ОБЪЕМНАЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКА РОГУНСКОЙ ГЭС

С.Н. Хохотва, В.В. Орехов*, Д.В. Быковский**

Филиал ОАО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" имени С.Я. Жука» — «Центр службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли» (филиал ОАО «Институт Гидропроект» — «ЦСГНЭО»), 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2;
*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26;
**Московский филиал ЭНЕКС (ОАО), 125362, г. Москва, Строительный проезд, д. 7А, корп. 9

АННОТАЦИЯ. Описаны методика создания и результаты расчетов объемной геофильтрационной модели строительной площадки Рогунской ГЭС.

Построена объемная геофильтрационная модель скального массива (расположенного в основании каменно-земляной плотины и вмещающего подземные выработки напорно-станционного узла), основанная на использовании технологии твердотельного моделирования и метода конечных элементов. Были сделаны прогностические вычислительные исследования для нормальной работы объектов Рогунской ГЭС для уровня коллектора, соответствующего нормальному уровню хранения воды.

Анализ результатов выполненных расчетов свидетельствует о нормальной работе противофильтрационного контура плотины и показывает высокую эффективность дренажной системы сооружений напорно-станционного узла. Завершенные прогнозные расчеты позволяют определить гидростатическое и пьезометрическое давление в любой точке моделируемого участка. Данные могут использоваться в качестве нагрузки при проектировании футеровки подземных работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стационарная модель фильтрации, скальный массив, каменно-земляная плотина, сооружения напорно-станционного узла, пьезометрические давления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Хохотва С.Н., Орехов В.В., Быковский Д.В. Объемная геофильтрационная модель участка Рогунской ГЭС // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 5 (104). С. 512–518. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.512-518

THREE-DIMENSIONAL GEOFILTRATIONAL MODEL OF THE ROGUN HYDRO POWER PLANT CONSTRUCTION SITE

S.N. Khokhotva, V.V. Orekhov*, D.V. Bykovsky**

Branch of JSC «Planning and Surveying Scientific Research Institute "Gidroproekt" named after S.Ya. Zhuk» — "Center for Geodynamic Observations in the Energy Industry" (Branch of JSC "Gidroproekt Institute — "CSGNEO"),
2 Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russian Federation;
*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavl'skoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation;
**The Moscow Branch of ENEX (OJSC), 7A, bldg 9, Stroitel'ny pr., Moscow, 125362, Russian Federation.

ABSTRACT. The article deals with technique of creation and results of calculations of the three-dimensional geofiltrational model of the Rogun HPP construction site. When performing works on creation of the Rogun HPP three-dimensional geofiltration model, geological and hydrogeological conditions of the Rogun HPP construction site were analyzed. They showed that the construction site consists mostly of fractured rocks of various weathering degrees. In terms of preservation, four preservation zones were identified in the rock mass. These zones define the features of hydrogeological conditions that have emerged in the area of construction. Calculation results illustrated the absence of seepage areas on the lower slope of dam; this is the indication of normal operation of the dam impervious circuit. The drainage system of the underground hydropower plant has a high efficiency. Operation of the drainage galleries complex leads to a significant reduction of piezometric pressure on roofs of the machine and transformer halls. Above the underground structures a completely drained area is formed. Completed forecast calculations on geofiltration model of the Rogun hydropower plant determine the hydrostatic pressure and piezometric pressure at any point of the modeled area. These data can be used as loads while designing of lining of underground workings.

KEY WORDS: steady-state model of filtration, rock mass, earth-and-rock-fill dam, structures of the head station unit, piezometric pressure

FOR CITATION: Khokhotva S.N., Orekhov V.V., Bykovsky D.V. Ob'yemnaya geofil'tratsionnaya model' uchastka Rogunskoy GES [Three-dimensional Geofiltrational Model of the Rogun Hydro Power Plant Construction Site]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017, vol. 12, issue 5 (104), pp. 512–518. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.512-518

Построение геофильтрационной модели скального массива, расположенного в основании каменно-земляной плотины Рогунской ГЭС и вмещающего подземные выработки напорно-станционного узла, осуществляется на основании имеющейся информации о геологическом и гидрогеологическом строении, данных топографической съемки, соответствующих проектно-компоновочных чертежей, содержащих информацию о конструкции и материалах сооружений.

