

УДК 624.131.7:004.925.84

В.В. Орехов, С.Н. Хохотва**ФГБОУ ВПО «МГСУ», *«ЭНЕКС» (ОАО)*

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИИ ГИДРОУЗЛА КОУСАР

Дан анализ методики построения объемной гидрогеологической модели скального массива, расположенного в основании бетонной плотины. Методика основана на использовании технологии твердотельного моделирования и метода температурной аналогии, что позволяет использовать современные универсальные вычислительные программы для решения фильтрационных задач. Калибровка модели осуществлялась на основе сравнения с данными натуральных наблюдений, полученных в процессе строительства и заполнения водохранилища.

Ключевые слова: гидрогеологическая модель, подземные воды, водопроницаемость, водохранилище, цементационная завеса, дренажные сооружения, фильтрационная анизотропия, калибровка, Коусар, Иран.

В настоящее время для создания гидрогеологических моделей больших территорий, как правило, используются специализированные вычислительные программы (FeFlow, ModFlow и др.), не позволяющие с требуемой точностью включать в расчетную схему конструкции напорных гидротехнических сооружений и различных дренажных и противofiltrационных элементов.

Для этой цели в настоящей работе был использован универсальный вычислительный комплекс ANSYS [1, 2], позволяющий решать фильтрационные задачи [3, 4] с использованием метода температурной аналогии [5—8], т.е. на основе решения дифференциальных уравнений теории теплопроводности [9]. При этом вычислительный комплекс ANSYS, реализующий метод конечных элементов [10—12] и технологию твердотельного моделирования [13, 14], позволяет с любой степенью точности и детальности моделировать геологическую среду и гидротехнические сооружения [15—18].

Математическая гидрогеологическая модель территории гидроузла Коусар (Иран) создавалась в процессе строительства плотины и заполнения водохранилища на основе результатов инженерных изысканий и гидрогеологического мониторинга. Объемная геометрическая модель территории гидроузла, отображает основные черты рельефа территории, включая создаваемое водохранилище, геологическую структуру (антиклиналь Дук) и основные литологические комплексы, развитые в пределах территории: известняки свиты As, гипсово-глинистая толща Gs и мергели Pb (рис. 1, а). В толще известняков As учтена граница инженерно-геологической зоны экзогенного изменения массива пород (I — выветривания и II — разгрузки), которая отличается повышенной водопроницаемостью, а также положение слоя мергелей M, который характеризуется экстремально низкими значениями коэффициента фильтрации Pb.

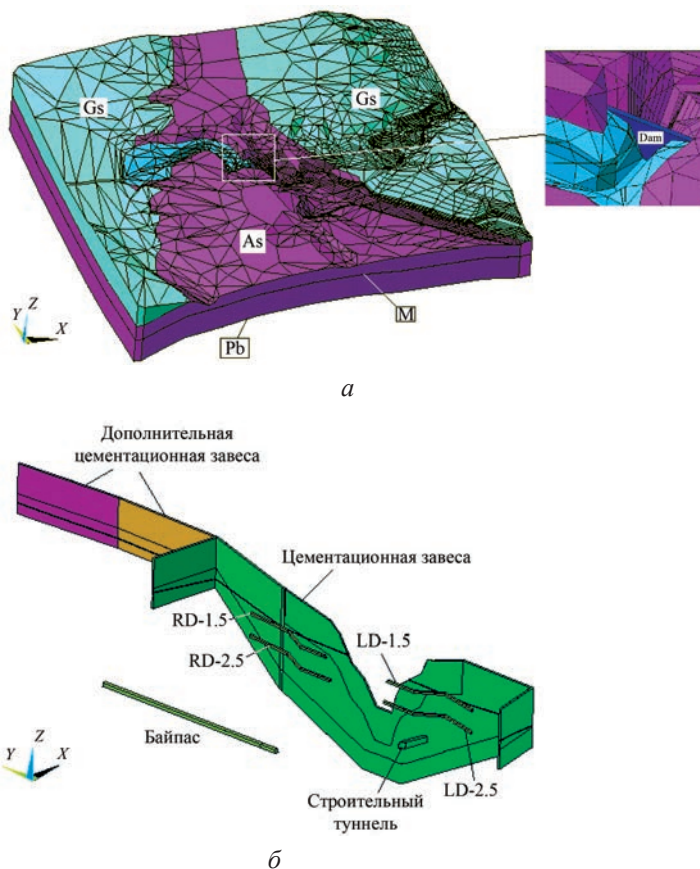


Рис. 1. Объемная геометрическая модель системы скальный массив — плотина: *a* — модель исследуемой области; *б* — противодиффузионный фронт плотины

Инженерные сооружения гидроузла представлены бетонной плотиной (высота 144 м), противодиффузионной завесой по оси плотины и уплотнительной завесой в ее бортовых примыканиях, дренажными сооружениями, расположенными на обоих берегах, включая байпас-туннель, и сооружаемая дополнительная цементационная завеса на правом берегу (см. рис. 1, б).

