор совместно с Ю. М. Косиченко предлагают приближенные формулы для случая, когда $k_{гр}/k_{заш} \geq 10$ ($h_1 = 0$) при наличии малых отверстий:

$$q_0 = \frac{\pi^2 r_0 k_{заш} (h_0 + \delta_0)}{\ln(8\delta_0 / \pi r_0)}; \tag{1}$$

$$k'_{обл} = \frac{\pi^2 k_{заш} \delta_0 n \cdot r_0}{F_0 \ln(8\delta_0 / \pi r_0)}, \tag{2}$$

где h_0 – глубина воды в канале (водоеме); δ_0 – толщина защитного слоя; $q_0 = f_2(k_{заш}, \delta_0, r_0, h_0)$ – коэффициент фильтрации грунта защитного слоя; $k_{гр}$ – коэффициент фильтрации грунта основания экрана; r_0 – радиус прокола (отверстия) в геомембране; n – число проколов (отверстий) в геомембране, F_0 – площадь облицовки.

В этом случае рассматривается фильтрация через единичные отверстия для условий осесимметричного движения потока при наличии в основании экрана сильно-фильтрующих грунтов при $k_{гр}/k_{заш} \geq 10$, что позволяет не учитывать проницаемость основания и считать пьезометрический напор в отверстии равным $h_1 = 0$ (см. рис. 1).

Анализ указанных приближенных зависимостей показывает, что усредненный коэффициент фильтрации экрана из геомембраны с повреждениями $k'_{обл}$ при $k_{гр}/k_{заш} \geq 10$ будет зависеть от четырех

факторов: $k_{заш}$, δ_0 , r_0 , ν_0 (ν_0 – частота повреждений). На фильтрационный расход влияют: $k_{заш}$, r_0 , h_0 , δ_0 . При этом частоту повреждений определяют так:

$$\nu_0 = n / F_0,$$

где n – число отверстий; F_0 – площадь экрана.

На основные характеристики водопроницаемости $k'_{обл}$ и q_0 при $k_{гр}/k_{заш} \geq 10$ будут существенно влиять четыре фактора. Общие эмпирические зависимости для их определения можно записать так:

$$k'_{обл} = f_1(k_{заш}, \delta_0, r_0, \nu_0); \tag{3}$$

$$q_0 = f_2(k_{заш}, \delta_0, r_0, h_0). \tag{4}$$

Поставим целью определение этих общих зависимостей на основе численных экспериментов с использованием метода планирования экспериментов [5–7]. Подобные задачи в области гидротехники решались, например, для определения глубины затопления при прорыве плотин и ледового воздействия на гидротехнические сооружения из габионов и ледового воздействия на гидротехнические сооружения из габионов [8–9].

Схема получения эмпирических зависимостей водопроницаемости облицовки включает следующие этапы: постановку задачи, предварительное планирование, выбор факторов и уровней их изменения, выбор плана моделирования, построение матрицы планирования, расчет коэффициентов уравнения регрессии, получение уравнения регрессии водопроницаемости и проверку ее адекватности экспериментальным данным (рис. 2).

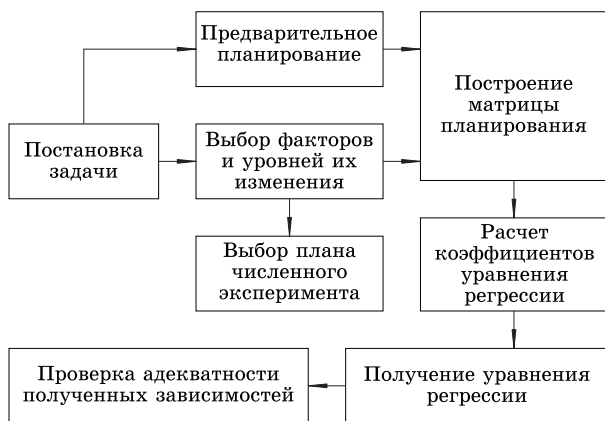


Рис. 2. Схема применения планирования эксперимента

На основе опыта натуральных наблюдений задаем уровни факторов (табл. 1).

Результаты эксперимента записываем в виде матрицы планирования (табл. 2). Принимаем план эксперимента как полуреплику 2^{4-1} , согласно которой для четырех факторов достаточно провести 8 опытов [5].