Так, подземные воды на участке строительства Рогунского гидроузла формируются в массиве пород (табл.), сложенном следующими породами:

- верхнеюрскими отложениями Гуардакской свиты (J_3gr), представленными пластом каменной соли мощностью 8,0...10,0 м и более, а также пачкой аргиллитов мощностью 16,0...18,0 м;
- нижнемеловыми отложениями (K_1), представленными песчаниками, алевролитами и аргиллитами, мощностью 1100,0 м. По литологическим особенностям толща разделяется на пять пачек: Литобанская (K_1lt); Мингбатманская (K_1mg); Обигармская (K_1ob); Каракузская (K_1kz); Яванская (K_1jv);
- верхнемеловыми отложениями (K_2), представленными алевролитами, известняками и песчаниками; породы развиты, в основном, вне пределов постоянных сооружений в верхнем бьефе;
- четвертичными отложениями (Q_{IV}), представленными галечниковыми отложениями первой и второй надпойменных террас (Q_{IV}^1) и отложениями русла (Q_{IV}^2).

Преимущественное развитие на участке строительства имеют скальные трещиноватые породы верхнеюрского и нижнемелового возраста, которые в течение геологического времени подвергались воздействию экзогенных процессов и в различной степени подверглись выветриванию.

По степени сохранности в скальном массиве выделяются четыре зоны сохранности: I–II — зоны интенсивного выветривания и разгрузки; III — зона разгрузки; IV — зона сохранных пород (вне влияния экзогенных процессов). Эти зоны сохранности по существу определяют особенности гидрогеологических условий, сформировавшиеся в районе строительства.

На фоне обширного, практически повсеместно распространенного водоносного горизонта выделяются гидрогеологические образования второго порядка: водоносные зоны, приуроченные к зонам тектонических нарушений, таких как Монашеский, Гулизинданский разломы, разлом № 35, и других более мелких нарушений. Эти разломы имеют свои зоны дробления мощностью до 10...15 м и рассматриваются с фильтрационных позиций как зоны повышенной проницаемости и, следовательно, водопрводящие системы субвертикальной и крутопадающей ориентации. Эти водоносные зоны с областью питания из водоносного горизонта наиболее опасны для обделок подземных выработок, не защищенных дренажами, в качестве источника фильтрационного воздействия.

Геофильтрационные характеристики

Стратиграфический комплекс	Характеристика пород и смесей	Зоны сохранности пород	Коэффициент фильтрации, м/сут
Техногенный комплекс tQ	Галечник (верхняя и нижняя призмы)		100,0
	Обратный фильтр		1,0
	Ядро плотины		0,0001
	Противофильтрационная завеса		0,1
Четвертичный комплекс aQ	Валунно-песчано-гравийные отложения		30,0...100,0
	Галечниковые отложения		20,0...100,0
Нижнемеловой комплекс K_1	Песчаники, алевролиты, аргиллиты	I–II	1,5...10,0
		III	0,5...20,0
		IV	0,02
Верхнеюрский комплекс J_3	Каменная соль		0,0001
	Аргиллиты	IV	0,001
Кепрок (промытая часть над солью)			2,0
Зоны дробления (разлом № 35 и др.)		I–II	2,0
		III	1,0
		IV	0,05

Рис. 1. Объемная твердотельная модель участка Рогунской ГЭС

Тело каменно-земляной плотины (высота плотины около 340 м, длина по гребню около 610 м) представлено центральным ядром из суглинка, двумя переходными слоями фильтра из песчано-гравийно-галечникового грунта и упорными призмами, отсыпанными галечником с пригрузкой камнем.

Участок Рогунской ГЭС, включенный в область моделирования при создании базовой твердотельной модели, имеет размеры 1,8 км по ширине и 2,3 км по длине [1]. Площадь моделирования составляет около 4,2 км². Рельеф поверхности модели задан оцифрованной поверхностью топографической карты масштаба 1:1000. Нижняя граница модели задана на абсолютной отметке 500,0 м. На рис. 1 представлена твердотельная базовая модель исследуемой области, включающая геологическое основание (с выделением зон сохранности пород) и плотину полного профиля.

На основании проектно-компоновочных чертежей были построены твердотельные модели сооружений напорно-станционного узла. К основным сооружениям относятся машинный (МЗ) и трансформаторный (ТЗ) залы. Также были построены твердотельные модели выработок противofiltrационного фронта ДТ-1, ДТ-2 и ДТ-3 и некоторые вспомогательные и транспортные выработки (рис. 2).

Модели выработок были интегрированы в базовую твердотельную модель. Также в модель была интегрирована противofiltrационная цементационная завеса плотины Рогунской ГЭС.

