

УДК 502/504: 628.3:624.15

**И.Ж. АТАБИЕВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

**А.Б. БАЛКИЗОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова, г. Нальчик, Российская Федерация

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ КОНЦЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДЗЕМНОГО КОНТУРА ВОДОНАПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

*В статье описан принципиально новый метод уменьшения максимальных выходных градиентов фильтрационного потока с использованием геомембран. Аналогичного эффекта можно достичь, используя принципиально новый подход, который заключается в том, что до выхода в нижний бьеф неравномерный фильтрационный поток рассеивается в толще грунта, проходя сквозь горизонтальные полимерные геомембраны с отверстиями. Геомембрана рассеивающего выходного элемента может состоять из цельного полотна с круглыми отверстиями или из отдельных лент, которые, будучи параллельно уложенными, образуют щели. Чтобы предотвратить локальную суффозию грунта вблизи отверстий, следует применять прослойки из минеральных и полимерных защитно-фильтрующих волокнистых или текстильных материалов. При этом они должны укладываться над геомембраной, что не допустит контактной фильтрации вдоль волокон фильтра под рассеивающего выходного элемента.*

*Геомембрана, полимеры, градиент, суффозия, рассеивающий выходной элемент (РВЭ).*

**Введение.** При проектировании подземного контура водонапорных сооружений, в целях уменьшения максимальных выходных градиентов фильтрационного потока, стремятся заглубить концевой участок в грунтовое основание с помощью вертикальных преград в виде низового зуба шпунтового ряда. Это приводит к побочному эффекту, проявляющемуся повышением пьезометрических напоров на флютбет,

а реализация этого мероприятия вызывает значительные материальные затраты.

Аналогичный эффект может быть достигнут при использовании принципиально нового подхода, который заключается в том, что до выхода в нижний бьеф неравномерный фильтрационный поток рассеивается в толще грунта, проходя сквозь горизонтальные полимерные геомембраны с отверстиями (рис. 1) [1, 2].

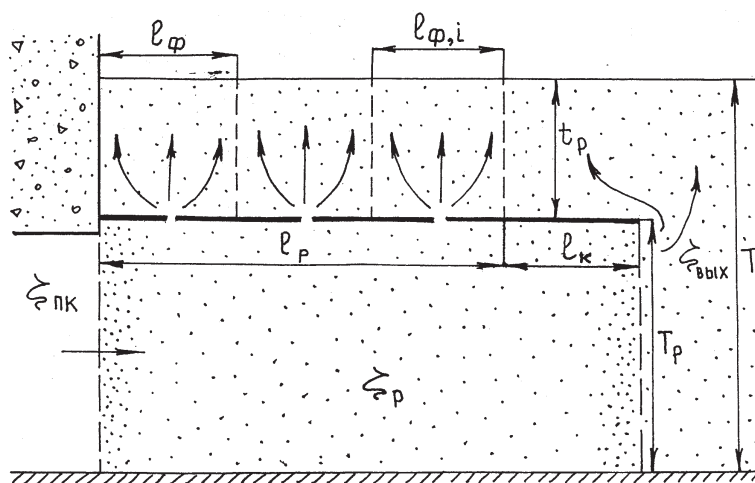


Рис. 1. Схема однослойного рассеивающего выходного элемента

Геомембрана рассеивающего выходного элемента (РВЭ) может состоять из цельного

полотнища с круглыми отверстиями (рис. 2, а) или из отдельных лент, которые, будучи

параллельно уложенными, образуют щели (рис. 2, б). Чтобы предотвратить локальную суффозию грунта вблизи отверстий, следует применять прослойки из минеральных и полимерных защитно-фильтрующих волоконистых или текстильных материалов [3]. При этом они должны укладываться над геомембраной, что не допустит контактной фильтрации вдоль волокон фильтра под РВЭ.

Технологически наиболее простым является устройство РВЭ с постоянной по длине проницаемостью (РВЭ-П). В этом случае радиус отверстий  $r$  или ширина щели  $\delta$  и расстояние между ними  $\ell_0$  будут постоянными.

