



**А. А. МИХАСЕК
Н. Р. МАЛЮГИН**

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ В ТЕЛЕ АКТИВНОГО БЕРЕГОЗАЩИТНОГО СООРУЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБТЕКАЮЩЕГО ПОТОКА

INFLUENCE OF FILTRATION IN THE BODY OF AN ACTIVE PROTECTIVE STRUCTURE ON THE FLOW CHARACTERISTICS

Приведено описание численной модели потока, огибающего берегозащитное сооружение в виде струенаправляющей шпоры. Рассмотрены различные с точки зрения проницаемости варианты материала тела шпоры. Для моделирования турбулентной фильтрации как местного сопротивления в потоке предложена формула, связывающая коэффициент фильтрации с коэффициентом гидравлического сопротивления проницаемой среды. В результате моделирования получены изображения в виде планового распределения скоростей и давлений в окрестности сооружения. На полученных материалах указано взаимное расположение транзитной и водоворотной зон потока. Сделаны выводы о характере потока, обтекающего берегозащитное сооружение, и влиянии фильтрации в теле сооружения на характеристики данного потока.

Ключевые слова: гидротехническое строительство, берегозащитные сооружения, струенаправляющие шпоры, нелинейная фильтрация, гидродинамическое моделирование

The article describes the numerical model of the flow that envelops the shore protection structure in the form of a stream spur. Various from the point of view of permeability, spur body material options are considered. To model turbulent filtration as local resistance in the flow, a formula is proposed that relates the filtration coefficient to the hydraulic resistance coefficient of a permeable medium. As a result of the simulation, images were obtained in the form of a planned distribution of velocities and pressures in the vicinity of the structure. The obtained materials indicate the relative position of the transit and whirlpool zones of the flow. Conclusions are drawn about the nature of the stream flowing around the shore protection structure and the effect of filtration in the body of the structure on the characteristics of this stream.

Keywords: hydrotechnical engineering, bank protection structures, jet spurs, nonlinear filtration, hydrodynamic modeling

Струенаправляющие шпоры – это поперечные берегозащитные сооружения активного типа, одним концом примыкающие к берегу, а другим выходящие в русло под некоторым углом к направлению течения. Механизм действия шпор заключается в отклонении и сжатии транзитной струи потока с образованием водоворотных областей и областей разрежения. В данных областях со временем происходит отложение наносов, массив которых защищает береговые территории от размыва.

В работе [1] сформулированы основные расчетные положения проектирования струе-

направляющих шпор. Попытки исследования особенностей работы шпор аналитическими методами механики жидкости нашли отражение в работах [3, 4]. Помимо натурных наблюдений и физического моделирования в последнее время получает все большее распространение численное моделирование с целью уточнения гидравлических особенностей работы данных сооружений [5, 6].

Целью данной работы является определение путем моделирования характера течения вязкой несжимаемой жидкости (воды), огибающего шпору, а именно распределения ско-

ростей и давлений в потоке при варьировании фильтрационных параметров материала, слагающего тело шпоры. Численное моделирование выполнено в программном комплексе AutodeskCFD 2019 Ultimate [6].

Геометрическая модель потока представляет собой участок призматического русла прямоугольного поперечного сечения. Ширина русла составляет 400 м. На левом берегу посередине моделируемого участка располагается шпора длиной 100 м (рис. 1).



Рис. 1. Схема моделируемого сооружения

В целях снижения количества элементов расчетной сетки трапециевидный поперечный профиль шпоры заменяется прямоугольным. При этом ширина модельной шпоры определяется как среднее между шириной шпоры на уровне свободной поверхности жидкости и шириной шпоры по дну (рис. 2).

В работе [5] для численной модели непроницаемой шпоры, находящейся в сходных условиях обтекания, установлено, что изменения геометрии потока, вызванные деформацией свободной поверхности жидкости при обтекании шпоры, хотя и имеют место быть, не оказывают заметного влияния при решении уравнения неразрывности потока, и основные изменения скорости обусловлены плановыми очертаниями русла. На основании этого для моделирования течения в окрестности шпор предлагается заменять безнапорный поток напорным. В этом случае действие внешних сил тяжести заменяется действием внешних сил давления; при этом канал с уклоном заменяется горизонтальным руслом, а уклон и относительные отметки «свободной» поверхности жидкости определяются по убыли давления в пределах моделируемого потока. Подобное допущение позволяет решать задачу в стационарной постановке с меньшим количеством расчетных уравнений, что на порядок сокращает время, затрачиваемое на моделирование.

