Фильтрационная модель скального основания напорного гидроузла

С.Н. Чернышев, Т.В. Зоммер, В.Л. Зоммер

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложено создание фильтрационной модели основания гидроузла, по которой могут быть выполнены сложные проектные фильтрационные расчеты. Модель природной среды отличается от реальной природной среды тем, что характеризует только одну сторону природного объекта, в данном случае — фильтрационную способность. В предложенной фильтрационной модели скальное основание разделено на несколько инженерно-геологических расчетных элементов с разной водопроницаемостью. Это расчленение — сложная задача, поскольку значения коэффициента фильтрации для скального основания в целом имеют большой разброс, причем, зачастую, тесно соседствуют существенно разные значения. Предложено решение путем математико-статистического обобщения результатов массового фильтрационного опробования скального массива.

Материалы и методы. Наиболее распространенным подходом построения модели является определение в точках массива гидравлическим способом откачек и нагнетаний воды в скважины, а также расчетный путь, когда коэффициент фильтрации массива рассчитывается по параметрам трещин. Материалом для построения инженерно-геологической фильтрационной модели служат данные стандартных массовых определений коэффициента фильтрации и удельного водопоглощения, полученные при изысканиях.

Результаты. Одним из преимуществ предложенной фильтрационной модели скального основания гидроузла является форма и методика построения путем математико-статистического обобщения результатов массового фильтрационного опробования скального массива. По форме модель представляет собой принятые в проектно-изыскательском деле геологические разрезы основания плотины вдоль оси и по поперечникам. В дальнейшем развитие методики планируется с учетом современных средств программирования и представления модели в 3D форме. Содержание модели выражает геолого-генетическую оценку фильтрационной неоднородности, сформированной в ходе геологических процессов, протекавших в массиве основания.

Выводы. Предложенная модель основания гидроузла может быть построена по результатам позонного фильтрационного опробования буровых скважин в отдельных точках массива горных пород. Сложная задача разделения массива основания на зоны с различной водопроницаемостью решается на основе геолого-генетического подхода в сочетании с математико-статистическим анализом. Практическая значимость данной фильтрационной модели в том, что с ее помощью могут быть запроектированы надежные гидротехнические сооружения с обеспечением устойчивости и минимизации фильтрационных потерь.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фильтрационная модель, гидротехнические сооружения, скальные основания ГЭС, опытные фильтрационные работы, анализ фильтрационной неоднородности

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чернышев С.Н., Зоммер Т.В., Зоммер В.Л. Фильтрационная модель скального основания напорного гидроузла // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 10. С. 1251–1259. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.10.1251-1259

Filtration model of the rock foundation of the dam pressure

Sergey N. Chernyshev, Tatyana V. Zommer, Victor L. Zommer

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavlshossee, Moscow, 129337, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. Presented the approach to the create a filtration model of the base of the hydroelectric system, built by mathematical and statistical generalization of the results of mass filtration testing of the rock mass. In the proposed filtration model, the rock base is divided into several engineering-geological design elements with different permeability.

Materials and methods. The most common approach to build the model is determine the points of the array hydraulic pumping and injection of water into the well, as well as by calculation, when the filtration coefficient of the array is calculated on the parameters of cracks.

Results. One of the advantages of the proposed form of the filtration model of the rocky foundation of the hydroelectric complex is the form and method of its construction by means of mathematical and statistical generalization of the results of mass filtration testing of the rock massif.

Conclusions. In of civil engineering the filtration model of the base of the hydraulic unit can be built on the results of the poson filtration testing of drilling wells at certain points of the rock mass. The difficult task of dividing the base massif into zones with different water permeability is solved on the basis of a geological-genetic approach in combination with

mathematical and statistical analysis. The practical significance of this filtration model is that it can be used to design reliable hydraulic structures while ensuring stability and minimizing filtration losses.