Подземные воды территории формируются за счет инфильтрационного питания. Разгрузка осуществляется в р. Хайрабад, которая является основной дренажной на рассматриваемой территории. В соответствии с этим обстоятельством северо-западной (правобережной) и юго-восточной (левобережной) гидрогеологическими границами модели являются границы с постоянным расходом, поступающим из области питания в область разгрузки. Они отнесены от реки приблизительно на 2,5 км. С северо-востока (вверх по реке) и юго-запада (вниз по реке) модель, в соответствии с региональным направлением потока подземных вод, ограничена по линиям тока (непроницаемые границы). Они отнесены от реки на 2,2...2,3 км. В результате площадь модели составила примерно 28 км² (5,2×5,4 км), при этом плотина располагается практически в ее геометрическом центре. Нижней границей модели является кровля практически водонепроницаемых мергелей свиты Pb. Внутренние границы представлены р. Хайрабад, водохранилищем и дренажными сооружениями.

Водопроницающей толщей на территории гидроузла являются известняки As, инфильтрационное питание которой происходит за пределами рассматриваемой территории. Источником изменения гидрогеологической ситуации является водохранилище. Как свидетельствуют результаты режимных наблюдений, реакция уровней подземных вод на изменение уровня воды в водохранилище в пределах участка основных сооружений является практически мгновенной; период запаздывания изменения уровней на максимальном удалении от водохранилища не превышает 1,5...2,0 недели. Эти особенности гидрогеологического режима позволяют использовать стационарную схему решения прогнозных задач.

По своим фильтрационным свойствам массив известняков As, вмещающий сооружения гидроузла, является неоднородным и анизотропным. Неоднородность обусловлена экзогенным воздействием на массив, которое прослеживается до глубины 100...150 м. В результате формируются инженерно-геологические зоны — выветривания (зона I) и разгрузки естественных напряжений (зона II), в пределах которых активизируются процессы карстообразования. Водопроницаемость массива в этих зонах существенно превышает водопроницаемость пород, не затронутых этими процессами — зоны III. Инженерно-геологические зоны I-II смоделированы в массиве пород на территории нижнего бьефа плотины и участка основных сооружений, т.е. там, где они оказывают влияние на формирование гидрогеологического режима.

Фильтрационная анизотропия массива выражается в различии значений водопроницаемости массива в направлении вдоль и поперек слоев практически на порядок. Эта особенность массива также нашла отражение в модели. Для задания параметров анизотропии модель была повернута относительно глобальных координат приблизительно на 45° , так что направление оси Y ориентируется вдоль простираения слоев.

Гидрогеологические параметры, которые приняты в качестве базовых для калибровки модели, приведены в таблице.

Базовые гидрогеологические параметры

Гидрогеологический элемент		Значение коэффициента фильтрации K_f , м/сут			
		По оси X	По оси Y	По оси Z	
Свита Gs		0,01...0,001	0,01...0,001	0,01...0,001	
Свита As	Зона I-II	2,0...3,0	20,0...30,0	2,0...3,0	
	Зона III	0,3...0,4	до 8,0	0,3...0,4	
	Слой M	0,01...0,001	0,01...0,001	0,01...0,001	
Приведенный дренаж		50,0	50,0	50,0	
Противо- фильтрационная цементационная завеса	По оси плотины	0,1	0,1	0,1	
	Дополни- тельная	Участок 1	0,2...0,3	0,2...0,3	0,2...0,3
		Участок 2	0,2...0,3	0,2...0,3	0,2...0,3

Важнейшей задачей, решение которой позволяет проводить гидрогеологическое моделирование, является калибровка модели [19]. Критерием правильности решения являлась сходимость полученных значений уровней и расходов подземных вод с данными натурных наблюдений.

