

## Применение быстротвердеющих веществ для формирования противофильтрационных элементов в плотинах из каменных материалов

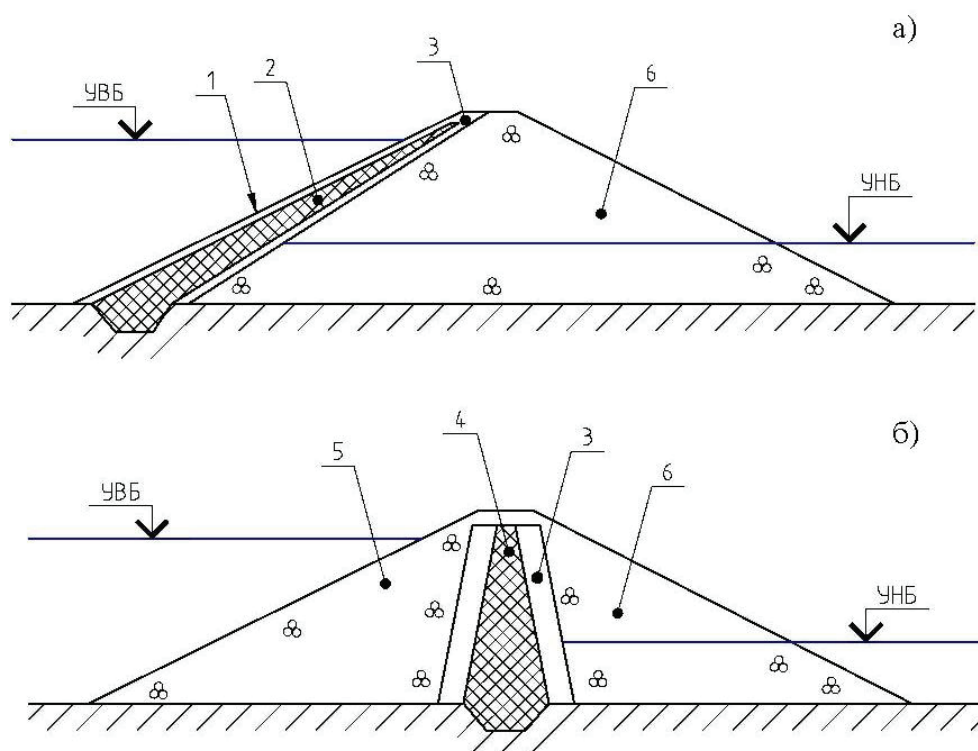
*Д.т.н., профессор М.И. Бальзанников;  
к.т.н., доцент А.А. Михасек\**

*ФГБОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет»*

**Ключевые слова:** гидротехническое строительство; плотины из каменных материалов; противофильтрационный элемент; экспериментальные модельные исследования

В гидротехническом строительстве для создания сосредоточенного напора и образования водохранилищ часто используются плотины из каменных материалов. В сравнении с бетонными плотинами такие сооружения имеют существенные преимущества: при возведении используются местные строительные материалы, добыча которых обходится многократно дешевле, чем приготовление бетона. Кроме того, в большинстве случаев, они имеются в достаточном количестве в непосредственной близости от места строительства. Укладка каменных материалов в тело плотины значительно технологичнее – не требуется устройство опалубки, не возникают сложности в обеспечении требуемого температурного режима и т.п. Все это обуславливает низкую стоимость гидротехнического сооружения.

Вместе с тем, плотины из каменных материалов обладают и существенными недостатками – для уменьшения фильтрации воды непосредственно через тело плотины в их конструкции необходимо предусматривать противофильтрационные устройства. На рис. 1 приведены примеры конструкций таких плотин с противофильтрационным элементом соответственно в виде экрана и ядра.