KEYWORDS: filtration model, dam, rock foundation, hydroelectric power station, filtration model, analysis of filtration heterogeneity

FOR CITATION: Chernyshev S.N., Zommer T.V., Zommer V.L. Filtration model of the rock foundation of the dam pressure. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018; 13(10):1251-1259. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.10.1251-1259

ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемая фильтрационная модель скального основания необходима для расчета фильтрационных потерь из водохранилища под плотиной и в обход плотины, устойчивости плотины с учетом фильтрационного давления, а также для планирования инженерных изысканий на поздних стадиях¹ [1–3].

Рассмотрена актуальная задача создания фильтрационной модели основания гидроузла, по которой могут быть выполнены сложные проектные фильтрационные расчеты путем математико-статистического обобщения результатов массового фильтрационного опробования скального массива. Для построения модели могут быть использованы определения в точках массива гидравлическим способом откачек и нагнетаний воды в скважины, а также расчетным путем, когда коэффициент фильтрации массива рассчитывается по параметрам трещин.

Испытания проводятся в небольших количествах по причине их высокой стоимости, значительной длительности эксперимента, необходимости специального оборудования, их результаты в виду недостаточного объема статистических выборок не могут использоваться для районирования скального массива по деформационным и прочностным свойствам. Такое районирование возможно сделать на фильтрационной модели. Цель статьи — создание методики фильтрационной модели основания гидроузла для расчета потерь на фильтрацию, противодействия подземных вод на плотину и планирования фильтрационного опробования.

Статистический анализ фильтрационной неоднородности, позволяющий выявить геометрию зон повышенной трещиноватости, рассматривался ранее авторами в статьях [4–11]. В литературных источниках установлено, что зоны повышенной трещиноватости обладают не только повышенной водопроницаемостью, но также пониженной прочно-

стью и повышенной деформированностью [12, 13]. Поэтому на основе фильтрационной модели следует планировать полевые испытания деформированности и прочности опытными штампами, опытными сдвигами целиков и прессиометрами.

При планировании изысканий должна быть использована фильтрационная модель в целях определения оптимального количества фильтрационных опытов различных инженерно-геологических элементов (ИГЭ).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для построения инженерно-геологической фильтрационной модели служат данные стандартных массовых определений коэффициента фильтрации и удельного водопоглощения, полученные при изысканиях.

Для построения фильтрационной модели могут быть использованы определения в точках массива гидравлическим способом откачек и нагнетаний воды в скважины, а также расчетным путем, когда коэффициент фильтрации массива рассчитывается по параметрам трещин.

Количество опытов в ИГЭ зависит от объема этого элемента, чем он больше, тем больше экспериментов; от уровня или степени водопроницаемости, чем она больше, тем больше экспериментов, что очевидно. И в зависимости от этих факторов сегодня планируются объемы фильтрационного опробования.

Наряду с изученными факторами есть фактор, который слабо изучен и недоучитывается даже на чисто качественном уровне при планировании изысканий — работа ИГЭ в составе природно-технической системы (ПТС) «плотина — массив скальных грунтов». Изыскатели, как правило, не знают, как именно работает тот или иной ИГЭ в общей системе гидроузла. Пункты СП 47.13330.2016 не предусматривают зависимость объема опробования от функционирования ИГЭ в составе ПТС. Однако инженерная геология в соответствии со своим названием должна расчетным путем учитывать совместную работу грунтов с инженерным сооружением, для которого проводятся изыскания.

¹ П 54-90 Методика составления моделей водопроницаемости скальных массивов в основаниях гидротехнических сооружений : пос. к СНиП 2.02.02-85. СПб. : ВНИИГ, 1992.