Численное моделирование выполняется для пяти вариантов шпор: непроницаемой и выполненной из пористого материала

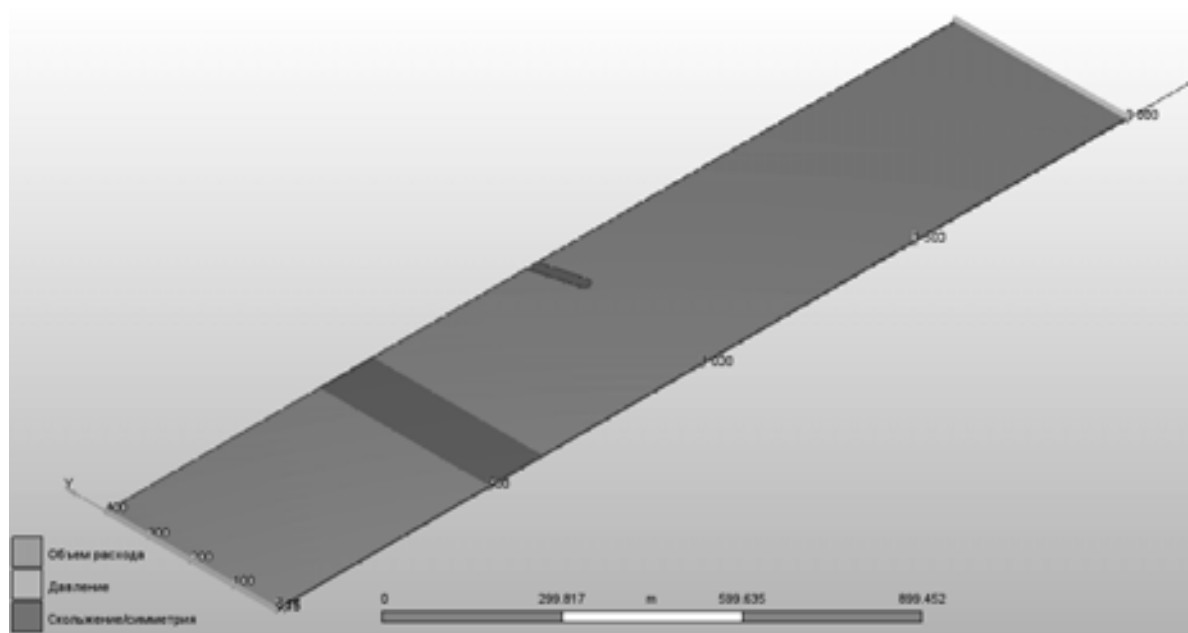


Рис. 2. Геометрическая модель потока, огибающего модельную шпору с указанием расположения граничных условий

с фильтрующими свойствами, аналогичными каменной наброске щебня фракции 20–40 мм. Для каждого варианта в качестве граничных условий используются следующие граничные условия (табл. 1).

Таблица 1

Сценарии моделирования потока в окрестности берегоукрепительной шпоры

Расход на входе, м³/с	Нормальная глубина потока, м	Средняя ширина шпоры, м	Давление на выходе, м в. ст.
2001,724	3,0	24,0	0

Уравнениями, описывающими гидродинамические параметры потока, являются уравнения Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, а также уравнение неразрывности потока [6]. Данные уравнения решаются методом конечного элемента на нерегулярной тетраэдрической трехмерной сетке с 50 тысячами элементов.

Для моделирования турбулентности потока используется модель, в которой уравнение движения жидкости преобразуется к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости потока и процесса её уменьшения за счёт вязкости. Потери напора по длине определяются пристеночной функцией выбранной модели турбулентности [6]. Определяющим параметром при этом является абсолютная шероховатость смачиваемой поверхности. По данным [2] для земляных каналов и природных русел наиболее вероятное значение шероховатости для средних условий составляет 5 мм.

Для оценки влияния фильтрации на параметры потока рассматриваются пять различных вариантов конструкции сооружения:

- условно непроницаемая шпора;
- шпора с телом из песка с гидравлической проницаемостью 10-5 см²;
- шпора с телом из гравия с гидравлической проницаемостью 10-3 см²;
- шпора с телом из крупнопористого бетона на крупном заполнителе фракции 20-40 мм с коэффициентом пористости 0,25;
- шпора с телом из щебня фракции 20–40 мм с коэффициентом пористости 0,4.