**Рисунок 1. Схемы поперечного разреза плотин из каменных материалов: а) с экраном; б) с ядром; 1 – крепление верхового откоса; 2 – экран; 3 – переходные слои (обратные фильтры); 4 – ядро (диафрагма); 5 – верховая призма; 6 – низовая призма**

Устройство противофильтрационного элемента является наиболее трудоемким и дорогим видом работ при строительстве плотин из каменных материалов [1-12]. Кроме того, и материал, укладываемый в экран или ядро, имеет значительную стоимость. Все это свидетельствует о необходимости проведения тщательного анализа и обоснования принимаемых конструктивных решений по плотине и, особенно, по противофильтрационному элементу с целью снижения общих затрат на возведение гидротехнического сооружения. Следует отметить, что важно производить взаимную увязку конструктивных решений и технологических особенностей выполнения работ. При этом наиболее целесообразным является создание противофильтрационного элемента совместно с современными конструкциями водосбросных сооружений [13, 14], что значительно повысит надежность гидроузла и позволит снизить стоимость его строительства.

На основе выполненного авторами анализа существующих способов создания противофильтрационных элементов в плотинах из местных строительных материалов [1, 8, 9, 15, 10-12] была разработана новая эффективная технология, предусматривающая введение в каждый уложенный слой плотины раствора быстротвердеющего вещества [16]. Предлагаемая технология возведения плотины и создания противофильтрационного элемента предусматривает: послойную укладку, разравнивание и уплотнение каменного материала в тело плотины; подачу жидкого быстротвердеющего вещества в зону формирования противофильтрационного элемента плотины; проникновение вещества в тело плотины за счет действия гравитации и последующее затвердевание вещества в пористом теле плотины.

В качестве быстротвердеющего вещества могут быть рекомендованы синтетические материалы [1-3]: быстротвердеющие пластмассы, бетонные смеси типа EMACO Nanocrete R4 Fluid. Нами предлагается использовать наиболее доступный и относительно дешевый материал – битум.

Поскольку противофильтрационный элемент по предлагаемой технологии может быть выполнен как в виде экрана, так и в виде ядра, необходимо выполнить сопоставление этих конструктивных вариантов и обосновать наиболее экономичный для практического применения. Анализа затрат по реализации таких конструктивных решений при их выполнении по предлагаемой технологии ранее не проводилось.

Для сравнения вариантов устройства противофильтрационного элемента в виде экрана и ядра целесообразно выполнить три этапа анализа: первый – определить форму области растекания быстротвердеющего вещества в теле плотины, второй – оценить объем этого вещества, расходуемого на формирование противофильтрационного элемента и третий – рассчитать общие затраты по вариантам конструктивных решений устройства противофильтрационного элемента в плотине.

Очевидно, что первый этап является наиболее важным и ответственным. Именно формой области растекания быстротвердеющего вещества в теле плотины определяется и объем вещества и затраты на 1 пог. м противофильтрационного элемента. Для выявления формы области растекания быстротвердеющего вещества потребовалось проведение экспериментальных исследований.

Исследования проникновения и растекания быстротвердеющего вещества проводились в составе нескольких серий. В первой и второй сериях физическая плоская фрагментарная модель тела плотины была выполнена соответственно из песчаного и щебеночного материала. В качестве быстротвердеющего вещества использовался подогретый битум. В модель тела плотины битум проникал под воздействием гравитации из специально выполненной на верхней поверхности модели фрагмента плотины канавки треугольного поперечного сечения. В этих сериях изучался процесс проникновения битума в тело плотины, а также форма битумного пятна, формирующаяся после его затвердевания [17].

Результаты выполненных исследований показали, что форма битумного пятна во фрагменте тела плотины, после его растекания и затвердевания оказывалась близкой к кругу. Такая форма достаточно хорошо подходит для устройства противофильтрационного элемента в виде ядра, поскольку в этом случае послойная укладка каменного материала в тело плотины, устройство канавок друг над другом и подача в них подогретого битума позволит сформировать послойные взаимно перекрывающиеся круговые пятна из затвердевшего битума. Следовательно, будет обеспечено устройство необходимого по толщине надежного противофильтрационного ядра. Однако если каждую выше располагаемую канавку рассмотренной формы устраивать с некоторым смещением относительно ниже расположенной, то есть использовать канавки треугольного поперечного сечения для устройства противофильтрационного элемента в виде наклонного экрана, то сплошной зоны требуемой толщины из битумных пятен добиться практически невозможно. Исключения составляют случаи, когда многократно увеличивают объем подаваемого битума или возведение плотины предусматривают слоями весьма малой высоты. Такие варианты материалоемки и явно неэкономичны.