Значения усредненного коэффициента фильтрации экрана из геомембраны $k'_{обл}$ для каждого опыта рассчитаны по формуле (2). Для дальнейшей обработки логарифмируем значения $k'_{обл}$ и представляем их в табл. 2.

Таблица 1

Факторы и уровни изменения

Фактор	Кодовое обозначение фактора	Уровень фактора		
		Верхний (+1)	Основной (0)	Нижний (-1)
δ_0 , м	x_1	1,2	0,75	0,3
$k'_{защ}$, м/с	x_2	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-8}$	10^{-9}
r_0 , м	x_3	0,0075	0,0040	0,0005
v_0 , шт./м ²	x_4	$1 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Матрица планирования и результаты экспериментов

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 x_2 = x_3 x_4$	$x_2 x_3 = x_1 x_4$	$x_1 x_3 = x_2 x_4$	$k'_{обл}$	$Y(\lg k'_{обл})$
1	+	+	+	-	-	+	-	-	$6,78 \cdot 10^{-13}$	-12,17
2	+	-	-	-	-	+	+	+	$2,02 \cdot 10^{-15}$	-14,69
3	+	+	-	-	+	-	-	+	$6,79 \cdot 10^{-14}$	-13,17
4	+	-	+	-	+	-	+	-	$2,02 \cdot 10^{-12}$	-11,69
5	+	+	+	+	+	+	+	+	$1,48 \cdot 10^{-10}$	-9,83
6	+	-	-	+	+	+	-	-	$4,81 \cdot 10^{-13}$	-12,32
7	+	+	-	+	-	-	+	-	$1,48 \cdot 10^{-13}$	-12,83
8	+	-	+	+	-	-	-	+	$4,81 \cdot 10^{-12}$	-11,32
b_i	-12,25	0,253	2,52	0,678	0,499	0,001	2,92	-2,92	$\sum Y_i = -98,0$	

Примечание: $\bar{Y} = 89,0/8 = -12,25$. Значения «+» в данной таблице соответствуют верхнему пределу, «-» – нижнему пределу каждого фактора, которые представлены в табл. 1.

Определим коэффициенты регрессии линейного уравнения вида $Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3$, (5)

где $Y(\lg k'_{обл})$, x_1, \dots, x_5 – кодированное значение факторов.

По результатам опытов, проведенных в соответствии с матрицей планирования, можно подсчитать коэффициенты регрессии линейного уравнения.

Общие формулы для вычисления коэффициентов регрессии имеют вид [4]:

$$b_0 = \sum_{n=1}^N Y_n / N; \quad b_i = \sum_{n=1}^N x_{in} Y_n / N; \quad b_{ij} = \sum_{n=1}^N x_{ijn} Y_n / N, \quad (6)$$

где x_{in} – значение x_i в n -м опыте; Y_n – значение искомого параметра в том же опыте.

Значения всех коэффициентов уравнения регрессии (5) приведены выше (см. табл. 2).

Зависимость (3) с достаточной точностью можно аппроксимировать уравнением степенного вида:

$$k'_{обл} = c \delta_0^{a_1} k'_{защ}{}^{a_2} r_0^{a_3} v_0^{a_4}. \quad (7)$$

После логарифмирования (7) уравнение линеаризуется:

$$\lg k'_{обл} = \lg c + a_1 \lg \delta_0 + a_2 \lg k'_{защ} + a_3 \lg r_0 + a_4 \lg v_0,$$

где $Y(\lg k'_{обл})$.

В результате математической обработки экспериментальных исходных данных получено уравнение регрессии для Y :

$$Y = -12,25 + 0,253x_1 + 2,52x_2 + 0,678x_3 + 0,499x_4 + 0,001x_1x_2 + 2,92x_1x_3 - 2,92x_2x_3. \quad (8)$$

Подставляя вместо переменных в уравнение (8) их логарифмы, записываем его следующим образом:

$$\lg k'_{\text{защ}} = -12,25 + 0,253 \lg \delta_0 + 2,52 \lg k_{\text{защ}} + 0,678 \lg \bar{r}_0 + 0,499 \lg v_0 + 0,001 \lg \delta_0 \cdot \lg k_{\text{защ}} + 2,92 \lg \delta_0 \cdot \lg r_0 - 2,92 \lg k_{\text{защ}} \cdot \lg \bar{r}_0.$$