В соответствии с рекомендациями [2] фильтрация в песке и плотно сложенном гравии с достаточной степенью точности может определяться по линейному закону фильтрации – закону Дарси. Для песка и гравия значе-

ния коэффициента проницаемости приняты на основании справочных данных [2].

Для моделирования фильтрации в крупнопористом бетоне и щебне закон Дарси неприменим. Известно, что движение жидкости в крупнопористой среде является турбулентным [2, 7, 8]. Потери напора при фильтрации пропорциональны квадрату скорости при условии, что влияние сил вязкого трения пренебрежимо мало.

В программном комплексе AutodeskCFD потери давления при пространственной турбулентной фильтрации жидкости в изотропной крупнопористой среде выражаются по формуле Вейсбаха в дифференциальной форме [6]:

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = \zeta \rho \frac{u_i^2}{2}, \quad (3)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления проницаемой среды; ρ – плотность жидкости.

При этом между коэффициентом фильтрации и коэффициентом гидравлического сопротивления проницаемой среды можно установить следующее взаимно однозначное соответствие:

$$\zeta = \frac{2g}{k^2}. \quad (4)$$

Коэффициент фильтрации, как правило, определяется экспериментально. В отсутствие экспериментальных данных для крупнопористых материалов, таких как щебень и крупнопористый бетон, коэффициент фильтрации можно определить расчетным путем по следующей зависимости [9]:

$$k = 18p\sqrt{d}, \quad (4)$$

где d – средний диаметр фильтрующего материала, см, для щебня фракции 20-40 мм, принимается равным 3 см; p – коэффициент пористости, для щебня принимается равным 0,4; для крупнопористого бетона – 0,25.

Таким образом, окончательно коэффициент гидравлического сопротивления проницаемой среды ζ , характеризующий фильтрационные свойства материала, определяется как

$$\zeta = \frac{g}{182p\sqrt{d}}. \quad (5)$$

Для выбранного материала коэффициент гидравлического сопротивления проницаемой среды ζ , определяемый по вышеуказанной формуле, составляет 0,078 и 0,124 для щебня и крупнопористого бетона соответственно.

Окончательные зависимости и значения параметров, определяющих фильтрационные свойства материалов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Фильтрационные свойства материалов тела шпоры				
№ варианта	Материал	Фильтрационная зависимость	Определяющий параметр	Значение
2	Песок	Линейная	κ	$0,00001\text{ см}^2$
3	Гравий	Линейная	κ	$0,001\text{ см}^2$
4	КПБ	Квадратичная	ζ	$0,078$
5	Щебень	Квадратичная	ζ	$0,124$

Моделирование потока производится силами встроенного в программный комплекс AutodeskCFD решателя. Решение уравнений движения жидкости выполняется в стационарной формулировке без жестко заданного количества итераций. Остановка решения происходит автоматически по достижении удовлетворительных параметров сходимости по среднему значению вычисляемых параметров.

Результаты моделирования представляют собой плановые распределения скоростей (векторных и абсолютных) (рис. 3) и давлений (рис. 4). По распределению скоростей оценивается общая кинематика потока – расположение транзитной струи, наличие, расположение и размер водоворотных областей. По распределению давлений оценивают подпоры воды, создаваемые сооружением перед собой.