На основе данных первых двух серий эксперимента сделан вывод о том, что растекание быстротвердеющего вещества для формирования противофильтрационного экрана должно осуществляться из канавки трапецидальной формы.

Более подробные и разноплановые исследования растекания быстротвердеющего вещества были проведены в третьей и четвертой сериях модельных экспериментов. В них была использована щелевая малогабаритная модель тела плотины, которая позволяла достаточно быстро выполнить многочисленные экспериментальные опыты.

Для обеспечения достоверности получаемых опытных данных были проанализированы условия обеспечения подобия изучаемых явлений, разработана методика проведения исследований и выполнено сопоставление результатов с данными исследования на фрагментарной модели.

Методические основы моделирования фильтрационного потока в щелевом лотке освещены в работе В.И. Аравина и С.Н. Нумерова [18]. Метод исследования течения жидкости в щелевой модели основан на аналогии между ламинарным движением жидкости между двумя параллельными пластинками и плоской фильтрацией потока воды в грунте.

Используем формулу коэффициента фильтрации потока в щели [18]:

$$k_m = \frac{ga^2}{3\nu}, \quad (1)$$

где  $k_m$  – коэффициент фильтрации для модели;  $a$  – полуширина щели лотка;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Тогда для конкретной жидкости с известным коэффициентом кинематической вязкости, можно определить требуемую полуширину щели:

$$a = \sqrt{\frac{3\nu \cdot k_m}{g}}. \quad (2)$$

Коэффициент фильтрации модельного потока определен в соответствии с масштабным коэффициентом моделирования, принятым по основному критерию подобия явлений – числу Рейнольдса:

$$\alpha_k = \alpha_V = \frac{k_n}{k_m} = \frac{V_n}{V_m} = \alpha_l^{-1}, \quad (3)$$

где  $\alpha_l$  – линейный масштаб модели.

Коэффициент фильтрации потока в натурном объекте определен в результате проведения экспериментальных опытов по проникновению битума на фрагментарной модели (первые две серии). Принято среднее значение коэффициента, соответствующее щебеночному материалу 20–40 мм, равное 0.005 м/с. Линейный масштаб модели был принят равным  $\alpha_l = 10$ . Таким образом, коэффициент фильтрации щелевой модели должен соответствовать величине 0.0005 м/с.

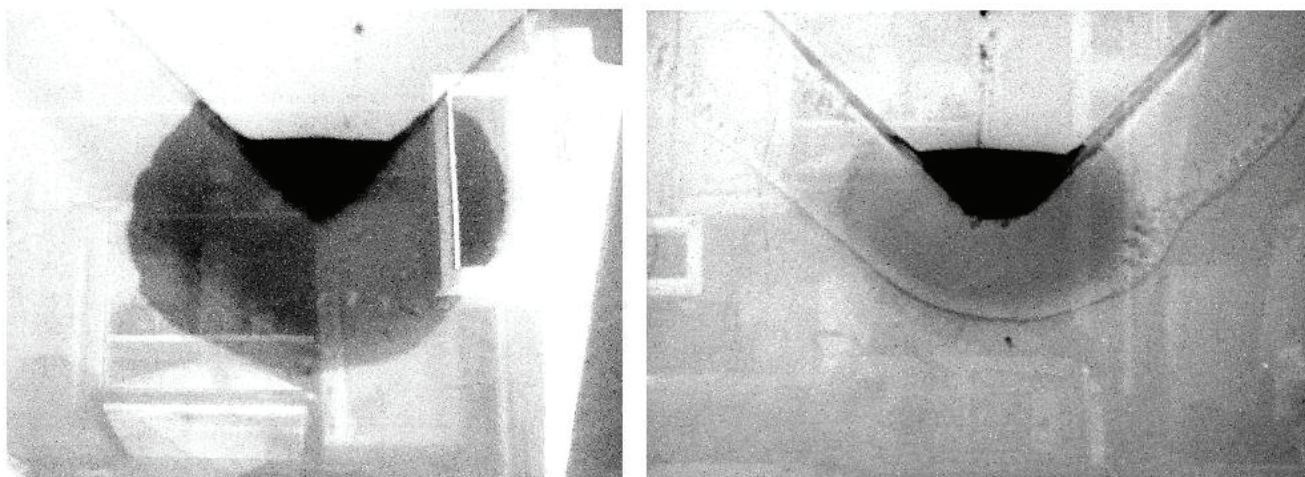
В исследованиях в качестве рабочей жидкости для щелевой модели был использован глицерин с коэффициентом кинематической вязкости равным  $1,5 \times 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре 20°C. Для этих условий, принимая во внимание (2), определена величина  $a$ , составившая 0,48 мм. Соответственно ширина щели составила 0,96 мм.

