

---

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

---

## IN HIGHER SCHOOL LABS

Известия вузов. Строительство. 2022. № 4. С. 109–118.

ISSN 0536-1052

News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022; (4): 109–118.

ISSN 0536-1052

Научная статья

УДК 556.3.002.56

DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-109-118

### ПРИМЕНЕНИЕ ПЕНОМЕТАЛЛОВ В ПЬЕЗОМЕТРАХ

**Наталья Владимировна Крук, Павел Алексеевич Растовцев**

Сибирский федеральный университет, Политехнический институт, Красноярск,  
Россия

**Аннотация.** Предложен пьезометр гидротехнического сооружения, предназначенный для измерения отметки уровня подземных вод, который имеет заглубленную в грунт перфорированную металлическую трубу, выполненную из отдельных состыкованных и сваренных между собой секций. Нижняя секция снабжена конусным наконечником, в верхней части которого имеется уширение в виде диска. Ствол перфорированной металлической трубы обернут пластиной из пенометалла. Проведен ряд опытов для подбора грунтового материала, в котором возможна эффективная эксплуатация предлагаемой конструкции пьезометра.

**Ключевые слова:** золоотвалы, фильтрация, безопасная эксплуатация, уровень воды, пьезометр

**Для цитирования:** Крук Н.В., Растовцев П.А. Применение пенометаллов в пьезометрах // Известия вузов. Строительство. 2022. № 4. С. 109–118. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-109-118.

Original article

### THE USE OF FOAM METALS IN PIEZOMETERS

**Nataliya V. Kruk, Pavel A. Rastovtsev**

Sibirian Federal University, Polytechnic Institute, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** A piezometer of a hydraulic engineering structure is proposed, designed to measure the of level groundwater, which has a perforated metal pipe buried in the ground, made of separate sections docked and welded together. The lower section is equipped with a conical tip, in the upper part of which there is a broadening in the form of a disk. The barrel of a perforated metal pipe is wrapped with a foam metal plate. A number of experiments have been carried out to select the soil material in which the proposed piezometer design can be used.

**Keywords:** ash dumps, filtration, safe operation, water level, piezometer

**For citation:** Kruk N.V., Rastovtsev P.A. The use of foam metals in piezometers. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2022; (4): 109–118. (In Russ.). DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-109-118.

В настоящее время весьма остро стоит проблема экологически безопасного складирования золы и шлака ТЭС. На ТЭС стран СНГ от сжигания твердого топлива ежегодно образовывалось свыше 100 млн т, а в отвалах было накоплено свыше 1,5 млрд т золошлаковых отходов. Золоотвалы ТЭЦ оказывают отрицательное влияние на экологию (загрязнение поверхностных и подземных вод при фильтрации токсичных стоков, переливах и разрушениях дамб, ветровая эрозия складываемых отходов и загрязнение атмосферы и почвы, разрушение природных ландшафтов, опасные криогенные процессы). В связи с этим будет постоянно возрастать актуальность проблемы мониторинга состояния увеличивающегося объема золоотвалов ТЭС для предотвращения загрязнения окружающей среды [1].

Для отслеживания и оценки экологической ситуации работы золоотвалов с грунтовыми плотинами предусматриваются системы локального экологического мониторинга, включающего комплекс аналитического визуального и инструментального контроля. В автоматизированных системах контроля промышленной безопасности гидротехнических сооружений широко используется пьезометрия как базовая методология производственного измерения гидростатического или гидродинамического давления жидкостей и деформации твердых тел [2].

Существуют технические решения по наблюдательной скважине, которая имеет полностью перфорированную трубу и фильтр, выполненный из фильтрующей ткани, обернутой вокруг ствола перфорированной металлической трубы в два слоя, в то время как в предлагаемом нами техническом решении пьезометр имеет цельную трубу и перфорированную водоприемную часть. Фильтр выполнен из пенометалла, который обернут вокруг ствола только перфорированной части металлической трубы и не превышает по размеру диаметр диска с конусным наконечником [3]. Недостаток этого решения заключается в низкой стойкости фильтрующей ткани к перегибам и истиранию в процессе эксплуатации.