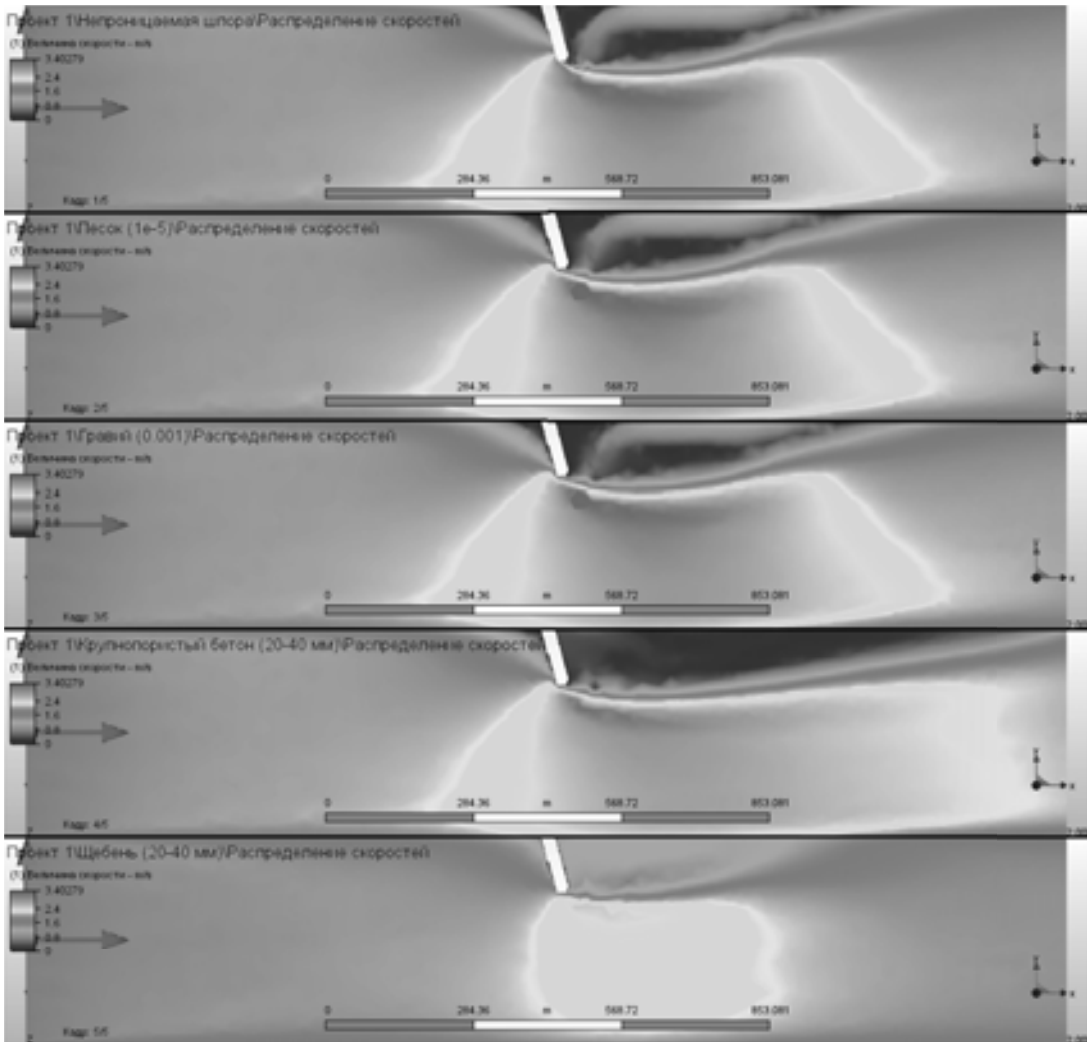


Рис. 3. Распределение абсолютных скоростей потока при обтекании модельной шпоры. Сверху вниз: непроницаемая шпора; шпора из песка, гравия, крупнопористого бетона, щебня

Полученные распределения скоростей позволяют сделать вывод о наличии устойчивых водоворотных зон во всех случаях, кроме шпоры с телом из щебня. При этом наблюдается «распластывание» в плане водоворотной зоны пониженных скоростей за шпорой, достигающее своего максимума в случае шпоры с телом из крупнопористого бетона. При этом увеличивается относительная длина берега, защищаемого шпорой от 4 до 10 длин сооружения.

У головы шпоры наблюдается снижение скоростей с увеличением фильтрационной способности тела шпоры, а следовательно, величины предполагаемых размывов в этой области.

По распределению давлений (напоров) жидкости можно сделать вывод о величине подпора воды, создаваемого сооружением: подпор составляет примерно 0,5 м (1/6 часть нормальной глубины русла) во всех случаях, кроме случая, в котором тело шпоры сложено щебнем.

В данном случае величина подпора в два раза меньше и составляет примерно 0,25 м.

Выводы. 1. Фильтрация в теле шпоры оказывает влияние на гидродинамические характеристики потока, огибающего ее. Особенно заметно это влияние в случае крупнопористых материалов с нелинейными фильтрационными свойствами (щебень, крупнопористый бетон).

2. По достижении некоторого значения фильтрационной способности за шпорой прекращается образование водоворотных областей, а следовательно, утрачивается способность шпоры накапливать наносы за собой.