Плоская модель была выполнена из съемных пластин, изготовленных из стеклопластика размерами 200×200 мм, две из которых были склеены силиконом, а третья прижималась с помощью зажимов. Ширина щели определялась и выставлялась при помощи щупов.

Общий вид растекания жидкости приведен на рис. 2.

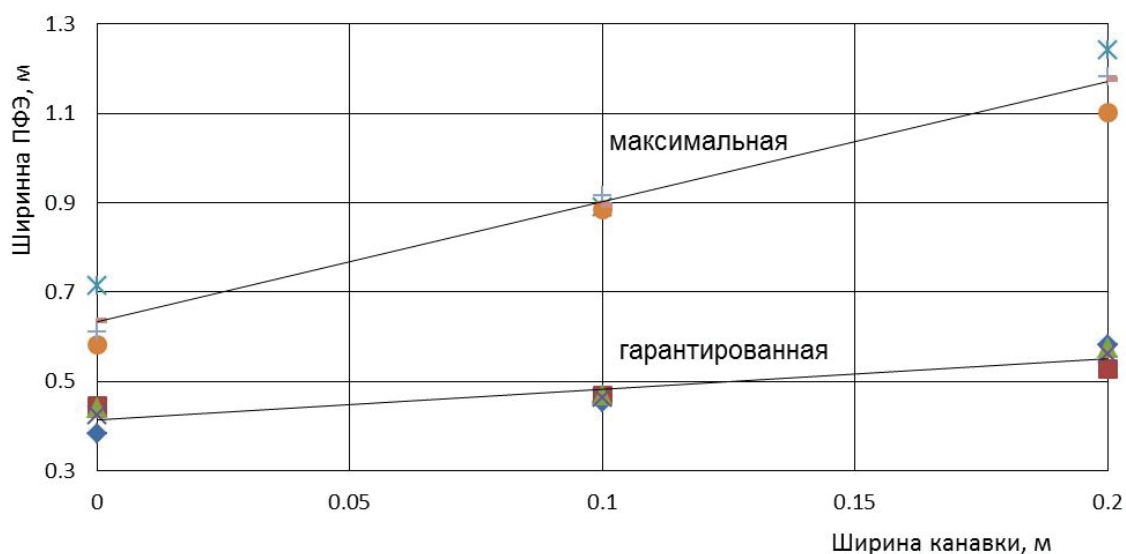
Третья серия опытов была проведена на модели с канавкой треугольной формы. Предварительно объем жидкости в опытах принимался равным 0,5 мл, 0,7 мл и 1,0 мл. Форма и скорость растекания жидкости в щелевой модели определялись с помощью фотофиксирования. Результаты были сопоставлены с данными исследования проникновения битума на фрагментарной модели. Сравнение показало хорошее совпадение по форме и глубине проникновения жидкости.

Канавки трапецеидальной формы были использованы в четвертой серии экспериментальных опытов.



**Рисунок 2. Общий вид растекания жидкости в щелевой модели соответственно для канавки: а) треугольной; б) трапецеидальной**

В результате проведенных исследований на щелевой модели установлено влияние ширины трапецеидальной канавки на гарантированную ширину создаваемого противодиффузионного элемента, обеспечивающую его целостность, и на ширину растекания быстротвердеющего вещества. Соответствующие зависимости представлены в виде графиков на рис. 3.



**Рисунок 3. Зависимость ширины противодиффузионного элемента и ширины растекания быстротвердеющего вещества от ширины канавки (при пересчете модельных данных на натурные условия)**

В результате аппроксимации опытных данных были получены соответствующие аналитические зависимости влияния ширины канавки трапецеидальной форма на гарантированную ширину противодиффузионного элемента (4) и общую ширину растекания вещества (5):

$$T_1 = 0.7b + h, \quad (4)$$

$$T_2 = 2.7b + h, \quad (5)$$

где  $b$  – ширина канавки;  $h$  – высота слоя, определяемая по методике [17].