Необходимо, чтобы по дну нижнего бьефа в начале ( $x = 0$ ) и конце ( $x = \ell_0$ ) РВЭ расчетные величины выходных градиентов не превышали их критических значений, т.е.  $I \leq I_{cr}$ . В силу конструктивных особенностей, заключающихся в неизменном размере отверстий и частоте их расположения, эпюра градиентов (2) (рис. 3) в средней части будет иметь прогиб. Чтобы добиться более полного выравнивания ( $I = \text{const} \leq I_{cr}$ ) этой эпюры (3) (рис. 3), необходимо придать РВЭ некоторую переменную оптимальную проницаемость (РВЭ-Оп), увеличивающуюся по мере с удаления от сооружения.

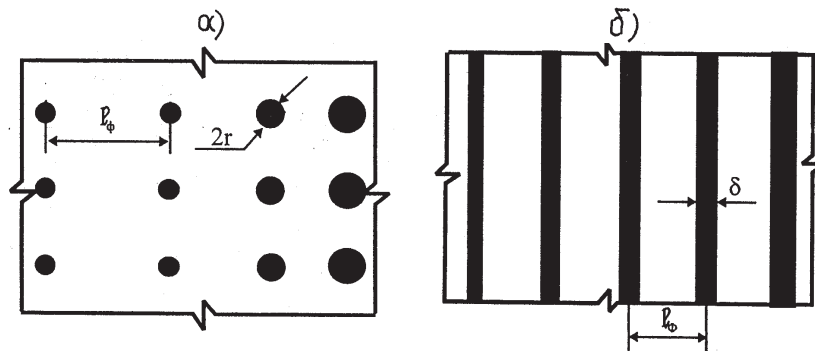


Рис. 2. Расположение круглых отверстий и щелей в геомембране

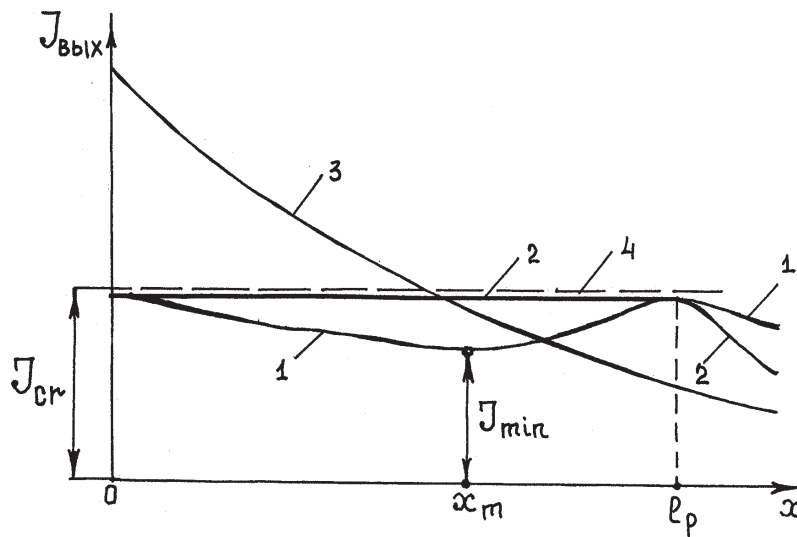


Рис. 3. Вид эпюр выходных градиентов:  
1 – над РВЭ-П; 2 – над РВЭ-Оп; 3 – при отсутствии РВЭ;  
4 – линия местных критических градиентов

**Методы и материалы исследований.** Этого можно добиться тремя основными способами: когда размер отверстий меняется ( $r, \delta \neq \text{const}$ ) при постоянном расстоянии между их центрами ( $\ell_0 = \text{const}$ ); размер отверстий ( $r, \delta = \text{const}$ ) и переменное расстояние ( $\ell_0 \neq \text{const}$ ) являются постоянными; имеет место сочетание различных размеров

отверстий ( $r, \delta \neq \text{const}$ ) и частные расположения ( $\ell_0 \neq \text{const}$ ).