Для уменьшения влияния внешних границ модели на результаты прогнозного расчета созданная твердотельная модель участка Рогунской ГЭС, включающая геологическое основание (с выделением зон сохранности пород), плотину полного

профиля, цементационную завесу и подземные сооружения НСУ, была расширена методом экструзии. Окончательные размеры расчетной конечно-элементной модели составляют 3,3 × 3,15 км. Общая площадь моделирования составила более 10 км².

Создание модели и расчетные исследования геофильтрационного режима осуществлялись с использованием многофункционально расчетного комплекса ANSYS [2, 3], позволяющего решать фильтрационные задачи [4, 5] с использованием метода температурной аналогии [6–9]. При этом вычислительный комплекс ANSYS, реализующий метод конечных элементов [10–11] и технологию твердотельного моделирования [12, 13], позволяет с любой степенью точности и детальности моделировать геологическую среду и гидротехнические сооружения [14–19].

Рис. 2. Объемная твердотельная модель подземных сооружений НСУ Рогунской ГЭС

В естественных условиях основным фактором формирования уровня режима подземных вод на участке строительства Рогунской ГЭС является атмосферное питание и, как следствие, естественный сток в главную дрена — р. Вахш. Создание водохранилища Рогунского гидроузла при абсолютной отметке нормального подпорного уровня (НПУ) 1300,0 м приведет к образованию подпора и перераспределению естественного стока.

Соответственно на участке Рогунской ГЭС (моделируемая область) основным фактором, формирующим режим подземных вод, будет являться водохранилище. При проведении расчетных исследований инфильтрационное питание не учитывалось ввиду того, что оно не будет оказывать значительного влияния на режим подземных вод в районе гидроузла.

Расчетные исследования проводились для условия стационарной фильтрации. Со стороны верхнего бьефа в модели было задано граничное условие I рода ($H = \text{const}$). Уровень водохранилища при

НПУ — 1300,00 м абсолютной высоты. Со стороны нижнего бьефа в модели было задано граничное условие I рода ($H = \text{const}$). Уровень нижнего бьефа — 980,00 м абсолютной высоты. По дренажным галереям напорно-станционного узла задавалось граничное условие I рода ($H = \text{const}$), условие свободного высачивания ($H = Z, P = 0$, где H — напор; Z — высотная координата; P — пьезометрическое давление). По боковым и нижней границе модели — непроницаемая граница, II род ($Q = 0$). По поверхностям выработок, не являющимся дренажными, — непроницаемая граница, II род ($Q = 0$).

Результаты прогнозных расчетов показали следующее:

- участки высачивания на низовом откосе плотины, а также в бортовых примыканиях со стороны нижнего бьефа отсутствуют (рис. 3);
- при отсутствии дренирования массива давление на кровлю МЗ достигает 245 т/м², на кровлю ТЗ — 215 т/м² (рис. 4);

Рис. 3. Изополя пьезометрических давлений

Рис. 4. Изолинии пьезометрических давлений, т/м², на кровлю МЗ и ТЗ при отсутствии дренажа

Рис. 5. Сечение по оси шестого агрегата (изополя пьезометрических давлений в районе НСУ)

• совместная работа комплекса дренажных галерей приводит к значительному снижению пьезометрических давлений на кровлю МЗ (рис. 5). Над сооружениями НСУ формируется полностью сдренированная (осушенная) зона; пьезометрические давления на кровлю МЗ находятся в пределах от 1 до 15,5 т/м²; кровля ТЗ практически осушена, пьезометрические давления на небольшом участке не превышают 1,5 т/м².

Таким образом, анализ результатов расчета свидетельствует о нормальной работе противо-

фильтрационного контура плотины и показывает высокую эффективность дренажной системы сооружений НСУ.