Полученные аналитические зависимости позволили определить объемы расходуемого быстротвердеющего вещества на создание противофильтрационного элемента в виде экрана и ядра. Расчеты были выполнены для различных конструктивных параметров противофильтрационного элемента. Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

**Таблица 1. Объемы расходуемого вещества на создание 1 пог. м противофильтрационного элемента**

Нормируемая толщина	Ядро, $b = 0$		Экран с заложением 1:2, $b = 0.4$		Увеличение, %
	Гарантированная толщина	Объем, л	Гарантированная толщина	Объем, л	
0,2	0.33	71	0.61	249	72
0,4	0.67	301	0.94	621	52
0,5	0.83	480	1.11	873	45
0,8	1.33	1282	1.61	1900	33
1,0	1.67	2045	1.94	2816	27

Из таблицы 1 следует, что объем быстротвердеющего вещества, расходуемого на создание экрана, на 27-72% превышает объем вещества, требуемого для создания ядра. Поскольку технология создания противофильтрационного элемента в виде экрана и ядра практически не отличается по набору технологических операций и используемому строительному оборудованию, то и величины затрат на их устройство можно считать прямо пропорциональными объемам вводимого в тело плотины вещества.

Если долю затрат на создание противофильтрационного элемента плотины принять равной 30% общей стоимости возведения плотины, то экономический эффект может быть оценен в размере 9-24%.

### Выводы

1. В практике гидротехнического строительства большое распространение получили плотины из каменных материалов. Это связано с их существенными преимуществами по сравнению с бетонными: использование местных строительных материалов, технологичность, низкая стоимость. Вместе с тем, для плотин из каменных материалов необходимо предусматривать противофильтрационные элементы в виде экрана или ядра.

2. Устройство противофильтрационного элемента является наиболее трудоемким и дорогим видом работ при строительстве плотин из каменных материалов. К тому же и сам материал, укладываемый в экран или ядро, имеет значительную стоимость. Это свидетельствует о существенном резерве по дальнейшему снижению стоимости таких плотин за счет удешевления работ по возведению противофильтрационного элемента.

3. Авторами разработана новая эффективная технология возведения плотины из каменных материалов, предусматривающая для формирования противофильтрационного элемента введение в каждый уложенный слой плотины раствора быстротвердеющего вещества.

4. Выполнены экспериментальные исследования предложенной технологии возведения плотин на фрагментарной и щелевой моделях. Результаты выявили влияние формы и параметров исходной канавки для пролива жидкости на параметры проникновения модельной жидкости в модель тела плотины.

5. Проведены сопоставительные расчеты требуемого объема быстротвердеющего вещества для формирования противофильтрационного элемента в виде экрана или ядра. Их анализ показал, что при устройстве экрана потребуется быстротвердеющее вещество в значительно большем объеме – на 27-72%, чем при устройстве ядра. Снижение общей стоимости возведения плотины в соответствии с разработанной технологией и реализацией противофильтрационного элемента в виде ядра может составить 9-24%.