В качестве базовых критериев для последующего расчетного обоснования параметров рассеивающих конструкций служат:

- необходимое значение фильтрационного сопротивления  $\zeta_p$ , оказываемое

РВЭ-потоку, проходящему под ним, для предотвращения фильтрационных деформаций грунтового основания в конце геомембраны ( $I_k \leq I_{cr}$ );

• фильтрационное сопротивление, оказываемое каждым фрагментом РВЭ с одним отверстием  $\zeta_{\phi}$  фильтрационному потоку, проходящему сквозь геомембрану, контролирующее фильтрационную прочность грунтовой пригрузки по всей длине выходного элемента ( $I_{(x)} < I_{cr}$ ).

С учетом общей фильтрационной прочности основания сооружения необходимое значение  $\zeta_p$  должно соответствовать выражению:

$$\zeta_p \geq \frac{H}{T_{cp}} \left( \frac{1}{\alpha \cdot I_{cr}} - \frac{1}{I_{cr,m}} \right) - \zeta_{вых}, \quad (1)$$

где  $H$  – напор воды, действующий на сооружение;  $T_{cp}$  – средняя глубина расположения водоупора по выходным градиентам [4];  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий форму выходного фрагмента подземного контура [4] и в данном случае соответствующий горизонтальному концевому участку геомембраны длиной  $\ell_k = t_p$ ;  $\alpha = 2\sqrt{t_p/T_p}$  (рис. 1);  $I_{cr,m}$  – критический средний градиент напора для основания гидротехнического сооружения;  $\zeta_{вых} = 1.5t_p/T_p + 0.44$  – сопротивление концевому участку геомембраны.

**Результаты исследований.** Если РВЭ предполагается использовать для коррекции выходных градиентов уже запроектированный подземный контур, причем последний не отвечает местной фильтрационной прочностью ( $I > I_{cr}$ ), то  $\zeta_p$  определяется с формулой:

$$\zeta_p \geq \frac{I}{I_{cr}} \cdot \frac{\alpha'}{\alpha} \left( \frac{H}{I_{cr,m} \cdot T_{cp}} + \zeta'_{вых} \right) - \left( \frac{H}{I_{cr,m} \cdot T_{cp}} + \zeta_{вых} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha'$  и  $\zeta'_{вых}$  – соответственно коэффициент формы и сопротивления выходного элемента (уступ, зуб, шпунт) ранее запроектированного подземного контура.

Расчетное значение  $\zeta'$  в зависимости от заданной длины геомембрана РВЭ-П и РВЭ-Оп определяется, соответственно, из выражений [3, 4, 5, 6]:

$$\zeta'_p = \sqrt{\frac{t_{np}}{T_p}} \cdot \frac{1 - h_{вых} / (H_p)_n}{1 - chL_p \cdot h_{вых} / (H_p)_n}, \quad L_p = \frac{\ell_p}{\sqrt{t_{np} \cdot T_p}}; \quad (3)$$

$$\zeta'_p = \frac{\ell_p / T_p}{1 - 0.5 \frac{Ж_p}{Ж_0} \cdot \frac{\ell_p}{T_p} I \left( \frac{\ell_p}{(H)} - h_{вых} \right)}, \quad (4)$$

где  $t_{np} = \ell_{\phi} \cdot \zeta_{\phi} \cdot \alpha_0 / \alpha_p$  – приведенная толщина РВЭ;  $\alpha_0$  и  $\alpha_p$  – коэффициент фильтрации соответственно грунта основания и пригрузка геомембраны.

Пьезометрический напор в начале  $(H_p)_n$  и потеря напора  $h_{вых}$  в конце РВЭ определяются следующим образом [4]:

$$(H_p)_n = H \frac{\zeta_p + \zeta_{вых}}{\Sigma \zeta}; h_{вых} = (H_p)_n = H \cdot \frac{\zeta_{вых}}{\Sigma \zeta},$$

где  $\Sigma \zeta = \zeta_{пк} + \zeta_p + \zeta_{вых}$  – суммарный коэффициент сопротивления;  $\zeta_{пк}$  – коэффициент сопротивления подземного контура, расположенного до РВЭ.