Известно техническое решение скважинного фильтра, содержащего перфорированную трубу и фильтрующий элемент, выполненный с уменьшением размера пор в радиальном направлении от наружной поверхности к внутренней и установленный соосно с наружной поверхностью перфорированной трубы. Фильтрующий элемент выполнен из пенометалла с пространственным ячеистым каркасом, состоящим из многогранных ячеек с проницаемыми гранями, и с возможностью образования внутри пенометалла естественного непрерывного песчаного фильтра из осажденных частиц, механически сцепленных со стохастически ориентированными в пространстве гранями и ребрами ячеистого каркаса. Недостатком данного изобретения является использование трех слоев пенометалла, что ведет к удорожанию и нетехнологичности конструкции [4].

С целью устранения указанных недостатков предложена конструкция пьезометра, содержащая загубленные в грунт металлическую трубу и фильтр. Металлическая труба цельная, перфорированная в нижней части. Она состоит из отдельных состыкованных и сваренных между собой секций. Фильтр в устройстве размещен вокруг ствола перфорированной трубы [5]. Диаметр трубы вместе с толщиной фильтра не превышает размера диаметра диска. Все секции перфорированной металлической трубы должны быть

предварительно изготовлены (диаметр отверстий и шаг подбираются). Нижняя секция снабжена конусным наконечником, имеет уширение в виде диска диаметром, большим чем у трубы и конусного наконечника. Вокруг ствола металлическая перфорированная труба обернута специальной пластиной из пенометалла, который и служит фильтром. Предлагаемая конструкция трубы имеет достаточно малый диаметр и выполняется секциями длиной, например, 0,5–1,0 м для удобства их погружения. Все секции и пластина из пенометалла соединены между собой пайкой (рис. 1).

Погружение перфорированной металлической трубы осуществляется следующим образом. На поверхность грунта устанавливают вертикально нижнюю секцию конусным наконечником вниз. По мере погружения секции трубы вдавливанием вокруг нее образуется скважина диаметром, равным диаметру диска конусного наконечника. Как только нижняя секция будет полностью задавлена (если ее длины недостаточно, то на нее устанавливается, а затем вдавливается следующая секция), торцы секций перфорированной трубы и пластины из пенометалла спаивают [5].

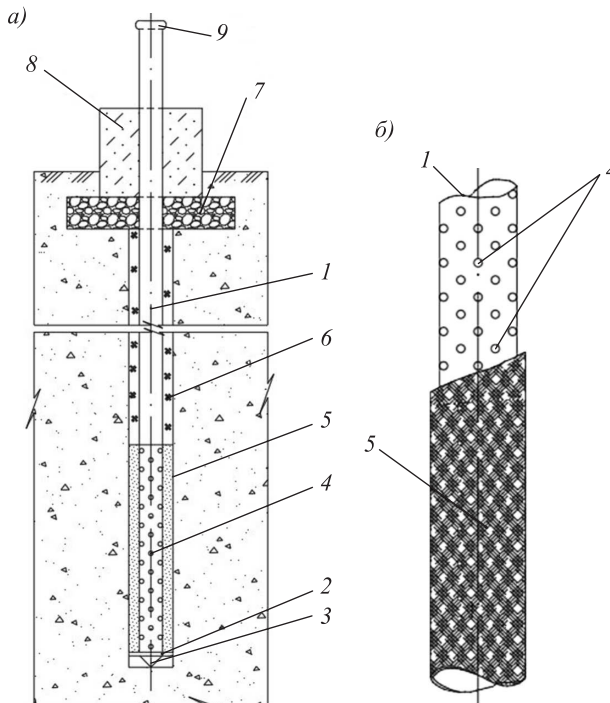


Рис. 1. Общий вид пьезометра гидротехнического сооружения (а) и деталь фильтра пьезометра (б)