Основная калибровка модели проводилась при отметке воды в водохранилище 580 м. В процессе калибровки производилось уточнение исходных данных — фильтрационных свойств водопроницающей толщи известняков As и расходов, поступающих с правобережной и левобережной гидрогеологических границ модели. Выяснялось также влияние слоя мергелей M на характер распределения напоров.

Согласно данным инженерных изысканий до создания водохранилища градиент зеркала подземных вод в известняках As вблизи реки составлял 0,02 и далее в глубину массива увеличивался до 0,04...0,06. Предполагалось, что на значительном удалении от дрены зеркало подземных вод выполаживается. Коэффициент фильтрации толщи известняков As вне зоны экзогенного изменения (инженерно-геологическая зона III) вдоль слоистости принимался равным 3 м/сут, градиент потока 0,02. Соответственно, согласно закону Дарси [20], расход потока через сечение площадью 1 м² мог составить 0,06 м³/сут.

Результаты натурных наблюдений свидетельствуют, что уровни подземных вод на левом берегу реки в нижнем бьефе плотины имеют более низкие отметки, чем на правом. Это может быть связано с меньшим расходом естественного потока, поступающего с левобережной стороны, в частности, за счет более благоприятных условий его разгрузки в долину реки в пределах водохранилища. В связи с этим обстоятельством, расход естественного потока с юго-восточной, левобережной стороны в модели был принят на порядок меньшим, чем на правом.

Еще одной особенностью распределения уровней на левом берегу является значительное их падение в непосредственной близости к урезу водохранилища. В одном из пьезометров оно достигает 25...30 м. Эта особенность может быть обусловлена существенным снижением водопроницаемости массива в его приповерхностной части вследствие кальматации известняков глинистым материалом. Подобное явление было зафиксировано в бортовых примыканиях плотины, и здесь водопроницаемость массива не превышала 0,01 м/сут. Это обстоятельство получило отражение в исследованиях. В модели отображена подобная зона в левом борту водохранилища в непосредственной близости к плотине.

В результате калибровочных расчетов наилучшее сходство с данными натурных наблюдений было получено при следующих значениях коэффициента фильтрации: для инженерно-геологической зоны III — 3 м/сут вдоль слоистости и 0,3 м/сут поперек, для зоны II — 20 и 2 м/сут соответственно.

Карта гидроизогипс, которая получена на модели, представлена на рис. 2. С учетом вышеизложенных положений, получилась вполне удовлетворительная сходимость с картой, построенной на ту же отметку по результатам натурных наблюдений. При этом расчетный приток подземных вод в р. Хайрабад на участке от выхода байпас-туннеля до контакта свит As и Gs в нижнем бьефе плотины составляет 1,2...1,4 м³/с, что несколько меньше измеренных. Территория выклинивания подземных вод на этом участке согласуется с данными наблюдений.

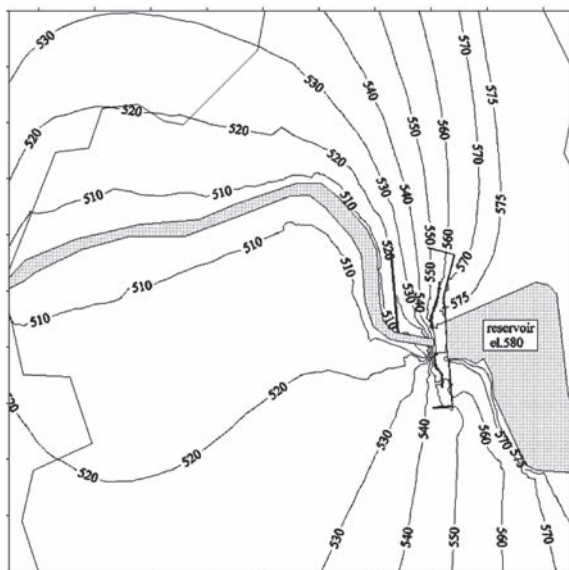


Рис. 2. Карта гидроизогипс при отметке водохранилища 580 м

Дополнительная калибровка была выполнена для отметок водохранилища 606...610 м. Уточнения параметров модели, выполненные на этом этапе, сводятся к следующему:

характер падения напоров в направлении р. Хайрабад со стороны левого берега аналогичен правому, соответственно этому расход естественного потока со стороны левого берега задается равным правому, т.е. $0,06 \text{ м}^3/\text{сут}$ через сечение площадью 1 м^2 ;

вблизи левого берега реки наблюдаются аномально высокие напоры, которые резко снижаются к урезу реки (падение напоров на участке $20...50 \text{ м}$ составляет $20...30 \text{ м}$). Такое падение напоров вблизи дрены свидетельствует о затрудненной связи потока подземных вод с рекой, т.е. закальматированности речного русла и бортов каньона подобно тому, как это наблюдается на участке створа плотины. Эта особенность была реализована в модели путем задания слабопроницаемой зоны в районе русла р. Хайрабад и бортов каньона. Коэффициент фильтрации слабопроницаемой зоны по результатам калибровки составил $0,5 \text{ м}/\text{сут}$, что и было принято в модели.