Для достижения оптимального эффекта при проектировании подземных сооружений под левобережной дамбой Усть-Илимского гидроузла следовало создать предварительную фильтрационную модель на основании общих представлений о фильтрационных характеристиках различных частей основа-

Фiltrационная модель скального основания
составляется по данным изысканий по результатам

Рис. 2. Пример фильтрационной модели скального основания левобережного примыкания и береговой земляной дамбы Усть-Илимского гидроузла по поперечнику к оси плотины: 1 — слабопроницаемый суглинок делювиальный; 2 — сильнопроницаемые трещиноватые осадочные отложения карбона: песчаники на глинистом цементе, аргиллиты, алевролиты; 3 — водонепроницаемые долериты; 4 — дамба

Fig. 2. An example of a filtration model of the rocky base of the left-bank contiguity and the coastal earthen dam of the Ust-Ilimsk hydroelectric complex along the diameter of the dam axis: 1 — poorly permeable in water the loam diluvial; 2 — highly permeable to waterfractured carbonaceous sediments: sandstones on clay cement, mudstones, siltstones; 3 — waterproof dolerites; 4 — dam

стандартных одиночных опытных поинтервальных нагнетаний воды в буровые скважины под тампон, одиночных откачек воды из буровых скважин. Опробование производится в массовом количестве для последующей статистической обработки [14, 15]. В отдельных случаях, когда невозможно гидравлическое опробование откачками и нагнетаниями, коэффициент фильтрации определяется расчетным путем по параметрам трещин [5, 16]. Для точного расчета коэффициента фильтрации проводятся сложные полевые исследования кустовыми откачками, индикаторными и другими методами.

Фильтрационная способность скального массива обусловлена наличием трещин, ширина которых колеблется от долей миллиметра до нескольких сантиметров, реже — до нескольких дециметров [17–23]. Трещины, пересекаясь, образуют сеть

трещин, которая имеет сложное пространственное строение (рис. 3).

Такие свойства сетей трещин, как системность, флуктуация раскрытий и других параметров трещин, закономерная геологическая изменчивость в трехмерном пространстве создают неоднородность и анизотропию фильтрационного поля.

Вследствие этого фильтрационное поле скального основания включает зоны с различной водопроницаемостью $K_f \approx 0,001 \dots 100$ м/сут. Этот исключительно большой разброс результатов фильтрационного опробования имеет большую ценность для построения структурной модели скального массива, выделения зон повышенной трещиноватости. Построенная по фильтрационным опытам модель массива может быть использована для планирования других видов опробования. Ниже приведен пример фильтрационной модели (по створу Богучанской ГЭС) (рис. 4).

Для определения водопроницаемости в точках массива используются гидравлический и расчетный методы [4–11, 24, 25]. Гидравлический метод с нагнетанием воды в скважину был предложен еще М. Люжоном и модернизирован в 1920–1930-х гг. Ф.П. Сваренским, Л.Д. Белым и Н.Н. Биндеманом. Модернизированный метод исключает гидравлический разрыв пласта, который нарушал сплошность скального основания и при опробовании давал завышенные результаты водопроницаемости. Используемый сейчас метод с небольшими напорами позволяет получить характеристики фильтрационной

Рис. 3. Системная прерывистая сеть трещин

Fig. 3. System intermittent fracture network

Рис. 4. Пример фильтрационной модели (по створу Богучанской ГЭС)

Fig. 4. Example of a filtration model (for the alignment of the Boguchanskaya HPP)

способности массива при ламинарном движении воды в трещинах, что соответствует эксплуатационному режиму основания. Схема опытного нагнетания приведена на рис. 5.

Расчет удельного водопоглощения q , л/мин, выполняется по формуле

$$q = Q/hl,$$

где q — удельное водопоглощение в данном интервале буровой изыскательской скважины, л/мин на 1 м ствола скважины; Q — расход воды, нагнетаемый в скважину, л/мин; h — напор при нагнетании, м вод. ст.

В пределах однородной по генезису части скального массива логарифмы удельного водопоглощения q имеют нормальное вероятностное распределение [15, 16, 21, 24, 26, 27]. Все результаты по гидроузлу рассматриваем как сумму нормальных распределений.

Выделяем слагающие сумму отдельные распределения на гистограмме (рис. 6).