После потенцирования окончательно получим зависимость для определения показателя водопроницаемости облицовки степенного вида:

$$k'_{\text{обл}} = 5,5 \cdot 10^{-13} \delta_0^{0,253} k_{\text{защ}}^{2,52} r_0^{0,678} v_0^{0,499} \times (\delta_0 k_{\text{защ}})^{0,001} (\delta_0 r_0)^{2,92} (k_{\text{защ}} r_0)^{-2,92}.$$

После преобразований получим следующий вид эмпирической зависимости:

$$k'_{\text{обл}} = 5,5 \cdot 10^{-13} \delta_0^{3,17} k_{\text{защ}}^{-0,39} r_0^{0,68} v_0^{0,49}. \quad (9)$$

Эмпирическая формула для определения усредненного коэффициента фильтрации облицовки с защитным слоем грунта и геомембраной получит окончательный вид:

$$k'_{\text{обл}} = \frac{\delta_0^{3,17} r_0^{0,68} v_0^{0,49}}{5,5 \cdot 10^{13} k_{\text{защ}}^{0,39}}. \quad (10)$$

Найдем среднюю относительную ошибку аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{Y_i - \bar{Y}_i}{Y_i} \right| 100\% = \frac{1}{8} 1,108 \cdot 100\% = 13,9\%.$$

Полученная относительная ошибка аппроксимации не превышает 15 %, что свидетельствует о незначительном отклонении от расчетных данных, следовательно, о близком совпадении с численным экспериментом.

Проверим адекватность полученного уравнения по F-критерию Фишера. Критерий Фишера позволяет сравнить общий разброс относительно линии регрессии с разбросом в точке [5]. По результатам предварительных вычислений, представленных в табл. 3, находим значение критерия Фишера. Если оно больше критического значения $F > F_{\text{табл}}$, то полученное уравнение регрессии адекватно результатам эксперимента.

Таблица 3

К расчету коэффициента детерминации и критерия Фишера

y	\tilde{y}	$y - \tilde{y}$	$(y - \tilde{y})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(y - \bar{y})^2$
-12,17	-11,42	0,75	0,08	0,563	0,0064
-14,69	-12,56	2,13	2,44	4,542	5,9540
-13,17	-10,14	3,03	0,92	9,181	0,8460
-11,69	-12,84	1,14	0,55	1,299	0,3030
-9,83	-10,15	0,32	2,42	0,102	0,0580
-12,32	-11,27	1,05	0,07	1,103	0,0049
-12,83	-9,86	2,97	0,58	8,821	0,3360
-11,32	-12,56	1,24	0,93	1,538	0,8650
				$\Sigma 27,17$	$\Sigma 6,3730$

Критическое значение F определим по статистическим таблицам, и для уровня значимости $\alpha = 0,05$ будет равняться 3,44.

По результатам расчета получаем: $F = 26,04$; $F_{\text{табл}} = 3,44$.

Поскольку $F > F_{\text{табл}}$ ($26,04 > 3,44$), то полученное эмпирическое уравнение

адекватно результатам эксперимента.

Аналогично расчетам, сделанным для $k'_{\text{обл}}$, производим расчеты для определения расхода q_0 через отверстие в экране из геомембраны.

Задаем следующие уровни факторов (табл. 4).

Таблица 4

Факторы и уровни изменения

Фактор	Кодовое обозначение фактора	Уровень фактора		
		Верхний (+1)	Основной (0)	Нижний (-1)
δ_0 , м	x_1	1,2	0,75	0,3
$k_{\text{защ}}$, м/с	x_2	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-8}$	10^{-9}
\bar{r}_0 , м	x_3	0,0075	0,904	0,0005
h_0 , м	x_4	10	5,5	1,0

После математической обработки данных получаем зависимость расхода через отверстие в экране:

$$q_0 = 1,28 \cdot 10^{-7} \delta_0^{1,68} k_{\text{защ}}^{-0,52} r_0^{1,39} h_0^{0,11}. \quad (12)$$

Эмпирическая формула для определения расхода получит

окончательный вид:

$$q_0 = \frac{\delta_0^{1,68} r_0^{1,39} h_0^{0,11}}{1,28 \cdot 10^7 k_{\text{защ}}^{0,52}} \quad (13)$$

По результатам вычислений, представленных в таблице 5, находим значения критерия Фишера.

