

И.Ж. АТАБИЕВ, А.С. БАБКИН

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

ОСОБЕННОСТИ ОБТЕКАНИЯ НАКЛОННОЙ НИЗОВОЙ ЗАВЕСЫ ПРИ ВЫХОДЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА В НИЖНИЙ БЬЕФ

В статье проведен расчет и анализ противofильтрационной эффективности низовых наклонных преград подземного контура водопропускных сооружений. Особый интерес представляет выявление характерных особенностей обтекания наклонной низовой завесы в наиболее опасной зоне при выходе фильтрационного потока в нижний бьеф. Расчет произведен на основе работ С.Н. Нумерова для вертикального выходного шпунта и для горизонтального экрана в основании водобоя. В процессе моделирования вращения завесы вокруг выбранной точки фиксировались положения, соответствующие углам β кратным 90° , и вычислялись основные характерные параметры: $\zeta_{\text{вых}}$ – коэффициент фильтрационного сопротивления на выходе в нижний бьеф; α – коэффициент формы, указывающие на очертания выходного элемента. Что позволяет осуществить разработку инженерных мероприятий, обеспечивающих несущую способность оснований и устойчивость сооружения, требуемую долговечность сооружения и его основания. При необходимости уменьшение перемещений, улучшение напряженно-деформированного состояния системы сооружение-основание, снижение противодействия и фильтрационного расхода и также уточненный расчет фильтрационной прочности основания, противодействия воды на сооружение и фильтрационного расхода, а при необходимости – объемных фильтрационных сил и изменения фильтрационного режима при изменении напряженного состояния основания. Выполненные гидромеханические исследования относятся к случаям, когда шпунты располагаются в средней части подземного контура и часто реализуются только с помощью численных и численно-графических методов.

Фильтрационный поток, шпунт, обтекание, завеса, нижний бьеф, горизонтальный экран, основание водобоя.

Введение. Особый интерес представляет выявление особенностей обтекания наклонной низовой завесы в наиболее опасной зоне при выходе фильтрационного потока в нижний бьеф. В своих рассуждениях опирались на частные гидромеханические решения С.Н. Нумерова для вертикального выходного шпунта [1] и автора для горизонтального экрана в основании водобоя [2]. В процессе мысленного вращения завесы вокруг точки 1(3) (рис. 1, а) фиксировались положения, соответствующие углам β кратным 90° и вычислялись характерные параметры: $\zeta_{\text{вых}}$ – коэффициент фильтрационного сопротивления на выходе в нижний бьеф; α – коэффициент формы, указывающие на очертания выходного элемента. Начальным положением можно считать, когда завеса (шпунт) вертикален $\beta = 0$ (рис. 1, б) и справедливо решение С.Н. Нумерова. При повороте на $\beta = +90^\circ$ (рис. 1, в) справедливо гидромеханическое решение автора для горизонтального экрана. Если $\beta = +180^\circ$ или $\beta = -90^\circ$, то завеса 1-2-3 совпадает с вертикальной гранью 1-8, а во втором случае

с подошвой сооружения 3-4 (рис. 1. а.), что для обоих вариантов равносильно отсутствию завесы ($S = 0$) и расчетные формулы соответствуют выходному уступу [1].

Материалы и методы исследований.

Для приведенного максимального градиента, выходящего из-под наклонной завесы, применима преобразованная формула Р.Р. Чугаева [3]:

$$I_r = I_r = 1 / (\zeta_{\text{н вых}}) \cdot \alpha_{\text{н}} \quad (1),$$

где $I_r = h_{\text{вых}} \frac{T_1}{I_{\text{вых}}}$ – приведенное значение максимального выходного градиента; $h_{\text{вых}}$ – потеря пьезометрического напора на выходе при обтекание наклонной завесы; $\zeta_{\text{н вых}}$ – коэффициент сопротивления наклонной завесы; $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент формы наклонной завесы.