3. Наиболее выгодным с гидравлической точки зрения вариантом шпоры является шпора с телом, выполненным из крупнопористого бетона с низким коэффициентом пористости. Эффективная длина такой шпоры может быть уменьшена в 2,5 раза по срав-

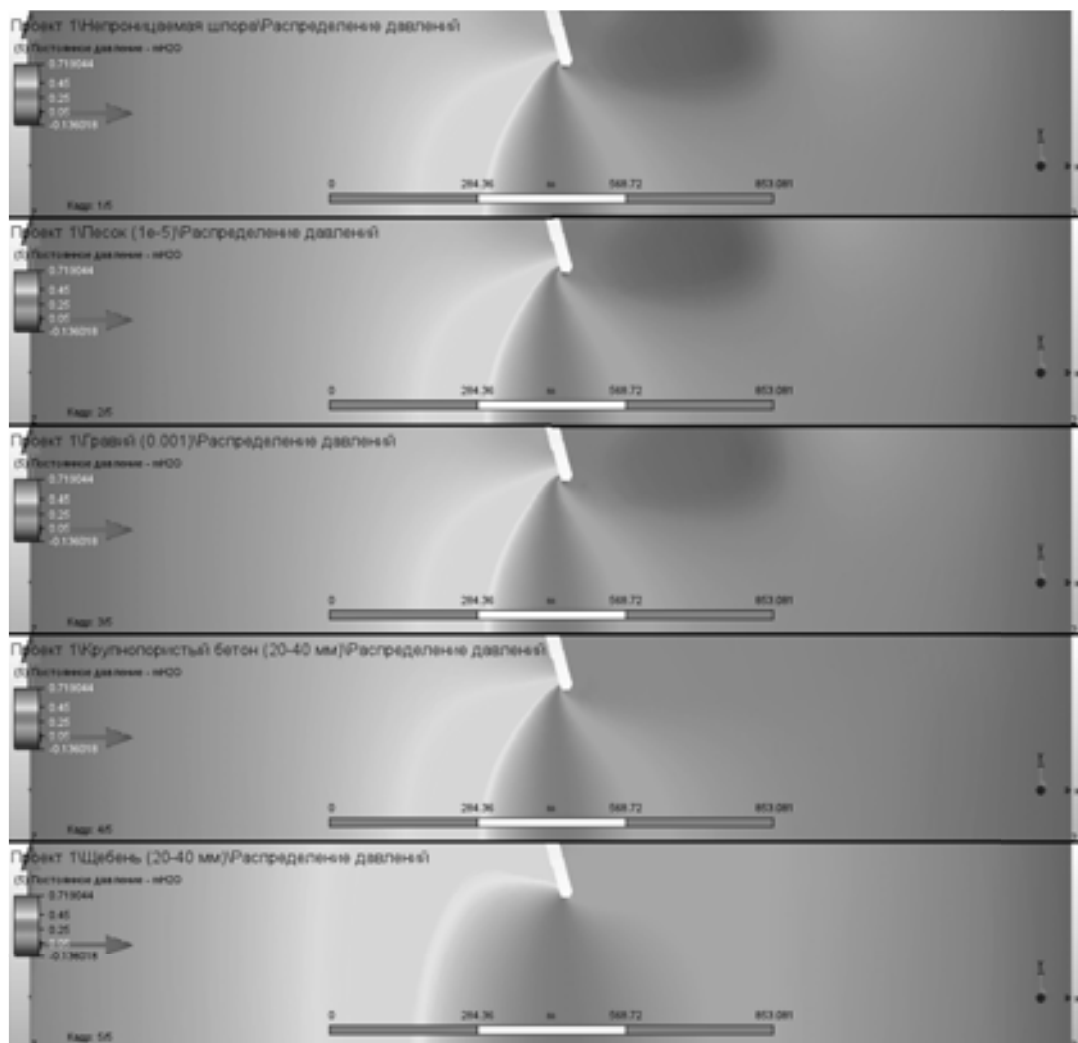


Рис. 4. Распределение давлений потока при обтекании модельной шпоры. Сверху вниз: непроницаемая шпора; шпора из песка, гравия, крупнопористого бетона, щебня

нению с малопроницаемыми шпорами для сохранения аналогичной длины защищаемого участка берега.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алтунин С.Т. Регулирование русел. 2-е изд. М.: Сельхозиздат, 1962. 352 с.

2. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1972. 322 с.

3. Бакиев М.Р., Шукурова С.Э. Обтекание комбинированной дамбы с затопленной сквозной частью постоянной застройки // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2015. Т. 15. № 5. С. 154–157.

4. Бакиев М.Р., Шукурова С.Э. Оценка отклонения динамической оси потока, стесненного комбинированной дамбой со сквозной частью переменной застройки // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. 2015. Т. 15. № 5. С. 158–161.

5. Михасек А.А., Малюгин Н.Р. Влияние водопропускных отверстий в теле активного берегозащитного сооружения на их совместную работу // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Самара, 2018. С. 212–215.