1 – перфорированная металлическая труба; 2 – металлический диск; 3 – конусный наконечник; 4 – перфорированные круглые отверстия; 5 – пластина из пенометалла; 6 – засыпной грунт; 7 – цементный раствор; 8 – бетонная тумба; 9 – защитная крышка

Fig. 1. General view of the piezometer of a hydraulic structure (a), piezometer filter detail (b)

1 – perforated metal pipe; 2 – metal disc; 3 – cone tip; 4 – perforated round holes; 5 – foam metal plate; 6 – backfill soil; 7 – cement mortar; 8 – concrete pedestal; 9 – protective cover

Последующие и верхняя секции устанавливаются аналогично. Пространство между фильтром и поверхностью засыпают грунтом, устраивают бут с заливкой цементным раствором, на него помещается бетонная тумба. На трубу пьезометра навинчивается защитная крышка. Приведенные особенности позволяют положительно судить о технологичности, материалоемкости и трудоемкости предлагаемой конструкции.

В процессе эксплуатации пьезометры выходят из строя иногда после 3–4 лет работы в зависимости от конструкции и материалов, применяемых в водоприемниках, свойств грунтов, воды и т.д. Причинами этого могут быть механические, температурные повреждения элементов пьезометров, окисление сеток перфораций, кольматаж их, механическая или химическая суффозия и вынос грунта при неправильно подобранном фильтровом материале и т. п.

Проведен ряд опытов для подбора характеристик металлической губки, используемой для фильтра пьезометра и физико-механических свойств грунтового материала, в который помещается пьезометр. Использован Ni пенoметалл с различными размерами пор, характеристики представлены в табл. 1, внешний вид на рис. 2.

Таблица 1. Основные характеристики пенoметалла

Table 1. The main characteristics of the foam metal

Показатель	Размер пор, PPI (исходной дублируемой матрицы)	
	60	80
Размер пор, мм	0,3–0,48	0,25–0,38
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	4800	6000
Предел прочности при растяжении, МПа	1,8–2,2	2,1–2,4
Коэффициент проницаемости 10 <sup>-9</sup> , м <sup>2</sup>	1,8–3,0	1,0–1,5

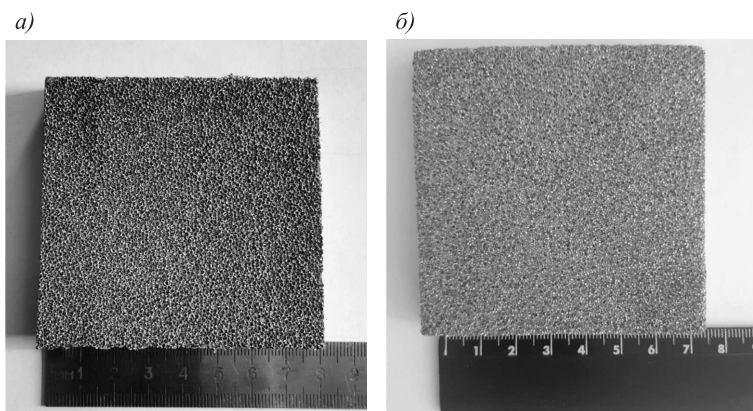


Рис. 2. Внешний вид пенoметалла при пористости PPI 60 (а) и PPI 80 (б)

Fig. 2. The appearance of the foam metal at a porosity of PPI 60 (a) and PPI 80 (b)