Результаты калибровочных расчетов при отметке водохранилища 610 м приведены на рис. 3.

При этом карта гидроизогипс, построенная по результатам расчета с учетом дополнительной калибровки, ничем принципиально не отличалась от имеющейся карты при отметке водохранилища 606 м, построенной по данным натурных наблюдений, что свидетельствует о корректно выполненной калибровке модели.

Прогнозная карта гидроизогипс для всей моделируемой территории для отметки водохранилища 620 м представлена на рис. 4. На этой карте показаны направления течения подземных вод.

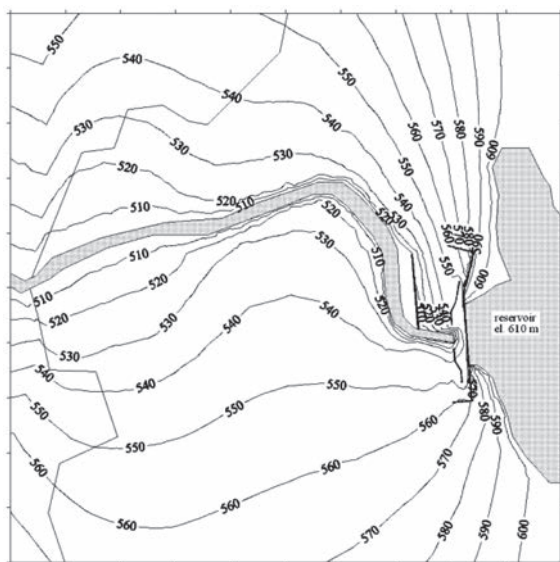


Рис. 3. Карта гидроизогиПС при отметке водохранилища 610 м

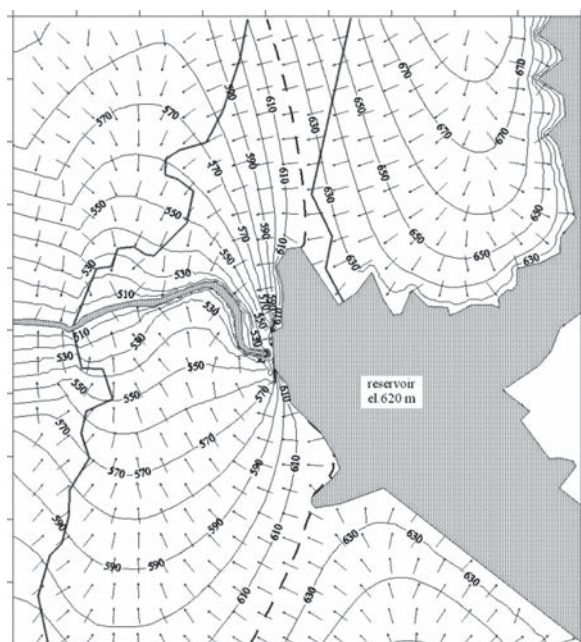


Рис. 4. Прогнозная карта гидроизогиПС на отметке водохранилища 620 м

Анализ карты позволяет сделать выводы, что создание водохранилища оказало влияние на фильтрационный режим территории площадью более 25 км². В результате подпора произошло перераспределение естественного стока и изменение направления естественного потока, что вызвало появление родников в нижнем бьефе плотины вблизи контакта свит As — Gs. Зона непосредственной инфильтрации воды из водохранилища главным образом определяется особенностями рельефа площади затопления и распространяется в радиусе менее 1 км от плотины.

Уровни подземных вод в районе створа плотины не превышают отметку 560 м, что соответствует проектному прогнозу. Водоприток в дренажную галерею RD-2.5 формируется как за счет притока со стороны цементационной завесы, так и за счет обходной фильтрации из водохранилища, направленной со стороны нижнего бьефа. Расчетный водоприток в RD-2.5 составил приблизительно 300 л/с, в дренажи левого берега (LD-2.5) около 120 л/с. Расчетный приток подземных вод в р. Хайрабад на участке от плотины до контакта свит As и Gs в нижнем бьефе, включая родники, составил 2,4...2,6 м³/с.