## Литература

1. Айрапетян Р. А. Проектирование каменно-земляных и каменно-набросных плотин. М.: Энергия, 1975. 327 с.
2. Виззер И. У., Шоениан Е., Поскит Ф. Ф. Анализ применения битумных материалов в строительстве плотин из грунтовых материалов // «Технический прогресс в проектировании и строительстве высоких плотин». Материалы X Международного конгресса по большим плотинам. М.: Энергия, 1975. С. 102-114.
3. Wang W., Höeg K. Method of Compaction Has Significant Effects on Stress-Strain Behavior of Hydraulic Asphalt Concrete // Journal of Testing and Evaluation. 2009. Vol. 37, No. 3. Pp. 264-274.
4. Pinto N. de S. The Design and Construction of Extra High CFRDs // The International Journal on Hydropower and Dams. 2009. Vol.16, Iss. 3. Pp. 41-44.
5. Johannesson P. Slab Performance on a Few CFRDs and Suggested Improvements in Slab Design // Proc. International Symposium on Key Techniques for Dam Construction. Yichang, P.R. of China: 2007. Pp. 322-353.
6. Höeg K., Valstad T., Kjaernsli B., Ruud, A. M. Asphalt Core Embankment Dams: Recent Case Studies and Research // International Journal on Hydropower and Dams. 2007. Vol.13, Issue 5. Pp. 112-119.
7. Hao Y. L., He S. B. Design of the Yele Asphalt Core Rockfill Dam // Dam Construction in China – State of the Art. 2008. Pp. 226-233.
8. Saxegaard H. Asphalt Core Dams: Increased Productivity to Improve Speed of Construction // International Journal on Hydropower and Dams. 2002. Vol. 9, Issue 6. Pp. 72-74.
9. Brecht H. Measurements on a rockfill dam with bituminous concrete diaphragm // Transactions of 8th Int. Congress on Large Dams. Paris: ICOLD Press, 1964. Pp. 305-315.
10. Feizi-Khankandi S., Ghalandarzadeh A., Mirghasemi A. A., Höeg K. Seismic Analysis of the Garmrod Embankment Dam with Asphaltic Concrete Core // Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society. 2009. Vol. 49(2). Pp.153-166.
11. Alicescu V., Tournier J. P., Yannobel P. Design and construction of Nemiscau-1 Dam, the first asphalt core rockfill dam in North America // Proceedings of CDA 2008 Annual Conference, Canadian Dam Association. MB, Canada: 2008. Pp. 1-11.
12. Pircher W., Schwab H. Design, construction, and behavior of the asphaltic concrete core wall of the Finstertal Dam // Transactions, 16th Int. Congress on Large Dams. Paris: ICOLD Press, 1988. Pp. 901-924.
13. Патент РФ 2432432, МПК E02B7/06. Переливная грунтовая плотина / Бальзанников М. И., Родионов М. В. Заявка № 2010126843. Оpubл. 2011. Бюл. № 30.
14. Бальзанников М. И., Родионов М. В. Результаты исследования грунтовой переливной плотины со ступенчато-криволинейным низовым откосом // Научно-технический журнал Вестник МГСУ. 2012. № 2. С 70-76.
15. Мещерякова З. В., Вундер Н. Я., Михасек А. А. Перспективы развития малой гидроэнергетики в Самарской области // Międzynarodowa konferencja naukowa II Okrągły stół Hydroenergetyki Wisła – Wołga. Włocławek: 2004. С. 112-114.
16. Патент РФ 2330140, В 09 В 7/00. Способ возведения плотины / Бальзанников М. И., Шабанов В. А., Михасек А. А. 2008. Бюлл. № 21.
17. Шабанов В. А., Михасек А. А. Экспериментальное исследование проникновения вязкой жидкости в пористую среду // Известия вузов. Строительство. 2006. № 11-12. С. 52-56.
18. Аравин В. И., Нумеров С. Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемой пористой среде. М.: Гостехиздат, 1953. 616 с.

*\* Андрей Александрович Михасек, г. Самара, Россия*

*Тел. раб.: (846) 242-21-71; эл. почта: [sgasu@sgasu.smr.ru](mailto:sgasu@sgasu.smr.ru)*

doi: 10.5862/MCE.29.6

## Use of quick-setting substances in watertight elements for rock material dams

**M.I. Balzannikov***Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Samara, Russia***A.A. Mikhasek***Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Samara, Russia**(846) 242-17-84, e-mail: sgasu@sgasu.smr.ru*

### Key words

hydraulic engineering; stone dam; watertight element; experimental model investigations

### Abstract

The article deals with the application of rock material dams with watertight element in the form of a screen or core in hydraulic engineering construction.

The authors developed a new technology of watertight element creation. The technology consists in quick-setting substance introduction into every deposited dam layer with the help of a special chute.

Experimental model research on the form and size determination of the quick-hardening substance lamination area inside the dam was carried out. Further the article considered the comparative calculations of the quick-hardening substance volume required for forming screen or core impervious elements.

The possibility of dam construction cost decrease according to the developed technology and the core IE implementation was shown.