Вычисленное  $\zeta'_p$  необходимо сопоставить с необходимым значением  $\zeta_p$ . Если окажется, что  $\zeta'_p < \zeta_p$ , то длину РВЭ следует увеличить, и наоборот. Длина  $\ell_p$ , задаваемая в (3) и (4), должна находиться в пределах  $\ell_{min} < \ell_p < \ell_{max}$ . Минимальная длина определяется из выражения:

$$\ell_{min} = \zeta_p T_p (1 - 0.5 \frac{Ж_p}{Ж_0} \zeta_p)^{-1}. \quad (5)$$

Максимальная возможная предельная длина РВЭ-П и РВЭ-Оп равны [5, 6]:

$$\ell_{max} = \sqrt{t_{np} \cdot T_p} \cdot Arch \left( \frac{\zeta_p}{\zeta_{вых}} + 1 \right); \quad (6)$$

Исследования показали, что при любых исходных данных расчетная длина РВЭ-Оп будет всегда меньше длины РВЭ-П:

$$\frac{(\ell_p)_n}{(\ell_p)_{оп}} = 1 + \left( 0,20 - 0,05 \frac{1}{\zeta_{вых}} \sqrt{\frac{t_{np}}{T_p}} \right) \frac{\zeta_p}{\zeta_{вых}} > 1. \quad (8)$$

Необходимо принимать во внимание то, что проектная длина геомембраны должна быть кратной ширине фрагмента:

$$\ell_{np} = n \cdot \ell_{\phi} + \ell_k, \quad (9)$$

где  $n$  – число фрагментов, определяемое после округления числа  $n' = \ell_p / \ell_{\phi}$ . Концевой непроницаемый участок  $\ell_k$  необходим для сглаживания максимума выходных градиентов в конце геомембраны.

Размер отверстий определяется исходя из второго базового критерия, который должен отвечать для любого  $n$ -го фрагмента РВЭ следующему условию:

$$\zeta_{\phi,i} \geq H_p(xi) / (I_{cr} \cdot \ell_{\phi,i}), \quad (10)$$

где  $H_p(x_i)$  – пьезометрический напор фильтрационного потока под отверстием  $i$ -го фрагмента от начала РВЭ с ординатой  $x_i = (i-0.5) \ell_{\phi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ );  $\ell_{\phi,i}$  – ширина  $i$ -го фрагмента.

Для постоянных параметров фрагмента РВЭ-П величина  $\zeta_{\phi,n} = \ell_{\phi} = const$  вычисляется для максимального пьезометрического напора в начале геомембраны  $(H_p)_n$ . Радиус круглого

отверстия «т» и ширина щели  $\delta$  подбираются таким образом, чтобы соблюдались равенства

$$\zeta_{\phi} = \pi^2 \frac{r}{\ell_{\phi}} \operatorname{Arch} \left( ch \frac{\pi t_p}{\ell_{\phi}} / \sin \frac{\pi r}{\ell_{\phi}} \right); \quad (11)$$

$$\zeta_{\phi} = \frac{t_p / \ell_{\phi}}{\delta / \ell_{\phi}} - \frac{1}{\pi} \ln \left[ \cos \left( \frac{\pi}{2} \frac{1}{\delta / \ell_{\phi} + 1} \right) \right]. \quad (12)$$

При  $\ell_{\phi} = t_p$  выражение (11), (12) несколько упрощается, заметим, что предпочтение следует отдавать круглым отверстиям, причем расположенным в вершинах квадрата, так как щели получаются очень узкими и их следует использовать для многослойных РВЭ на слабопроницаемых грунтах [2].

Наиболее удобен расчет РВЭ-Оп, когда меняется диаметр отверстия при постоянном расстоянии между их центрами или шириной фрагмента  $\ell_0 = \ell_{\phi} = \ell_{\phi, n} = \text{const}$ .