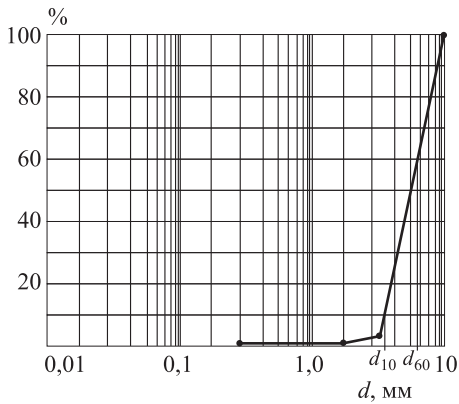


Рис. 3. Кривая зернового состава щебенистого грунта

Fig. 3. Curve of grain composition of crushed stone soil

Таблица 2. Гранулометрический состав первого грунта  
Table 2. Granulometric composition of the first soil

Фракция, мм	Масса фракции грунта, г	Содержание фракции, %
Более 10	976	97,6
10–5	21	2,1
5–2	1	0,1
2–1	–	–
1–0,5	–	–
0,5–0,25	2	0,2
0,25–0,1	–	–
Менее 0,1	–	–

Гранулометрический состав первого образца грунта представлен в табл. 2 и на рис. 3.

Содержание в грунте каждой фракции  $A$ , %, вычислим (с точностью до 1 %) по формуле

$$A = \frac{m_{\phi}}{m_0} \cdot 100,$$

где  $m_{\phi}$  – масса фракции грунта, г;

$m_0$  – масса пробы грунта, взятой для анализа, г.

По результатам исследования состава грунт относится к щебенистым.

По результатам графика  $d_{10} = 5,2$  мм,  $d_{60} = 7,9$  мм.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

$$C_u = \frac{7,9}{5,2} = 1,52.$$

Так как  $C_u$  меньше 3, то полное наименование грунта щебенистый однородный.

Для определения  $K_{\phi}$  за основу был принят метод Г.Н. Каменского [2] (рис. 4). Данный метод основан на теоретической предпосылке о равенстве между скоростью снижения уровня воды и скоростью ее фильтрации через грунт постоянного поперечного сечения.

Прибор для определения коэффициента фильтрации в условиях неустановившегося движения изображен на рис. 4. Прибор наполняется водой до начальной высоты  $h_0$ . С этого момента начинается свободное высачивание фильтрующейся воды через проницаемое дно и через определенные промежутки времени  $t_i$  фиксируется снижение уровня на величину  $S_i$ .