### References

1. Ayrapetyan R. A. *Proyektirovaniye kamlenno-zemlyanykh i kamlenno-nabrosnykh plotin* [Design of stone-ground and rockfill dams]. Moscow: Energiya, 1975. 327 p.
2. Vizzer I. U., Shoyenian Ye., Poskit F. F. *Tekhnicheskiy progress v proyektirovanii i stroitelstve vysokikh plotin. Materialy X Mezhdunarodnogo kongressa po bolshim plotinam* [Technical progress in the design and construction of high dams. Proceedings of the X International Congress on Large Dams]. Moscow: Energiya, 1975. Pp.102-114.
3. Wang W., Höeg K. Method of Compaction Has Significant Effects on Stress-Strain Behavior of Hydraulic Asphalt Concrete. *Journal of Testing and Evaluation*. 2009. Vol. 37, No. 3. Pp. 264-274.
4. Pinto N. de S. The Design and Construction of Extra High CFRDs. *The International Journal on Hydropower and Dams*. 2009. Vol.16, Iss. 3. Pp. 41-44.
5. Johannesson P. Slab Performance on a Few CFRDs and Suggested Improvements in Slab Design. *Proc. International Symposium on Key Techniques for Dam Construction*. Yichang, P.R. of China: 2007. Pp. 322-353.
6. Höeg K., Valstad T., Kjaernsli B., Ruud, A. M. Asphalt Core Embankment Dams: Recent Case Studies and Research. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2007. Vol.13, Issue 5. Pp. 112-119.
7. Hao Y. L., He S. B. Design of the Yele Asphalt Core Rockfill Dam. *Dam Construction in China – State of the Art*. 2008. Pp. 226-233.
8. Saxegaard H. Asphalt Core Dams: Increased Productivity to Improve Speed of Construction. *International Journal on Hydropower and Dams*. 2002. Vol. 9, Issue 6. Pp. 72-74.
9. Breth H. Measurements on a rockfill dam with bituminous concrete diaphragm. *Transactions of 8th Int. Congress on Large Dams*. Paris: ICOLD Press, 1964. Pp. 305-315.
10. Feizi-Khankandi S., Ghalandarzadeh A., Mirghasemi A. A., Höeg K. Seismic Analysis of the Garmrood Embankment Dam with Asphaltic Concrete Core. *Soils and Foundations. Japanese Geotechnical Society*. 2009. Vol. 49(2). Pp.153-166.
11. Alicescu V., Tournier J. P., Yannobel P. Design and construction of Nemiscau-1 Dam, the first asphalt core rockfill dam in North America. *Proceedings of CDA 2008 Annual Conference, Canadian Dam Association*. MB, Canada: 2008. Pp. 1-11.

12. Pircher W., Schwab H. Design, construction, and behavior of the asphaltic concrete core wall of the Finstertal Dam. *Transactions, 16th Int. Congress on Large Dams*. Paris: ICOLD Press, 1988. Pp. 901-924.
13. *Patent RF 2432432, MPK E02B7/06. Perelivnaya gruntovaya plotina*. [Utility patent. Russian Federation]. Balzannikov M. I., Rodionov M. V. Zayavka № 2010126843. Opubl. 2011. Byul. № 30.
14. Balzannikov M. I., Rodionov M. V. *Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal Vestnik MGSU* [Science and technical journal. Bulletin of MGSU]. 2012. No. 2. Pp. 70-76
15. Meshcheryakova Z. V., Vunder N. Ya., Mikhasek A. A. Perspektivy razvitiya maloy gidroenergetiki v Samarskoy oblasti. *Międzynarodowa konferencja naukowa II Okrągły stół Hydroenergetyki Wisła - Wolga*. Włocławek: 2004. Pp. 112-114.
16. *Patent RF 2330140, B 09 B 7/00. Sposob vozvedeniya plotiny*. [Utility patent. Russian Federation]. Balzannikov M. I., Shabanov V. A., Mikhasek A. A. 2008. Byull. No. 21.
17. Shabanov V. A., Mikhasek A. A. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo* [Proceedings of the universities. Building]. 2006. No. 11-12. Pp. 52-56.
18. Aravin V. I., Numerov S. N. *Teoriya dvizheniya zhidkostey i gazov v nedeformiruyemoy poristoy srede* [The theory of the movement of liquids and gases in non-deformable porous medium]. Moscow: Gostekhizdat, 1953. 616 p.

**Full text of this article in Russian: pp. 48-53.**