Фiltrационная модель скального основания в трехмерном пространстве представляет собой совокупность сложных по форме вложенных одна в другую фигур [20–31]. Слагаемые соответствуют

Рис. 5. Схема опытного нагнетания: 1 — манометр; 2 — рабочая колонна труб; 3 — тампон; 4 — забой скважины; l — длина опытного интервала

Fig. 5. Scheme of the experimental discharge: 1 — manometer; 2 — working a pipe; 3 — tampon; 4 — well bottom; l — length of the experimental interval

Рис. 6. Гистограмма и дифференциальные кривые распределений удельного водопоглощения долеритов на участке в основании Богучанской ГЭС

Fig. 6. Histogram and differential curves of the distributions of specific absorption dolerites plot in the grounds of the Boguchanskaya HPP

отдельным генетически и пространственно обособленным зонам массива.

Зоны существенно отличаются по математическому ожиданию удельного водопоглощения q . Однако в пределах каждой зоны разброс значений так велик, что в разных зонах встречаются одинаковые по абсолютной величине индивидуальные значения q . В пределах каждой из них — свое, отличное от других среднее значение коэффициента фильтрации и своя дисперсия индивидуальных значений.

По форме фильтрационная модель представляет собой принятые в проектно-изыскательском деле геологические разрезы основания плотины вдоль оси и по поперечникам. В дальнейшем развитие методики планируется с учетом современных средств программирования и представления модели в 3D форме. Содержание модели выражает геолого-генетическую оценку фильтрационной неоднородности, сформированной в ходе геологических процессов, протекавших в массиве основания.

ВЫВОДЫ

Итак, фильтрационная модель основания гидроузла может быть построена по результатам зонного фильтрационного опробования буровых скважин в отдельных точках массива горных пород. Результаты опробования на крупном гидроузле

должно быть не менее нескольких сотен для корректной статистической обработки.

В ходе статистической обработки выполняется построение сводной гистограммы результатов опробования для выделения ИГЭ, каждый из которых представляет собой генетически обособленную часть скального массива со своими фильтрационными параметрами, которые характеризуются математическим ожиданием и дисперсией.

При отсутствии возможности гидравлического опробования в вечномерзлых скальных массивах, а также «сухих» сильно трещиноватых скальных массивах точечное гидравлическое опробование при необходимости рекомендуется заменять расчетом коэффициента фильтрации по параметрам трещин.

Значения, полученные расчетным путем, относятся к точечному объему массива, соответствующему единичному объему, на котором были измерены трещины. Результаты вычислений коэффициента фильтрации подлежат такой же статистической обработке, как и результаты гидравлического опробования.