Текущий расход в любой момент времени

$$Q = K_{\omega} \frac{h_0 - S}{l}, \tag{1}$$

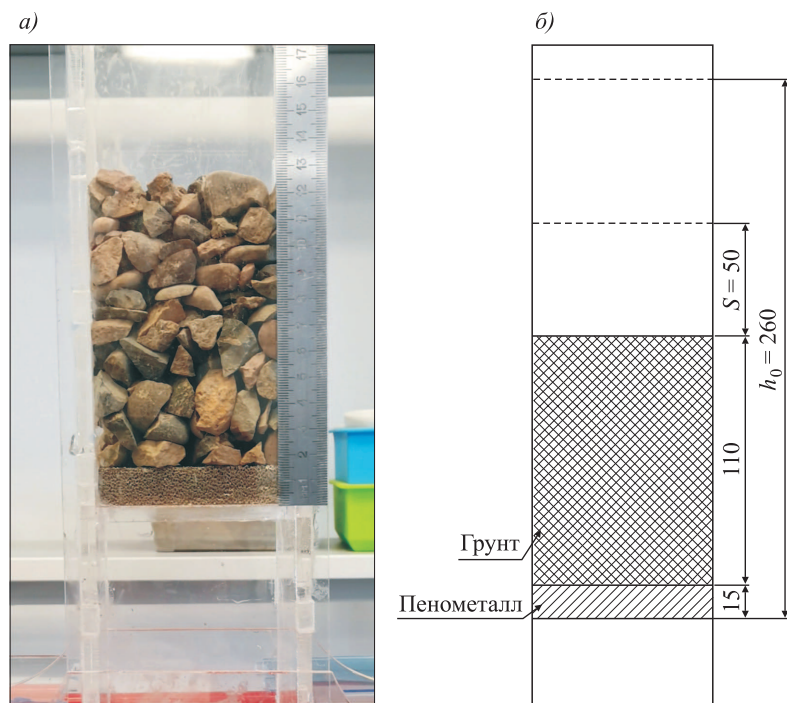


Рис. 4. Опытная установка (а) и расчетная схема (б) к определению коэффициента фильтрации первого грунта по методу Г.Н. Каменского  
 Fig. 4. Pilot plant (a) and design scheme (b) for determining the filtration coefficient of the first soil by the method of G.N. Kamensky

а коэффициент фильтрации равен

$$K_{\phi} = \frac{2,3l}{t} \lg \left( \frac{h_0}{h_0 - S} \right). \quad (2)$$

Результаты измерений и расчет коэффициента фильтрации  $k_{\phi}$  для пенометалла с PPI 60 приведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициент фильтрации  $k_{\phi}$  для пенометалла с PPI 60  
 Table 3. Filtration coefficient  $k_f$  for foam metal with PPI 60

№ п/п	$t''$ , с	$k_{\phi}$ , см/с
1	8,73	415,787
2	8,72	416,2638
3	8,96	405,1139
4	8,83	411,0782
5	8,81	412,0114
6	8,8	412,4796
7	8,81	412,0114
8	8,84	410,6132
9	8,81	412,0114

Примечание. Грунт – щебенистый однородный;  $h_0$  – 17,5 см;  $S$  – 5 см;  $l$  – 12,5 см.

Таблица 4. Коэффициент фильтрации  $k_f$  для пенометалла с PPI 80

Table 4. Filtration coefficient  $k_f$  for foam metal with PPI 80

№ п/п	$t''$ , с	$k_f$ , см/с
1	8,8	412,4796
2	8,62	421,0929
3	8,7	417,2207
4	8,69	417,7009
5	8,81	412,0114
6	8,84	410,6132
7	8,81	412,0114
8	8,83	411,0782
9	8,72	416,2638

Примечание. Грунт – щебенистый однородный;  $h_0$  – 17,5 см;  $S$  – 5 см;  $l$  – 12,5 см.

Таблица 5. Гранулометрический состав второго грунта

Table 5. Granulometric composition of the second soil

Фракция, мм	Масса фракции грунта, г	Содержание фракции, %
Более 10	58	5,8
10–5	382	38,2
5–2	355	35,5
2–1	81	8,1
1–0,5	100	10
0,5–0,25	14	1,4
0,25–0,1	10	1
Менее 0,1	–	–

В результате эксперимента увеличение массы образца пенометалла с PPI 60 не наблюдается, частицы грунта диаметром 0,5–0,25 не задержались в размерах пор 0,3–0,48, характерных для данного пенометалла.

Результаты измерений и расчет коэффициента фильтрации  $k_f$  для пенометалла с PPI 80 показаны в табл. 4.

В результате эксперимента увеличение массы образца пенометалла с PPI 80 не наблюдается, частицы грунта диаметром 0,5–0,25 не задержались в размерах пор 0,25–0,38, характерных для данного пенометалла.

Гранулометрический состав второго образца грунта представлен в табл. 5 и на рис. 5.

По результатам анализа песчаный грунт по составу относится к гравелистому.

По результатам графика (рис. 5)  $d_{10} = 0,44$  мм,  $d_{60} = 2,6$  мм:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}},$$

$$C_u = \frac{2,6}{0,44} = 5,9.$$

Так как  $C_u$  больше 3, то полное наименование грунта гравелистый неоднородный.

Опытная установка и схема для расчета коэффициента фильтрации второго грунта по методу Г.Н. Каменского представлены на рис. 6 [2].