Таблица 5

К расчету коэффициента детерминации и критерия Фишера

y	\tilde{y}	$y - \tilde{y}$	$(y - \tilde{y})^2$	$(y - \tilde{y})^2$	$(y - \bar{y})^2$
-6,88	-5,71	-1,17	-0,02	1,37	0,0004
-9,13	-5,68	-3,45	-2,23	11,90	4,973
-8,37	-4,55	-3,82	-1,47	14,59	2,161
-6,31	-6,60	-0,29	-0,59	0,08	0,348
-4,62	-5,96	-1,34	-2,28	1,79	5,198
-6,35	-5,94	-0,41	-0,55	0,17	0,303
-7,73	-5,04	-2,69	-0,83	7,24	0,689
-5,79	-5,08	-0,71	-1,11	0,50	1,232
				$\Sigma 34,76$	$\Sigma 14,90$

Аналогично получаем среднюю относительную ошибку аппроксимации: $\bar{\epsilon} = 7,44 \%$. По результатам расчета получаем: $F = 12$; $F_{\text{табл}} = 3,44$. Так как $F > F_{\text{табл}}$ ($12 > 3,44$), то полученное эмпирическое уравнение и модель адекватны

результатам эксперимента.

Сравнение результатов расчета параметров $k'_{\text{обл}}$ и q_0 по теоретическим формулам с эмпирическими, при принятых значениях факторов для основного уровня по таблицам 1 и 4, приведено в табл. 6.

Таблица 6

Результаты расчета по теоретическим и эмпирическим формулам

Параметр	По формулам (1), (2)	По формулам (10), (13)	Расхождение, %
$k'_{\text{обл}}$, см/с	$0,133 \cdot 10^{-10}$	$0,096 \cdot 10^{-10}$	27,8
q_0 , см ³ /с	$0,201 \cdot 10^{-5}$	$0,30 \cdot 10^{-6}$	49,2

Представленные результаты расчета по теоретическим и эмпирическим формулам в таблице 6 свидетельствуют об их достаточно близких значениях, что подтверждает правильность полученных эмпирических зависимостей. Однако расхождение по ним получается весьма существенным и составляет: для усредненного коэффициента фильтрации – 27,8 %; для фильтрационного расхода через малое отверстие – 49,2 %.

Имеющиеся расхождения можно объяснить принятой схематизацией теоретической модели и принятыми допущениями. Так, в теоретической модели не учитывается взаимодействие рядом расположенных осесимметричных потоков. При этом осесимметричное движение потока переходит в асимметричное. Кроме того, движение потока в защитном слое будет происходить в некоторой активной зоне, а не из бесконечной полосы.

По мнению автора, отмеченные обстоятельства теоретической модели не позволяют получить строгого теоретического решения, следовательно, найденные расчетные формулы являются приближенными, а результаты расчета по ним будут давать погрешности и расхождение с реальными

значениями.

В связи с этим применение численного эксперимента, где все влияющие факторы варьируются в широком диапазоне реальных значений для данной задачи, полученные регрессионные уравнения могут дать более точные результаты искомым характеристикам водопроницаемости. Адекватность эмпирических зависимостей подтверждается критериями Фишера.

Выводы

Для изучения основных характеристик водопроницаемости $k'_{\text{обл}}$ и q_0 экранов из геомембраны с повреждениями в виде малых отверстий достаточно провести по 8 численных экспериментов, учитывающих сочетание четырех факторов: коэффициента фильтрации защитного покрытия, толщину защитного покрытия, радиус отверстия в геомембране, частоту повреждений или глубину воды канала (водоема).

Проведенное сопоставление приближенных теоретических формул с эмпирическими свидетельствует об их расхождение в пределах 30...50 %.

1. Алтунин В. С., Бородин В. А.,

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

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

3. Косиченко Ю. М. Расчет противofильтрационной 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 противозерозионного покрытия с применением объемных георешеток. Особое внимание уделено вопросу выбора расчетной схемы по определению устойчивости системы «водный поток + элемент заполнителя георешетки». Даны предложения автора.

Противозерозионное 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-