Практическая значимость разрабатываемой фильтрационной модели заключается в том, что с ее помощью могут быть запроектированы надежные гидротехнические сооружения с обеспечением устойчивости и минимизации фильтрационных потерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газиев Э.Г., Речицкий В.И., Боровых Т.Н. Исследование фильтрационного потока в блочной среде применительно к проектированию сооружений в скальных массивах // Труды Гидропроекта. 1980. № 68. С. 137–147.
2. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А. Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений и оснований // Гидротехническое строительство. 2000. № 11. С. 2–7.
3. Газиев Э.Г. Скальные основания бетонных плотин. М. : Изд-во АСВ, 2005. 280 с.
4. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrusovich A.A. Calculation methodology for defining the filtration coefficient of a rock mass with loose crack filler // Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 51. No. 4. Pp. 414–417. DOI: 10.1007/s10749-017-0848-2
5. Чернышев С.Н., Зоммер Т.В., Лаврусевич А.А. Расчетная методика определения коэффициента фильтрации скального массива с рыхлым заполнителем трещин // Гидротехническое строительство. 2017. № 6. С. 27–30.
6. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrusovich A.A. Statistical analysis for determining rock bed seepage nonuniformity at hydraulic installations, using the example of the Boguchanskaya dam // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. Issue 4. Pp. 369–372. DOI: 10.1007/s10749-016-0715-6
7. Чернышев С.Н., Зоммер Т.В., Лаврусевич А.А. Статистический анализ определения фильтрационной неоднородности скальных массивов основания гидросооружения на примере Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2016. № 6. С. 6–10.
8. Чернышев С.Н., Зоммер Т.В., Лаврусевич А.А. Применимость методики определения фильтрационной неоднородности скальных массивов основания гидросооружения на примере Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2016. № 9. С. 35–38.
9. Чернышев С.Н., Зоммер Т.В., Лаврусевич А.А. Методика определения фильтрационной неоднородности скальных массивов основания гидросооружения // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 116–125. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.2.116-125
10. Чернышев С.Н., Зоммер Т.В., Лаврусевич А.А. Определение фильтрационной неоднородности скальных массивов основания гидросооружения методом статистического анализа на примере Богучанской ГЭС // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 150–160. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.1.150-160
11. Чернышев С.Н. Принципы классификации грунтовых массивов для строительства // Вестник МГСУ. 2013. № 9. С. 41–46. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.9.41-46
12. Chernyshev S.N., Paushkin G.A. Determination du module de deformabilite des roches en place. Symposium International // Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place. Paris, France, 1983.
13. Chernyshev S.N. Estimation of the permeability of the jointy rocks in massif // Symp. on Percolation Through Fissured Rock, Proc., Sep 18–19 1972; Stuttgart, W Ger.
14. Raymer J., Maerz N.H. Effect of variability on average rock-mass permeability // 48th US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, University of Minnesota, Twin Cities Campus Minneapolis; United States. 1–4 June 2014. No. 3. Pp. 1822–1829.
15. Чернышев С.Н. Движение воды по сетям трещин. М. : Недра, 1979. 142 с.
16. Чернышев С.Н. Экзогенные деформации траппов в долине р. Ангара // Известия вузов. Геология и разведка. 1965. № 12. С. 78–85.
17. Chernyshev S.N., Dearman W. Rock fractures. London : Butterworth-Heinemann, 1991. 272 p.
18. Чаповский А.Е., Перцовский В.В. Экспериментальное исследование неоднородных горных пород в плане // Разведка и охрана недр. 1972. № 1. С. 45–49.
19. Orekhov B.G., Zertsalov M.G. Fracture mechanics of engineering structures and rocks. Rotterdam : A.A. Balkema, 2001. 285 p.
20. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М. : Наука, 1983. 240 с.
21. Wu J.L., He J. Determination of volumetric joint count based on 3D fracture network and its application in engineering // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 580–583. Pp. 907–911. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.580-583.907
22. Wei J., Weifeng S., Guiting H. Insights into the tectonic fractures in the Yanchang formation interbedded sandstone-mudstone of the Ordos basin based on core data and geomechanical models // Acta Geologica Sinica — English Edition. 2015. Vol. 89. Issue 6. Pp. 1986–1997. DOI: 10.1111/1755-6724.12612
23. Ильин Н.И., Чернышев С.Н., Дзекцер Е.С., Зильберг В.С. Оценка точности определения водопроницаемости горных пород. М. : Наука, 1971. 150 с.
24. Meyer J.R., Parker B.L., Cherry J.A. Characteristics of high resolution hydraulic head profiles and vertical gradients in fractured sedimentary rocks // Journal of Hydrology. 2014. Vol. 517. Pp. 493–507. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.050
25. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Бестужева А.С., Саинов М.П., Толстиков В.В. Сангтудинский гидроузел: напряженно-деформированное состояние и фильтрация в основании плотины и в обход гидроузла // Гидротехническое строительство. 2008. № 5. С. 45–58.
26. Савич А.И., Речицкий В.И., Замахеев А.М., Пудов К.О. Комплексные исследования деформационных свойств массива долеритов в основании

бетонной плотины Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2011. № 3. С. 12–22.