Приближенно пьезометрический напор под отверстием  $i$ -го фрагмента

$$H_p(x_i) = h_{\text{вых}} + (H_p)_n - h_{\text{вых}}(i - 0.5 / \ell_{np}) \quad (13)$$

Сравнительный анализ технических характеристик РВЭ-Оп и традиционных конструкций выхода с одинаковым заглублением низового зуба и уступа с горизонтальным непроницаемым бетонным участком передними, равным длине геомембраны  $\ell_r = \ell_p$ , позволил получить соотношение:

$$\frac{I'}{I_p} = \frac{\alpha(\zeta_p + \zeta_{\text{вых}})}{\alpha'(\zeta_p + \zeta_{\text{вых}})}, \quad \zeta_p = \frac{\ell_p}{T_p}, \quad (14)$$

где  $I'$  и  $I_p$  – выходные градиенты, соответствующие низовому шпунту (уступу) и РВЭ-Оп.

Численные расчеты показали, что для реальных случаев ( $t_p / T_p < 0.3$ ;  $\ell_p / T_p < 0.4$ ) выходные градиенты сквозь РВЭ-Оп снижаются в  $I' / I_p = 1,2 \dots 2,0$  раза. При этом следует учитывать экономические показатели, связанные с экономией бетона.

Прослеживая необходимую степень относительного удлинения горизонтального участка подземного контура перед низовым зубом или уступом для достижения эквивалентного эффекта в гашении ( $I' = I_p$ ), предлагается использовать

$$\frac{\ell_p}{\ell_r} = \left( 1 + \frac{S}{T_p} \right) \left( \frac{\ell_p}{T_p} \right)^{-1} \left[ \frac{\alpha}{\alpha'} (\zeta_p + \zeta_{\text{вых}}) - \zeta'_{\text{вых}} \right] \quad (15)$$

Принимая в (15) глубину зуба  $S = 0$ , получим соотношение для выходного усту-

па. Построенные нами графики показали, что удлинение горизонтального бетонного контура перед уступом должно минимум в 3 раза превышать длину геомембраны, а перед шпунтом – более чем в 4 раза.

### Выводы

Таким образом, рассеивающие выходные элементы как по фильтрационным, так и по экономическим характеристикам предпочтительнее, чем применяемые в настоящее время средства снижения максимальных выходных градиентов фильтрации.

Использование выходных элементов подземного контура из дискретно-проницаемых геомембран, работающих на принципе рассеивания фильтрационного потока, позволяет рациональным способом снизить максимальные выходные градиенты в конце подземного контура.

Применение выходных элементов подземного контура из дискретно-проницаемых геомембран равномерно распределяет фильтрационный поток по дну нижнего бьефа и предотвращает фильтрационную деформацию грунта основания.

### Библиографический список

1. Флотбет гидротехнического сооружения. Авт. свид. № 1052617. Бюл. № 44, 1983 / ЮжНИИГиМ. Авт. изобрет. В.Н. Бурдинский, Г.Г. Куковский.
2. Флотбет гидротехнического сооружения. Авт. свид. № 1420102. Бюл. № 32, 1988 / Урал НИИВХ. Авт. изобрет. В.Н. Бурдинский, Г.Н. Бурдинский, И.В. Кривенко.
3. Атабиев И.Ж. Совершенствование конструкций и методов расчетного обоснования рассеивающих выходных элементов подземного контура водонапорных гидротехнических сооружений: Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва: МГПУ, 2000.
4. Чугаев Р.Р. Подземный контур гидротехнических сооружений. Л.: Энергия, 1974.
5. Бурдинский В.Н., Атабиев И.Ж. Расчет рассеивающего выходного элемента постоянной проницаемости подземного контура гидротехнического сооружения // Сб. научн. тр. КБГСХА. Вып. 1: Вопросы эффективности строительства. Нальчик: КБГСХА, 1998. С. 140-147.
6. Бурдинский В.Н., Атабиев И.Ж. Фильтрация сквозь рассеивающий выходной элемент подземного контура оптимальной проницаемости // Вопросы повышения эффективности строительства: Сб. научн. тр. КБГСХА.