6. CFD 2019 Help // Autodesk Inc. 2019. URL: <http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/ENU/> (дата обращения: 4.03.2019).

7. Шабанов В.А. Расчет паводковых фильтрующих водосбросов // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2011. № 14. С. 218–220.

8. Монахов В.Н., Губкина Е.В. Безнапорная нелинейная фильтрация жидкости в областях с непроницаемыми включениями // Доклады Академии наук. 2008. Т. 420. № 4. С. 451–454.

9. Проектирование сооружений для забора поверхностных вод / ВНИИ водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии / разраб. А. С. Образовский и др. М.: Стройиздат, 1990. 255 с.

variable development. *VestnikKyrgyzsko-Rossiiskogoslavianskogouniversiteta* [Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University], 2015, vol. 15, no. 5, pp. 154–157. (in Russian).

5. Mikhasek A.A., Malyugin N.R. The effect of culverts in the body of an active shore protection structure on their joint work. *Tradiciiiinnovacii v stroitel'stve i arhitekture. Stroitel'stvo* [Tradition and innovation in construction and architecture. Civil engineering]. Samara, 2018, pp. 212–215. (in Russian).

6. Shabanov V.A. Calculation of flood filter spillways. *Vestnikvolzhskogoregional'nogootdeleniyarossiiskojakademiiarhitekturyistroitel'nyh nauk* [Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences], 2011, no. 4, pp. 218–220. (in Russian).

7. Monakhov V.N., Gubkina E.V. Non-pressure non-linear fluid filtration in areas with impermeable inclusions. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2008, vol. 420, no. 4, pp. 451–454. (in Russian).

8. CFD 2019 Help (2019). Available at: <http://help.autodesk.com/view/SCDSE/2019/ENU/> (accessed 4 March 2019).

REFERENCES

1. Altunin S.T. *Regulirovanierusel* [Regulation channels]. Moscow, Sel'hozizdat Publ., 1962. 352 p.

2. Kiselev P.G., Al'tshul' A.D., Danil'chenko I.V. *Spravochnik po gidravlicheskimraschetam* [Handbook of hydraulic calculations]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 322 p.

3. Bakiev M.R., Shukurova C.E. Wrapping of a combined dam with a flooded through part of permanent building. *VestnikKyrgyzsko-Rossiiskogoslavianskogouniversiteta* [Bulletin of the Kyrgyz-Russian Slavic University], 2015, vol. 15, no. 5, pp. 154–157. (in Russian).

4. Bakiev M.R., Shukurova C.E. Estimation of the deviation of the dynamic axis of the stream, constrained by a combined dam with a through part of the

Об авторах:

МИХАСЕК Андрей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры
природоохранного
и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: andremixas@mail.ru

MIKHASEK Andrey A.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Environmental and Hydraulic Engineering Chair
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: andremixas@mail.ru

МАЛЮГИН Николай Робертович

студент IV курса кафедры природоохранного
и гидротехнического строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194
E-mail: eo127@yandex.ru

MALYUGIN Nikolay R.

Student
Samara State Technical University
Academy of Architecture and Civil Engineering
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: eo127@yandex.ru

Для цитирования: Михасек А.А., Малюгин Н.Р. Влияние фильтрации в теле активного берегозащитного сооружения на характеристики обтекающего потока // Градостроительство и архитектура. 2019. Т.9, № 3. С. 92–98. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.12.

For citation: Mikhasek A.A., Malyugin N.R. Influence of Filtration in the Body of Active Protective Structure on the Characteristics of the Circular Flow // Urban construction and Architecture. 2019. V.9, 3. Pp. 92–98. DOI: 10.17673/Vestnik.2019.03.12.

Уважаемые читатели!

Научно-технический центр «Пожарная безопасность» приглашает к сотрудничеству.

Основные направления деятельности Центра:

- оказание образовательных услуг по направлению «Пожарная безопасность»
- разработка мероприятий по предотвращению пожаров

НТЦ «ПБ» осуществляет образовательную деятельность по направлениям:

- курсы повышения квалификации
- профессиональная переподготовка
- обучение по профстандартам

Слушатель получает:

- удостоверение установленного образца о повышении квалификации
- диплом о профессиональной переподготовке
- свидетельство о полученной рабочей профессии
- сертификат о прохождении курсов

Руководитель Яценко Петр Павлович

Контакты:

443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, каб. 650
тел. (846) 242-11-19
E-mail: samara-pb@inbox.ru