27. Gudmundsson A., Løtveit I.F. Sills as fractured hydrocarbon reservoirs: examples and models // Geological Society, London, Special Publications. 2012. Vol. 374. Issue 1. Pp. 251–271. DOI: 10.1144/sp374.5

28. Mohajerani S., Baghbanan A., Bagherpour R., Hashemolhosseini H. Grout penetration in fractured rock mass using a new developed explicit algorithm // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 80. Pp. 412–417. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.06.013

29. Zhou X.-P., Gu X.-B., Wang Y.-T. Numerical simulations of propagation, bifurcation and coalescence

of cracks in rocks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 80. Pp. 241–254. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.09.006

30. Nguyen T.K., Pouya A., Rohmer J. Integrating damage zone heterogeneities based on stochastic realizations of fracture networks for fault stability analysis // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015. Vol. 80. Pp. 325–336. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.10.005

31. Akbardoost J., Ayatollahi M.R. Experimental analysis of mixed mode crack propagation in brittle rocks: The effect of non-singular terms // Engineering Fracture Mechanics. 2014. Vol. 129. Pp. 77–89. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.05.016

Поступила в редакцию 25 июня 2018 г.

Принята в доработанном виде 18 июля 2018 г.

Одобрена для публикации 29 сентября 2018 г.

ОБ АВТОРАХ: Чернышев Сергей Николаевич — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерных изысканий и геоэкологии, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9581148@list.ru;

Зоммер Татьяна Валентиновна — преподаватель, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ZommerTV@mgsu.ru;

Зоммер Виктор Леонидович — аспирант кафедры инженерных изысканий и геоэкологии, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, gospodinzommer@yandex.ru.

REFERENCES

1. Gaziev E.G., Rechitskiy V.I., Borovykh T.N. Investigation of filtration flow in block environment in design of structures in rock masses. *Works of Hydroproject*. 1980; 68:137-147. (rus.).

2. Rasskazov L.N., Aniskin N.A. Filtration calculations of hydraulic structures and foundations. *Hydro-technical Construction*. 2000; 11:2-7. (rus.).

3. Gaziev E.G. *Rock foundations of concrete dams*. Moscow, ASV Publ., 2005; 280. (rus.).

4. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrushevich A.A. Calculation methodology for defining the filtration coefficient of a rock mass with loose crack filler. *Power Technology and Engineering*. 2017; 51(4):414-417. DOI: 10.1007/s10749-017-0848-2

5. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrushevich A.A. [Calculation method for determining the filtration coefficient of rock mass with loose crack filler]. *[Hydraulic engineering]*. 2017; 6:27-30. (rus.).

6. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrushevich A.A. Statistical analysis for determining rock bed seepage nonuniformity at hydraulic installations, using the example of the Boguchanskaya dam. *Power Technology and Engineering*. 2016; 50(4):369-372. DOI: 10.1007/s10749-016-0715-6

7. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrushevich A.A. Statistical analysis of the definition of filtration heterogeneity of rock massifs of the base of hydroelectric power on the example of Boguchanskaya HPP. *[Hydraulic engineering]*. 2016; 6:6-10. (rus.).

8. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrushevich A.A. The applicability of the method for determining the filtration heterogeneity of rock massifs of the base of hydroelectric power on the example of Boguchanskaya HPP. *[Hydraulic engineering]*. 2016; 9:35-38. (rus.).

9. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrushevich A.A. Method of determining the filtration heterogeneity of a rock mass of hydraulic structure foundation. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 2:116-125. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.2.116-125 (rus.).

10. Chernyshev S.N., Zommer T.V., Lavrushevich A.A. Statistical analysis of determining the filtration heterogeneity of foundation rock mass of hydraulic structures on the example of the Boguchanskaya HPP. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2016; 1:150-160. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.1.150-160 (rus.).