Вып. 1: Вопросы эффективности строительства. Нальчик: КБГСХА, 1998. С. 147-151.

Материал поступил в редакцию 18.05.2016 г.

#### Сведения об авторах

**Атабиев Исхак Жафарович**, доцент, кандидат технических наук ФГБОУ

ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; e-mail: atabiev-ig@mail.ru.

**Балкизов Афрасим Баширович**, доцент, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО КБГАУ им. В.М. Кокова, 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 1в; e-mail: afrosim\_1960@mail.ru

#### I.ZH. ATABIEV

Federal state budgetary educational institution «Russian state agrarian university – MAA named after С.А. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

#### A.B. BALKIZOV

Federal state budgetary educational institution of higher education FSBEI HE «Kabardian – Balkar state agrarian university named after V.M. Kokov», Nalchik, Russian Federation

## IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF END ELEMENTS OF THE UNDERGROUND CONTOUR OF WATER PRESSURE FACILITIES

*The paper shows a fundamentally new method of reducing maximum output of the filtration flow gradients with the use of geomembranes. A similar effect can be achieved by using a fundamentally new approach which is that in the downstream uneven filtration flow is dissipated in the soil column, passing through a horizontal polymer geomembrane with holes. The geomembrane of the scattering output element may consist of solid panels with round holes or individual strips that will be laid parallel to form slits. To prevent local soil boil near the holes it is necessary to use a layer of mineral and polymeric protective – filtering fibrous or textile materials. However, they must be placed over the geomembrane that will not allow contact filtration along the filter fibers under the scattering output element.*

*Geomembrane, polymers, gradient, boil, scattering output element (SOE).*

#### References

1. Flyutbet hidrotehnicheskogo sooruzheniya. Avt. Svid. № 1052617. Bul. № 44, 1983 / YuzhNIIGiM. Avt. izobret. V.N. Burdinsky, G.G. Kukovsky
2. Flyutbet hidrotehnicheskogo sooruzheniya. Avt. Svid № 1420102. Bul. № 32, 1988 / Ural NIIVH. Avt. izobret. V.N. Burdinsky, G.N. Burdinsky, I.V. Krivenok.
3. Atabiev I.Zh. Sovershenstvovanie konstruktsij i metodov raschetnogo obosnovaniya rasseivayushchih vyhodnyh elementov rasseivayushchih vyhodnyh elementov vodonapornyh hidrotehnicheskikh sooruzhenij: Avtoref. dis. tehn. nauk. Moskva: MGPU, 2000.
4. Chugaev R.R. Podzemnyy contur hidrotehnicheskikh sooruzhenij. L.: Energiya, 1974.
5. Burdinsky V.N., Atabiev I.Zh. Raschet rasseivayushchego vyhodnogo elementa postoyannoj pronitsaemosti podzemnogo contura hidrotehnicheskikh sooruzhenij // Sb. nauchn. tr. KBGSHA. Vyp. 1: Voprosy effektivnosti stroiteljstva. Nalchik: KBGSHA, 1998. S. 140-147.

6. Burdinsky V.N., Atabiev I.Zh. Filjtratsiya skvozij rasseivayushchij vyhodnoj element podzemnogo contura optimalnoj pronitsaemosti // Voprosy povysheniya effektivnosti stroiteljstva. Sb. Nauchn. Tr. KBGSHA, Vyp. 1: Voprosy effektivnosti stroiteljstva. Nalchik: KBGSHA, 1998. S. 147-151.

The material was received at the editorial office  
18.05.2016

#### Information about the authors

**Atabiev Iskhak Zhafarovich**, associate professor, candidate of technical sciences, FSBEI HE RGAU-MAA named after С.А. Timiryazev, 127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49; e-mail: atabiev-ig@mail.ru.

**Balkizov Afrasim Bashirovich**, associate professor, associate professor, candidate of technical sciences, FSBEI HE KBSAU named after V.M. Kokov, 360030, KBR, Nalchik, pr. Lenina, 1v; e-mail: afrosim\_1960@mail.ru