По опорным точкам, которые соответствуют углам $\beta = 0$; $\beta = 90^\circ$; $\beta = 180^\circ$; и $\beta = -90$ были проведены расчеты для различных значений a/T , s/T , построены соответствующие графики функций $\zeta_{\text{н вых}}$ и $\alpha_{\text{н}}$. Математические формализации этих графиков должны удовлетворять следующим требованиям: они должны быть про-

сты; из них должны естественным образом следовать частные случаи для вертикального шпунта и горизонтального экрана; их использование в формуле (1) должно в наилучшей степени соответствовать экспериментальным значениям приведенных выходных градиентов. После численного анализа ряда вариантов и сопоставления их с несколькими сериями экспериментов

с горизонтальным фрагментом подземного контура и наклонной завесой, этим требованиям более всего отвечали следующие зависимости:

$$(\zeta_H)_{\text{ВЫХ}} = \zeta_{\text{ш}} (1 - \beta / 90^\circ) + \zeta_{\text{ЭК}} \beta / 90^\circ + 0,44 \quad (2)$$

$$\alpha_H = \alpha_H \cdot \cos \beta + \alpha_{\text{ЭК}} \cdot \sin \beta \quad (3)$$

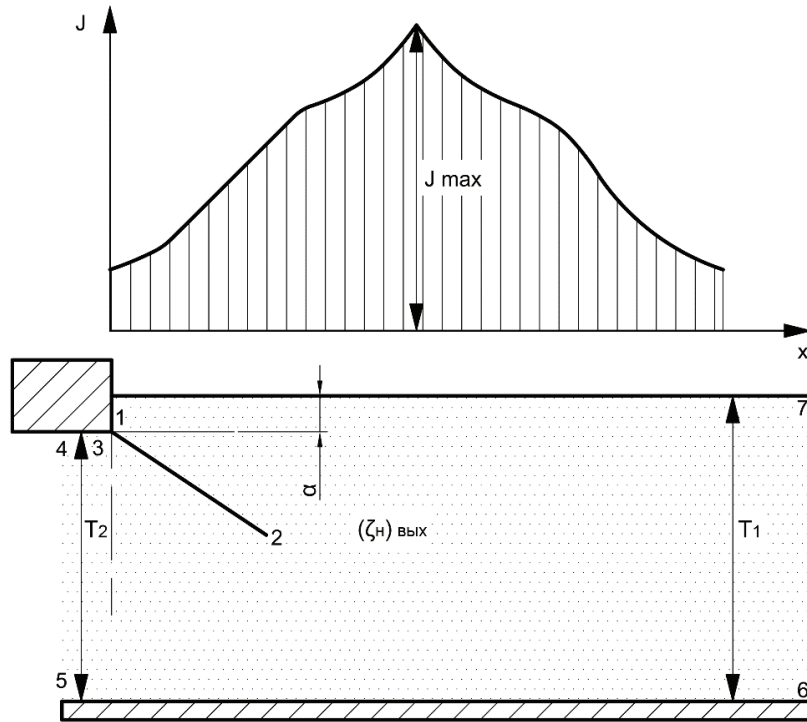


Рис. 1. а. $0 < \beta < 90^\circ$

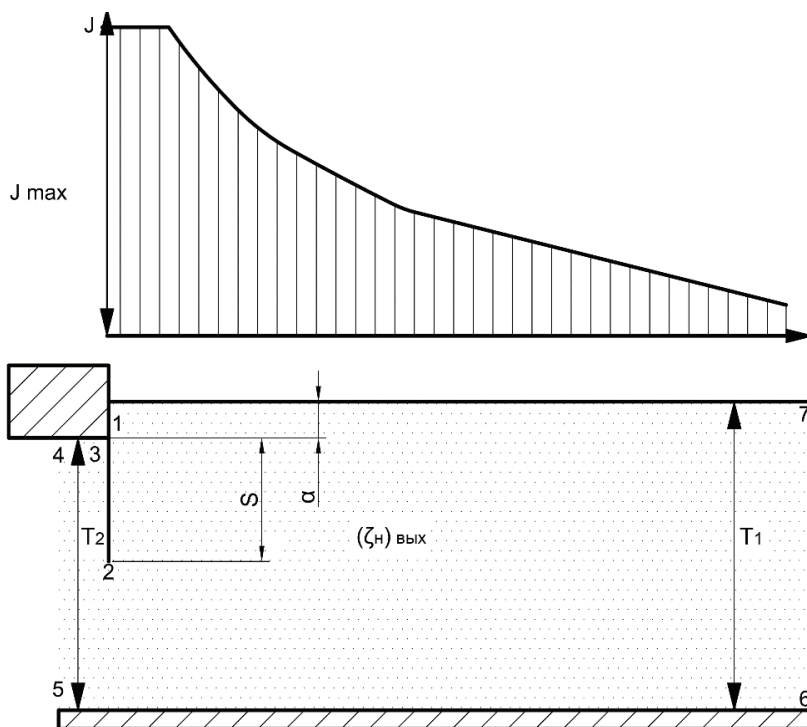


Рис. 1. б. $\beta = 0$

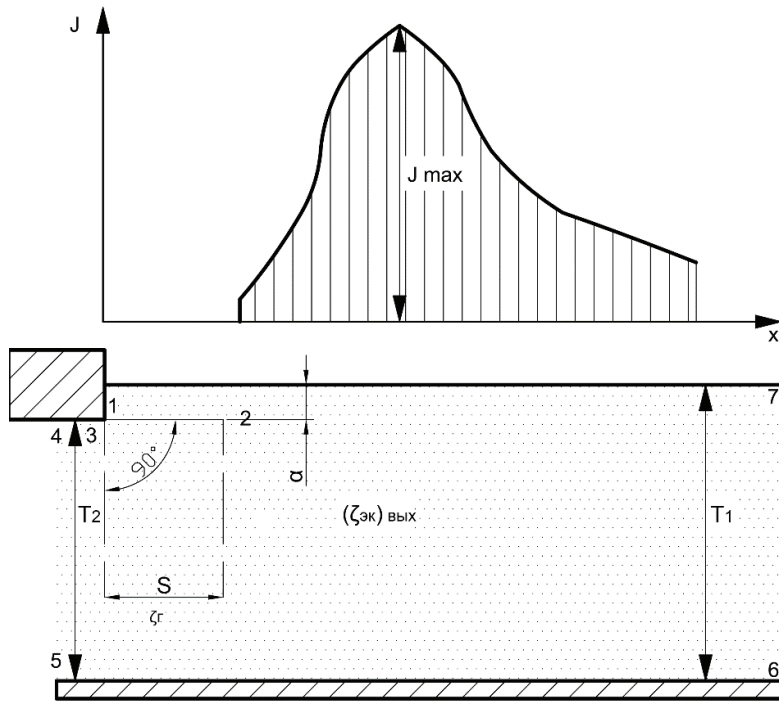


Рис. 1. в. $\beta = +90^\circ$

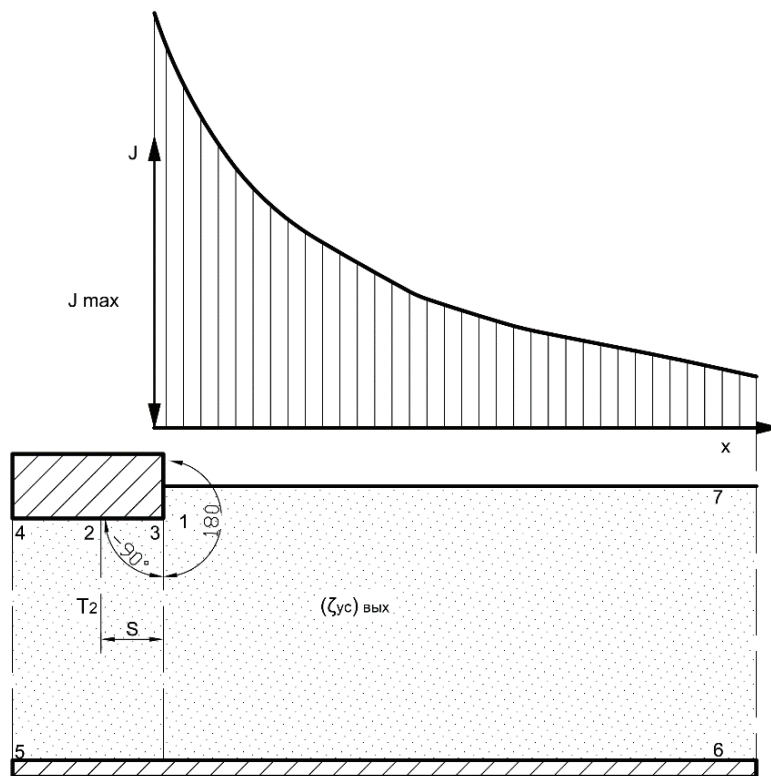


Рис. 1. г. $\beta = +90^\circ 180^\circ$

Формулы (2) и (3) справедливы для гидравлически целесообразных значений $0 < \beta < 90^\circ$ (рис. 1). В них $\zeta_{ш}$ и $\zeta_{эк}$ могут быть вычислены по формуле Р.Р. Чугаева [3], полученной на основании точного решения С.Н. Нумепова [1]

$$\zeta_{ш} = \frac{\alpha}{T_1} + 1,5 \frac{S}{T_2} + 0,5 \frac{S}{T_2} \left[1 - 0,75 \frac{S}{T_2} \right]^{-1}, \quad 0 \leq \frac{S}{T_2} \leq 0,8 \quad (4)$$