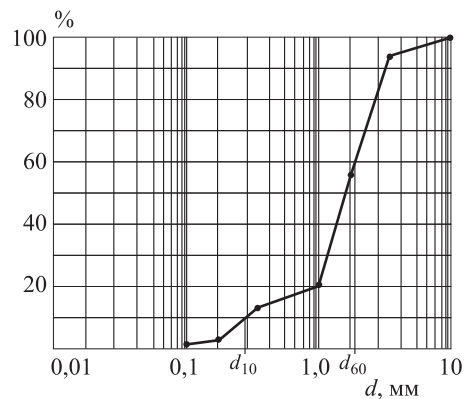


Рис. 5. Кривая зернового состава гравелистого грунта

Fig. 5. Curve of grain composition of gravelly soil

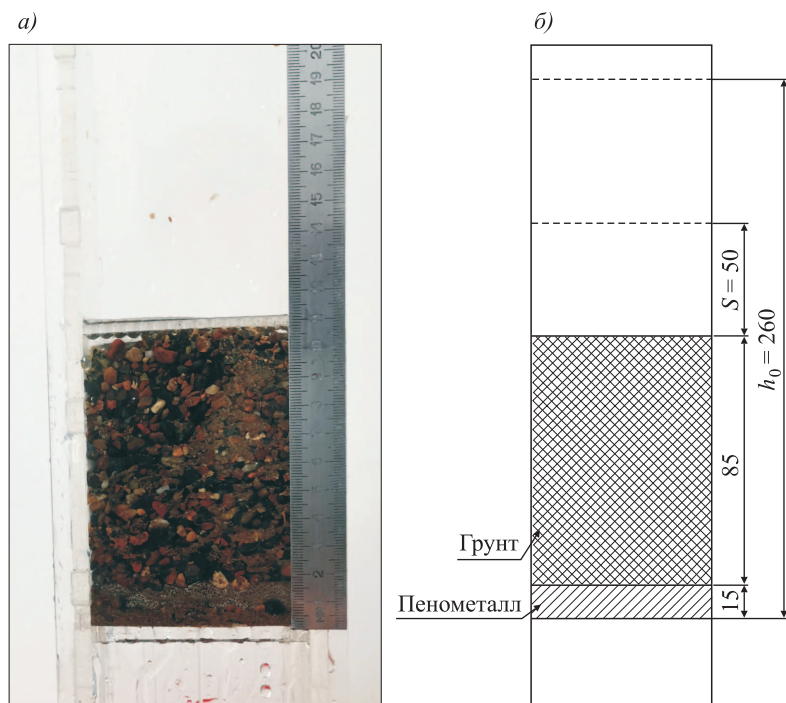


Рис. 6. Опытная установка (а) и расчетная схема (б) к определению коэффициента фильтрации второго грунта по методу Г.Н. Каменского  
 Fig. 6. Pilot plant (a) and design scheme (b) for determining the filtration coefficient of the second soil by the method of G.N. Kamensky

Таблица 6. Коэффициент фильтрации  $k_{\phi}$  для пенометалла пористостью PPI 60

Table 6. Filtration coefficient  $k_f$  for foam metal with a porosity of PPI 60

№ п/п	$t''$ , с	$k_{\phi}$ , см/с
1	13,31	265,1584
2	15,00	235,2838
3	17,00	207,6034
4	19,00	185,7504
5	21,53	163,9228
6	24,73	142,7116
7	25,35	139,2212
8	26,64	132,4796
9	28,23	125,018
10	30,00	117,6419
11	33,25	106,1431
12	35,00	100,8359
13	41,87	84,29084
14	43,27	81,56362

Примечание. Грунт – гравелистый;  $h_0$  – 15,5 см;  $S$  – 5 см;  $l$  – 10,5 см.



Результаты измерений и расчет коэффициента фильтрации  $k_f$  для пенометалла с РРІ 60 размещены в табл. 6.

В результате эксперимента увеличение массы образца пенометалла с РРІ 60 наблюдается на 6 г, частицы грунта диаметром 0,5–0,25 задержались в размерах пор 0,25–0,38, характерных для данного пенометалла.