Выполненные прогнозные расчеты на геофильтрационной модели участка Рогунской ГЭС позволяют определить гидростатические напоры и пьезометрические давления в любой точке смоделированной области. Эти данные могут быть использованы в качестве нагрузок при проектировании обделок подземных выработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Орехов В.В. Объемная математическая модель и результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния основных сооружений Рогунской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2011. № 4. С. 12–19.
2. Lawrence K.L. ANSYS tutorial release 14. SDC Publication, 2012. 176 p.
3. Басов К.А. ANSYS. Справочник пользователя. М. : ДМК Пресс, 2011. 640 с.
4. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во Мос. ун-та, 1995. 368 с.
5. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. 5-е изд. М. : Горная книга, 2009. 519 с.
6. Segerlind L.J. Applied Finite Element Analysis. New York : John Wiley and Sons Inc. 1976. 448 p.
7. Орехов В.В., Хохотва С.Н. Объемная математическая модель геофильтрации скального массива, вмещающего подземные сооружения ГЭС Яли во Вьетнаме // Гидротехническое строительство. 2004. № 12. С. 46–47.
8. Анишкин Н.А., Антонов А.С., Мгалобелов Ю.Б. и др. Исследование фильтрационного режима оснований высоких плотин на математических моделях // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 114–131.
9. Locke M., Indraratna B., Adikari G. Time-Dependent Particle Transport Through Granular Filters // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2001. Vol. 127. No. 6. Pp. 521–528.
10. Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. The finite element method in structural and continuous mechanics. McGraw-Hill, 1967. 240 p.
11. Connor J.J., Brebbia C.A. Finite element technique for fluid flow. Butterworth, 1977. 260 p.
12. Shih R.H. SolidWorks 2015 and engineering graphics. SDC Publication, 2015. 632 p.
13. Большаков В., Бочков А., Сергеев А. 3D-моделирование в AutoCAD, Компас-3D, SolidWorks, Inventor, N-Flex. СПб. : Питер, 2011. 328 с.
14. Chihiro Hayashi, Takahiko Tatezhi, Michimasa Menjo. 3-D seepage analyses in limb-grouting design by FEM // Proceedings of the 4th international conference on dam engineering. 18–20 October, Nanjing, China. 2004. Pp. 411–420.
15. Орехов В.В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния системы «здание ГЭС — грунтовое основание» с учетом поэтапности строительства здания // Вестник МГСУ. 2014. № 12. С. 113–120.

16. Орехов В.В., Хохотва С.Н. Гидрогеологическая модель территории гидроузла Коусар // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 59–68.

17. Losleben T.R. Pilot Study of Horizontal Roughing Filtration in Northern Ghana as Pretreatment for Highly Turbid Dugout Water : master of engineering thesis. Massachusetts institute of technology, 2008. 149 p.

18. Владимиров В.Б., Зарецкий Ю.К., Орехов В.В. Математическая модель мониторинга каменно-земляной

плотины гидроузла Хоабинь // Гидротехническое строительство. 2003. № 6. С. 47–52.

19. Зарецкий Ю.К., Карабаев М.И., Тверитинов В.П. Математическая модель мониторинга системы «здание ГЭС — грунтовое основание» // Юбилейный сборник научных трудов Гидропроекта (1930–2000). Вып. 159. М., 2000. С. 692–703.

Поступила в редакцию в декабре 2016 г.

Принята в доработанном виде в марте 2017 г.

Одобрена для публикации в апреле 2017 г.

Об авторах: **Хохотва Сергей Николаевич** — начальник отдела сейсмостойкости, **Филиал ОАО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт "Гидропроект" имени С.Я. Жука** — «Центр службы геодинамических наблюдений в энергетической отрасли» (филиал ОАО «Институт Гидропроект» — «ЦСГНЭО»), 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 2. Hohotva@rambler.ru;

Орехов Вячеслав Валентинович — доктор технических наук, главный научный сотрудник научно-технического центра «Экспертиза, проектирование, обследование», **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, V.Orehov@rambler.ru;

Быковский Дмитрий Владимирович — кандидат технических наук, главный инженер проекта, **Московский филиал ЭНЕКС (ОАО)**, 125362, г. Москва, Строительный проезд, д. 7А, корп. 9, bikovski@inbox.ru.

REFERENCES

1. Orekhov V.V. Ob'yemnaya matematicheskaya model' i rezul'taty raschetnykh issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovnykh sooruzheniy Rogunskoy GES [3-dimensional Mathematical Model and Computational Studies Results of the Stress-Strain State of the Rogun HPP Main Structures]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydro-engineering Construction]. 2011, no. 4, pp. 12–19 (In Russian)

2. Lawrence K.L. *ANSYS tutorial release 14*. SDC Publication, 2012, 176 p.

3. Basov K.A. *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS. User's Manual]. Moscow, DMK Press Publ., 2011, 640 p. (In Russian)

4. Shestakov V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. 3d ed., revised and enlarged. Moscow, Moscow University Publ., 1995, 368 p. (In Russian)

5. Mironenko V.A. *Dinamika podzemnykh vod* [Dynamics of Groundwater]. 5th ed. Moscow, Gornaya Kniga Publ., 2009, 519 p.

6. Segerlind L. J. *Applied Finite Element Analysis*. New York, John Wiley and Sons Ink, 1976, 448 p. (In Russian)

7. Orekhov V.V., Khokhotva S.N. Ob'yemnaya matematicheskaya model' geofil'tratsii skal'nogo massiva, vmeshchayushchego podzemnyye sooruzheniya GES Yali vo V'yetname [3-dimensional Geofiltration Mathematical Model of the Rock Massif That Accommodates Underground Structures of the Yali HPP in Vietnam]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydro-engineering Construction]. 2004, no. 12, pp. 46–47. (In Russian)