Атабиев И.Ж. [4, 2]

$$\zeta_{ш} = \frac{\alpha}{T_1} + 4 \frac{S}{T_2} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{S}{T_2}} \right]^{-1}, \quad 0 \leq \frac{S}{T_2} \leq 0,8 \quad (5)$$

$$\zeta_{эк} = \frac{S}{T_2} + \frac{1}{\pi} \left(\ln \frac{T_1}{T_2} + \frac{\alpha}{T_2} \ln \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (6)$$

или

$$\zeta_{\text{ак}} = \frac{S}{T_2} + \frac{1,5\alpha}{1 + 2\alpha / T_1} \quad (7)$$

Значения коэффициентов формы определяется по зависимостям Р.Р. Чугаева [3]

$$\alpha_{\text{ш}} = \sqrt{\sin \left[0,5\pi \left(\frac{s}{T_1} + \frac{a}{T_1} \right) \right]} \quad (8)$$

Атабиев И.Ж. [2]

$$\alpha_{\text{н}} = 2\sqrt{\frac{a}{T_1}} \quad (9)$$

Зависимости для максимальных выходных градиентов в вертикальные и наклонные завесы можно записать в следующей форме [3]:

$$I_{\text{ш}} = \frac{H}{T_1} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{ш}} \cdot \zeta}; \quad I_{\text{н}} = \frac{H}{T_1} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{н}} \cdot \zeta} \quad (10),$$

где H – напор воды, действующий на сооружение; $\Sigma\zeta$ и $\Sigma\zeta'$ – суммарные коэффициенты сопротивления подземных контуров, в конце которых расположены, соответственно, вертикальная и наклонная завеса.

Соотнеся между собой выражения (10), легко получить:

$$I_{\text{ш}} / I_{\text{н}} = \frac{\left(\frac{\Sigma\zeta'}{\Sigma\zeta} \right) \alpha_{\text{н}}}{\alpha_{\text{ш}}} \quad (11).$$

Величины $\zeta_{\text{ш}}$ и $\zeta_{\text{н}}$ в общей сумме $\Sigma\zeta$ и $\Sigma\zeta'$ занимают незначительную долю. Это означает, что соотношение $\frac{\Sigma\zeta'}{\Sigma\zeta}$ весьма близко к единице. Тогда из (11) следует пропорция указывающая, что выходные градиенты непосредственным образом зависят только от коэффициента формы,

$$I_{\text{ш}} / I_{\text{н}} = \frac{\alpha_{\text{н}}}{\alpha_{\text{ш}}} \quad (12)$$

по которой (12) построены графики (рис. 2) указывающие, что при повороте вертикальной завесы на 90° при отношении ее длины к величине заглубления подошвы $S/a = 1 \dots 2$, эффективность снижения градиентов изменяется приблизительно на 10%. Если (8) упростить до вида

$$\alpha_{\text{ш}} = \sqrt{\left[0,5\pi \left(\frac{s}{T_1} + \frac{a}{T_1} \right) \right]} \quad (13)$$

(это вполне допустимо, когда $S + t < 0,7T_1$), то не трудно показать, что при $S/T = 1,55$ угол поворота не влияет на выходные градиенты ($I_{\text{ш}} / I_{\text{н}} = 1$). Тогда в случае $S/a_1 < 1,55$, данная завеса при любых β эффективнее вертикальной, а при относительно длинной завесе $S/a > 1,55$, вертикальное ее положение, с гидравлической точки зрения, целесообразнее. Однако следует иметь в виду, что если $\beta = 0$, то увеличивается фильтрационное противодействие на подземный контур и повышаются затраты на заглубление завесы в грунт основания.