Доля непосредственной инфильтрации из водохранилища составляет приблизительно 40 % этой величины, остальные 60 % приходятся на перераспределенную в результате подпора разгрузку естественного потока. В действительности водопритоки в дренажные сооружения и разгрузка в реку могут быть на 10...20 % больше за счет сезонных, естественных колебаний уровня подземных вод, но при стабилизации (стационарный режим фильтрации) расходы снижаются и модель отображает именно этот конечный результат.

Выводы. 1. Как свидетельствуют результаты режимных наблюдений, реакция уровней подземных вод на изменение уровня воды в водохранилище в пределах участка основных сооружений является практически мгновенной. Период запаздывания изменения уровней на максимальном удалении от водохранилища не превышает 1,5...2,0 недели. Эти особенности гидрогеологического режима позволяют использовать стационарную схему решения прогнозных задач.

2. Созданная геофильтрационная модель позволяет с достаточной степенью точности определять уровни и расходы подземных вод на участке и территории гидроузла при любых отметках водохранилища и может быть использована для оценки эффективности работы цементационной завесы в эксплуатационный период.

Библиографический список

1. Lawrence K.L. ANSYS tutorial release 14. SDC Publication, 2012. 176 p.
2. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. М. : ДМК Пресс, 2011. 640 с.
3. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
4. Мироненко В.А. Динамика подземных вод. 5-е изд. М. : Горная книга, 2009. 519 с.
5. Segerlind L.J. Applied Finite Element Analysis. New York : John Wiley and Sons, Ink., 1976. 448 p.
6. 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.
7. Анискин Н.А., Антонов А.С., Мгалобелов Ю.Б., Дейнеко А.В. Исследование фильтрационного режима оснований высоких плотин на математических моделях // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 114—131.
8. 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.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М. : Высш. шк., 1967. 600 с.
10. Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. The finite element method in structural and continuum mechanics. London : McGraw-Hill, 1967. 240 p.
11. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.

12. *Connor J.J., Brebbia C.A.* Finite element technique for fluid flow. London : Newnes-Butterworth, 1977. 260 p.
13. *Randy H. Shih.* SolidWorks 2015 and engineering graphics. SDC Publication, 2015. 632 p.
14. *Большаков В.П., Бочков А.Л., Сергеев А.Т.* 3D-моделирование в AutoCAD, Компас-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex. СПб. : Питер, 2011. 328 с.
15. *Владимиров В.Б., Зарецкий Ю.К., Орехов В.В.* Математическая модель мониторинга каменно-земляной плотины гидроузла Хоабинь // Гидротехническое строительство. 2003. № 6. С. 47—52.
16. *Мгалобелов Ю.Б., Ильин Ю.В.* Использование трехмерной математической модели при проектировании и обосновании надежности бетонных сооружений гидроузла Мерове (Судан) // Юбилейный сб. науч. тр. Гидропроекта (1930—2000). Вып. 159. М. : Гидропроект, 2000. С. 327—339.
17. *Баранова Т.Е., Источников В.О.* Методика и опыт построения пространственной инженерно-геологической модели скального массива (на примере участка подземных сооружений ГЭС Яли во Вьетнаме) // Геотехника. Оценка состояния оснований и сооружений : тр. Междунар. конф. СПб., 2001. С. 90—94.
18. *Орехов В.В.* Объемная математическая модель и результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния основных сооружений Рогунской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2011. № 4. С. 12—19.
19. *Шестаков В.М., Поздняков С.П.* Геогидрология. М. : Академкнига, 2003. 176 с.
20. *Darsy H.* Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris : Victor Dalmont, 1856. 647 p.

Поступила в редакцию в феврале 2015 г.

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

Хохотва Сергей Николаевич — заместитель начальника центра безопасности гидротехнических сооружений, «ЭНЕКС» **Открытое акционерное общество**, Московский филиал («ЭНЕКС» (ОАО)), 105118, г. Москва, ул. Вольная, д. 13, Hohotva@rambler.ru.

Для цитирования: *Орехов В.В., Хохотва С.Н.* Гидрогеологическая модель территории гидроузла Коусар // Вестник МГСУ. 2015. № 3. С. 59—68.