8. Aniskin N.A., Antonov A.S., Mgaloblov Yu.B. et al. Issledovaniye fil'tratsionnogo rezhima osnovaniy vysokikh plotin na matematicheskikh modelyakh [Mathematical Modeling of the Filtration Regime of the High Dams Bases]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 10, pp. 114–131. (In Russian)

9. Locke M., Indraratna B., Adikari G. Time-Dependent Particle Transport Through Granular Filters. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 2001, vol. 127, no. 6, pp. 521–528.

10. Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. *The Finite Element Method in Structural and Continuous Mechanics*. McGraw-Hill, 1967, 240 p.

11. Connor J.J., Brebbia C.A. *Finite Element Technique for Fluid Flow*. Butterworth, 1977, 260 p.

12. Shih R.H. *SolidWorks 2015 and engineering graphics*. SDC Publication, 2015, 632 p.

13. Bol'shakov V., Bochkov A., Sergeyev A. *3D-modelirovaniye v AutoCAD, Kompas-3D, SolidWorks, Inventor, N-Flex* [3D-modeling in AutoCAD, Kompas-3D, SolidWorks, Inventor, N-Flex]. St-Petersburg, Piter Publ., 2011, 328 p. (In Russian)

14. Chihiro Hayashi, Takahiko Tatezhi, Michimasa Menjo. 3-D Seepage Analyses in Limb-Grouting Design by FEM. *Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering. 18-20 October, Nanjing, China*. 2004, pp. 411–420.

15. Orekhov V.V. Matematicheskoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistemy «zdaniye GES — gruntovoye osnovaniye» s uchedom poetapnosti stroitel'stva zdaniya [Mathematical Modeling of the Stressed-Strain State of the “HPP Building — Ground Base” System, taking into account the Building Stage-by-stage Construction]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 12, pp. 113–120. (In Russian)

16. Orekhov V.V., Khokhotva S.N. Hidrogeologicheskaya model' territorii gidrouzla Kousar [Hydrogeological Model of the Kowsar Hydrosystem Territory]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 3, pp. 59–68. (In Russian)

17. Losleben T.R. *Pilot Study of Horizontal Roughing Filtration in Northern Ghana as Pretreatment for Highly Turbid Dugout Water : master of Engineering thesis*. Massachusetts Institute of Technology, 2008, 149 p.

18. Vladimirov V.B., Zaretskiy Yu.K., Orekhov V.V. Matematicheskaya model' monitoringa kamenno-zemlyanoy plotiny gidrouzla Khoabin' [Mathematical Model of Monitoring of the Hòa Bình Hydrosystem Earth-and-rockfill Dam]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydro-engineering Construction]. 2003, no. 6, pp. 47–52. (In Russian)

19. Zaretskiy Yu.K., Karabayev M.I., Tveritinov V.P. Matematicheskaya model' monitoringa sistemy «zdaniye GES — gruntovoye osnovaniye» [Mathematical Model of Monitoring the “HPP Building — Ground Base” System]. *Yubileyny sbornik nauchnykh trudov Gidroyekta (1930–2000)* [Jubilee Collection of the Gidroyekt's Scientific Works (1930–2000)]. Issue 159. Moscow, 2000, pp. 692–703. (In Russian)

Received in December 2016.

Adopted in revised form in March 2017.

Approved for publication in April 2017.

About the authors: **Khokhotva Sergey Nikolaevich** — Head of the Seismic Capacity Department, **Branch of JSC "Planning and Surveying Scientific Research Institute" Gidroyekt "named after S.Ya. Zhuk" — "Center for Geodynamic Observations in the Energy Industry" (Branch of JSC "Gidroyekt Institute — "CSGNEO")**, 2 Volokolamskoye shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; hohotva@rambler.ru;

Orekhov Vyacheslav Valentinovich — Doctor of Technical Sciences, chief research worker, Scientific and Technical Center “Examination, Design, Inspection”, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoye shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; V.Orekhov@rambler.ru;

Bykovsky Dmitry Vladimirovich — Candidate of Technical Sciences, project chief engineer, **The Moscow Branch of ENEX (OJSC)**, 7A, bldg 9, Stroitel'ny pr., Moscow, 125362, Russian Federation; bikovski@inbox.ru.