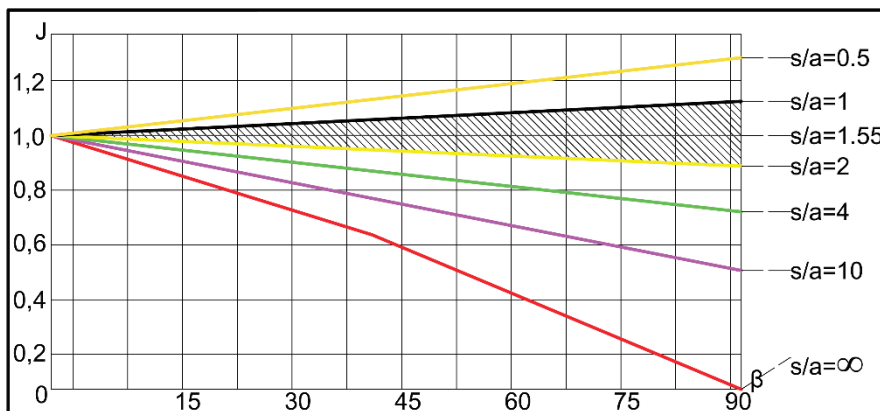


Рис. 2. Графики относительных выходных градиентов $\bar{J}_{\text{н}} = J_{\text{ш}} / J_{\text{н}}$ в зависимости от угла поворота завесы

На практике возможна ситуация, когда погружение завесы (шпунта) окажется ограниченной из-за наличия на глубине T_s каменных отложений. Тогда удлинение S ока-

жется возможным только за счет увеличения угла наклона β (рис. 3). Учитывая в (1) – (3) зависимость $S = T \cdot \sin \beta$, были приведены расчеты, в которых для удобства анализа опериро-

вали относительными величинами $S = S / S_{\min}$ и $I = I_r / I_{r\min}$, где $S_{\min} = T_s$, а $I_{r\min}$ соответствует $\beta = 0$. На (рис. 3) изображены графики изменения показателя \bar{S} / \bar{I} , указывающего на относительное увеличение длины завесы к следующему за этим относительному снижению выходных градиентов в зависимости от угла β .

Вполне очевидно, что чем выше отношение S/I , тем менее эффективна завеса. Согласно построенным кривым, с противофильтрационной точки зрения, рациональным углом наклона можно признать $\beta = 45^\circ$ и не более чем 60° . Однако окончательный вывод следует делать после технико-экономического расчета стоимости производства работ.

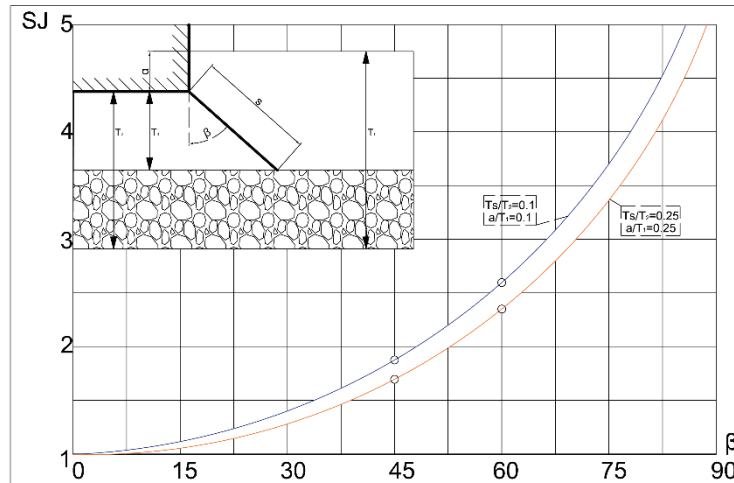


Рис. 3. Графики показателя эффективности удлинения завесы \bar{S} / \bar{I} при ограниченном заглублении поворота завесы в зависимости от угла ее наклона

Выводы

1. При ограниченном погружении завесы, удлинение завесы возможно за счет увлечения угла наклона β .
2. Относительное увлечение длины завесы приводит к относительному снижению выходных градиентов в зависимости от угла β .
3. Чем выше соотношения S / J , тем менее эффективна наклонная завеса.
4. Наиболее рациональным углом наклона завесы можно признать $\beta = 45^\circ$, но не более $\beta = 60^\circ$.

Библиографический список

1. Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. – М.: Гостехиздат, 1953. – 248 с.
2. Бурдинский В.Н., Атабиев И.Ж. Исследование фильтрации из-под водобоя противофильтрационной геомембраной в основании. / В кн.: Основные направления научного обеспечения агропромышленного комплекса КБР. (Материалы научно-производственной конференции). – ч. III. – Нальчик: КБГСХА, 1999. – С. 200-211.

3. Чугаев Р.Р. Подземный контур гидротехнических сооружений. – Л.: Энергия, 1974. – 237 с.
4. Бурдинский В.Н. Определение коэффициентов сопротивления плавных элементов подземного контура рациональных конструкций флотбетов и сопрягающих устоев. / Сб. научн. тр. ЮжНИИГиМ. Новые конструкции и гидравлика гидротехнических сооружений. – Новочеркасск: ЮжНИИГиМ, 1981. – 237 с.