11. Chernyshev S.N. Principles of classification of soil masses for construction purposes. *Vestnik MGSU*

- [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 9:41-46. DOI: 10.22227/1997-0935.2013.9.41-46 (rus.).
12. Chernyshev S.N., Paushkin G.A. Determination du module de deformabilite des roches en place. Symposium International. *Reconnaissance des Sols et des Roches par Essais en Place*. Paris, France, 1983.
13. Chernyshev S.N. *Estimation of the permeability of the jointy rocks in massif*. Symp. on Percolation Through Fissured Rock, Proc., Sep 18–19 1972; Stuttgart, W Ger.
14. Raymer J., Maerz N.H. Effect of variability on average rock-mass permeability // 48th US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium, University of Minnesota, Twin Cities Campus Minneapolis; United States. 1–4 June 2014; 3:1822-1829.
15. Chernyshev S.N. *Water Motion through the Network of Cracks*. Moscow, Nedra Publ., 1979; 142. (rus.).
16. Chernyshev S.N. Exogenous Deformations of Traps in the Valley of Angara River. *News of Institutions of Higher Education. Geology and Exploration*. 1965; 12:78-85. (rus.).
17. Chernyshev S.N., Dearman W. *Rock fractures*. London : Butterworth-Heinemann, 1991; 272.
18. Chapovskij A.E., Percovskij V.V. Experimental investigation of rock inhomogeneity in plan. *Exploration and Preservation of Mineral Resources*. 1972; 1:45-49. (rus.).
19. Orekhov B.G., Zertsalov M.G. *Fracture mechanics of engineering structures and rocks*. Rotterdam : A.A. Balkema, 2001; 285.
20. Chernyshev S.N. [Rock cracks]. Moscow, Science, 1983; 240. (rus.).
21. Wu J.L., He J. Determination of volumetric joint count based on 3D fracture network and its application in engineering. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 580-583:907-911. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.580-583.907
22. Wei J., Weifeng S., Guiting H. Insights into the Tectonic Fractures in the Yanchang formation interbedded sandstone-mudstone of the Ordos basin based on core data and geomechanical models. *Acta Geologica Sinica — English Edition*. 2015; 89(6):1986-1997. DOI: 10.1111/1755-6724.12612
23. Il'in N.I., Chernyshev S.N., Dzekcer E.S., Zil'berg V.S. *Evaluation of the accuracy of determining the permeability of rocks*. Moscow, Science, 1971; 150. (rus.).
24. Meyer J.R., Parker B.L., Cherry J.A. Characteristics of high resolution hydraulic head profiles and vertical gradients in fractured sedimentary rocks. *Journal of Hydrology*. 2014; 517:493-507. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.050
25. Rasskazov L.N., Aniskin N.A., Bestuzheva A.S., Sainov M.P., Tolstikov V.V. Sangtudinsk hydroengineering complex: stress-strain state and filtration in the dam foundation and bypassing the hydroengineering complex. *Hydrotechnical Construction*. 2008; 5:45-58. (rus.).
26. Savich A.I., Rechickij V.I., Zamahaev A.M., Pudov K.O. Complex investigations of deformation properties of dolerite masses in the foundation of the concrete dam of Boguchanskaya HPP. *Hydrotechnical Construction*. 2011; 3:12-22. (rus.).
27. Gudmundsson A., Løtveit I.F. Sills as fractured hydrocarbon reservoirs: examples and models. *Geological Society, London, Special Publications*. 2012; 374(1):251-271. DOI: 10.1144/sp374.5
28. Mohajerani S., Baghbanan A., Bagherpour R., Hashemolhosseini H. Grout penetration in fractured rock mass using a new developed explicit algorithm. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014; 80:412-417. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.06.013
29. Zhou X.-P., Gu X.-B., Wang Y.-T. Numerical simulations of propagation, bifurcation and coalescence of cracks in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015; 80:241-254. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.09.006
30. Nguyen T.K., Pouya A., Rohmer J. Integrating damage zone heterogeneities based on stochastic realizations of fracture networks for fault stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015; 80:325-336. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.10.005
31. Akbardoost J., Ayatollahi M.R. Experimental analysis of mixed mode crack propagation in brittle rocks: The effect of non-singular terms. *Engineering Fracture Mechanics*. 2014; 129:77-89. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2014.05.016

Received June 25, 2018

Adopted in a modified form July 18, 2018

Approved for publication September 29, 2018

ABOUT THE AUTHORS: **Sergey N. Chernyshev** — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Department of engineering research and geoecology, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, 9581148@list.ru;

Tatyana V. Zommer — Lecturer, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, ZommerTV@mgsu.ru;

Victor L. Zommer — Aspirant, Department of engineering research and geoecology, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, gospodinzommer@yandex.ru.