**Заключение.** Пьезометр с фильтром из пенометалла с различной пористостью может быть использован в грунтах определенного типа. Щебенистый грунт с гранулометрическим составом, исследованным в первом опыте, рекомендуется применять для обсыпки фильтра из пенометалла с пористостью РРІ 60 и РРІ 80 при установке пьезометра, а также в грунтовых сооружениях, выполненных из щебенистого грунта. В гравелистом однородном грунте с гранулометрическим составом, определенным во втором опыте, рекомендуется устанавливать пьезометр с фильтром из пенометалла с пористостью РРІ 80. Такое сочетание позволит увеличить срок эксплуатации данного фильтра без обслуживания.

#### Список источников

1. Крук Н.В., Мерко М.А., Мерко И.С. Дистанционное зондирование в мониторинге золоотвалов ТЭС в климатических условиях Сибири // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: Материалы VIII Междунар. науч. конф. / науч. ред. Е.А. Ваганов, отв. ред. Г.М. Цибульский. Красноярск, 2021. С. 216–219.
2. Кузнецов Г.И., Балацкая Н.В., Озерский Д.А. Накопители промышленных отходов: Учеб. пособие. Красноярск: Изд. СФУ, 2008. 184 с.
3. Пат. 97400 РФ. МПК E03B 3/08. Наблюдательная скважина / А.А. Петухов, К.А. Полищук. № 2010115812/21; заявл. 20.04.2010; опубл. 10.09.2010; Бюл. № 25.
4. Пат. 2258131 РФ. МПК E21B 43/08. Скважинный фильтр / Ю.В. Данченко, А.И. Рабинович, О.М. Перельман и др. № 2004100973/03; заявл. 12.01.2004; опубл. 10.08.2006; Бюл. № 22.
5. Растовцев П.А. Конструкция пьезометра гидротехнического сооружения // Восемнадцатая Международная науч.-практ. конф. «Современное состояние науки и техники». Сочи, 2022.

#### References

1. Kruk N.V., Merko M.A., Merko I.S. Remote sensing in the monitoring of ash dumps in the climatic conditions of Siberia. Regional problems of remote sensing of the Earth. Materials of the VIII International Scientific Conference. Krasnoyarsk, 2021. P. 216–219. (In Russ.).
2. Kuznetsov G.I., Balatskaya N.V., Ozerskiy D.A. Accumulators of industrial waste. Tutorial. Krasnoyarsk, 2008. 184 p. (In Russ.).
3. Pat. 97400 RF. IPC E03B 3/08. Observation well. A.A. Petrov, K.A. Polishchuk. No. 2010115812/21; appl. 20.04.2010; publ. 10.09.2010; Bull. No. 25.
4. Pat. 2258131 RF. IPC E21B 43/08. Borehole filter. Yu.V. Danchenko, A.I. Rabinovich, O.M. Perel'man et al. No. 2004100973/03; appl. 12.01.2004; publ. 10.08.2006; Bull. No. 22.
5. Rastovtsev P.A. Design of a piezometer for a hydraulic structure. Eighteenth International Scientific and Practical Conference «The Current State of Science and Technology». Sochi, 2022. (In Russ.).

**Информация об авторах**

**Н.В. Крук** – кандидат технических наук, доцент, nkruk@sfu-kras.ru

**П.А. Растовцев** – аспирант, prastovcev@sfu-kras.ru

**Information about the authors**

**N.V. Kruk** – PhD, Ass. Professor, nkruk@sfu-kras.ru

**P.A. Rastovtsev** – Post-graduate Student, prastovcev@sfu-kras.ru

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.02.2022

Одобрена после рецензирования 22.03.2022

Принята к публикации 29.03.2022

The article was submitted 22.02.2022

Approved after reviewing 22.03.2022

Accepted for publication 29.03.2022