Материал поступил в редакцию 20.02.2018 г.

Сведения об авторах

Атабиев Исхак Жафарович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Прянишникова ул., д. 19; тел.: 8(499)9763344; e-mail: atabiev-ig@mail.ru

Бабкин Александр Сергеевич, аспирант кафедры «Гидротехнические сооружения» ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. Академическая ул., д. 44; тел.: 8(499)9763344; 8(499)9760030; 8(499)9760428; e-mail: atabiev-ig@mail.ru

I.ZH. ATABIEV, A.S. BABKIN

Federal state budgetary educational institution of higher education «Russian state agrarian university-MAA named after C.A. Timiryazev», Moscow, Russian Federation

FEATURES OF FLOWING AROUND THE INCLINED LOWER CURTAIN AT THE FILTRATION FLOW DOWNSTREAM

The article deals with the calculation and analysis of the antifiltration effectiveness of lower inclined barriers of the underground circuit of culverts. Revealing of typical features is of a particular interest for flowing around the inclined lower curtain in the most dangerous zone at the filtration flow downstream. The calculation is made on the basis of S.N. Numerov works for a vertical output pile and horizontal screen at the hearth base. In the process of the curtain rotation modeling around the chosen point the positions were fixed corresponding to the angles β multiple of 90° and the main characteristic parameters were calculated: $\zeta_{\text{отх}}$ – the coefficient of the filtration resistance at the outlet downstream; α – the coefficient of the form indicating the shape of the output element. That allows developing engineering arrangements to ensure the bearing capacity of foundations and stability of the structure, the required durability of the structure and its foundation. When it is necessary – reduction of displacements, improvement of the deformation mode of the system structure – foundation, reduction of back pressure and filtration consumption and also a more precise calculation of the volumetric filtration strength of the foundation, water back-pressure on the structure and filtration flow and, if necessary, – volumetric filtration forces and changes of the filtration mode in case of changing the mode of deformation of the foundation. Mentioning of the feasibility of application and calculations of inclined piles of aprons and slanting oblique spurs of abutments are found in the works of N.N. Pavlovsky, N.N. Verigin, V.S. Kozlov, B.A. Pyshkin and P.F. Filchakov, M.M. Grishin, V.G. Degtyar, M.A. Lavrentyev, P.Ya. Polubarinova-Kochina. The performed hydro-mechanical research refer to the cases when the piles are located in the middle part of the underground circuit and are often realized only by numerical and numerical – graphical methods.

Filtration flow, pile, flowing around, curtain, downstream, horizontal screen, hearth base.

Reference list

1. **Aravin V.I., Numerov S.N.** Teoriya dvizheniya zhidkostej i gazov v nedeformirujemoj poristoj srede. – M.: Gostehizdat, 1953. – 248 s.

2. **Burdinsky V.N., Atabiev I.Zh.** Issledovanie filtratsii iz-pod vodoboya protivofiltratsionnoj geomembranoj v osnovanii. / V ki.: Osnovnye napravleniya nauchnogo obespecheniya agropromyshlennogo kompleksa KBR (Materialy nauchno-proizvodstvennoj konferentsii), ch. III. – Nalchik: 1999. – S.200-211.

3. **Chugaev R.R.** Podzemny kontur gidrotehnicheskikh sooruzhenij. – L.: Energiya, 1974. – 237 s.

4. **Burdinsky V.N.** Opredelenie koeffitsientov soprotivleniya plavnyh elementov podzemnogo kontura ratsionalnyh konstrukt-sij flyutbetov i sopryagayushchih ustoev. / Sb. nauchn. tr. YuzhNIIGiM. Novye konstrukt-sii

i gidravlika gidrotehnicheskikh sooruzhenij. – Novocherkassk: YuzhNIIGiM, 1981. – 237 s.

The material was received at the editorial office
20.02.2018

Information about the authors

Atabiev Iskhak Zhafarovich, associate professor of the chair «Hydraulic engineering structures», FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Pryanishnikova Street, 19. Tel.: +7(499)9763344. E-Mail: atabiev-ig@mail.ru

Babkin Alexandr Sergeevich, post-graduate student of the chair «Hydraulic engineering structures», FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, Pryanishnikova Street, 19. Tel.: +7(499)9763344; +7(499)9760030; +7(499)9760428. E-mail: atabiev-ig@mail.ru