V.V. Orekhov, S.N. Khokhotva

HYDROGEOLOGICAL MODEL OF THE TERRITORY OF KOWSAR HYDRAULIC PROJECT

Mathematical hydrogeology model of the territory of Kowsar Project was created with account for the results of the engineering surveys and hydro geological monitoring, which was conducted in the process of Kowsar Project construction. In order to create the model in the present work a universal computer system Ansys was used, which implements the finite element method and solid modeling technology, allowing to solve the filtration problem with the use of thermal analogy.

The three-dimensional geometric model was built with use of the principle “hard body” modeling, which displays the main line of the territory relief, including the created water reservoir, geological structure (anticline Duk) and the main lithological complexes developed within the territory.

In the limestone mass As here is a zone characterized by water permeability on territory of Kowsar Project, and a layer characterized by seepage feeding, which occurs outside the considered territory. The water reservoir is a source of the change of hydro geological situation. The results of field observations witness, that the levels of underground waters within the area of the main structures reacts almost instantly on the water level change in the water reservoir; the delay period of levels change is not more than 1,5...2,0 weeks at maximum distance from the water reservoir. These particularities of the hydro geological regime allow using the steady-state scheme of the decision of forecast problems.

The mass of limestone As, containing the structures of the Kowsar Project, is not homogeneous and anisotropy in its seepage characteristics. The heterogeneity is conditioned by exogenous influence on the mass up to the depth of 100...150 m. The seepage anisotropy of the mass is expressed by the difference of water permeability of the mass along and across the layers for almost one order.

The structures of Kowsar Project is presented by a dam, grouting curtain on axis of the dam and consolidation curtain in its both banks, drainage structures.

Underground waters of the territory are formed by infiltration. They unload in river Heirabad.

In accordance with this circumstance, the northwest (the right bank) and the south-east (the left bank) hydro geological borders of the model are the borders with constant discharge seepage, entering from the area of the feeding in the area of unloading. The borders are distanced from the river on 2,5 km. In accordance with the regional direction of the flow of underground waters, the model is limited along the lines of the current (the impervious borders) at northeast (upwards on river) and south-west (down on river). Those borders are distanced from river on 2,2...2,3 km. As a result, the area of model is 28 km². A roofing of almost watertight marls of the retinue Pb is the bottom border of the model. The internal borders are presented by the river Heirabad, the water reservoir and the drainage structures.

The calibration of the model was conducted at the reservoir water mark of 580 m and 606...610 m. The correctness criterion of the decision had shown the convergence of the obtained values of discharge level of underground waters with the data of natural observations. In the process of calibration the revision of the input data was carried out — a seepage characteristic of thick limestone mass As and discharge, entering from the right and left bank borders of the model.

The forecast calculation was performed for water reservoir level of 620 m.

The creation of water reservoir has influenced the seepage regime of the territory by the area of more than 25 km². As a result of the buttress of the natural inflow there occurred the redistribution of the natural inflow and change of the direction of the natural inflow that has caused the appearance of springs in downstream of dam near the contact of the series As-Gs.

The design inflow of underground waters in the river Heirabad on the area from dam up to the contact of the suites As and Gs in downstream is 2,4...2,6 m³/s including springs. The share of the direct seepage from water reservoir forms ~40 % of this values, the rest 60 % correspond to the unload natural inflow redistributed as a result of buttress.

It is possible to define the level and discharges of underground waters on the territory of hydro unit under any elevation of water reservoir with the help of the created geo seepage model. The model can be used for effectiveness evaluation of the grouting curtain in the operation period.

Key words: hydrogeological model, underground water, water permeability, water reservoir, grouting curtain, drainage structures, seepage anisotropy, calibration, Kowsar, Iran.

References

1. Lawrence K.L. ANSYS Tutorial Release 14. SDC Publication, 2012, 176 p.
2. Basov K.A. ANSYS: *spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS: User's Guide]. Moscow, DMK Press, 2011, 640 p. (In Russian)
3. Shestakov V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. 3rd edition, revised and enlarged. Moscow, MGU Publ., 1995, 368 p. (In Russian)
4. Mironenko V.A. *Dinamika podzemnykh vod* [Dynamics of Groundwaters]. 5th edition. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2009, 519 p. (In Russian)
5. Segerlind L.J. Applied Finite Element Analysis. New York, John Wiley and Sons, Ink., 1976, 448 p.

6. Orekhov V.V., Khokhotva S.N. Ob'emnaya matematicheskaya model' geofil'tratsii skal'nogo massiva, vmeshchayushchego podzemnye sooruzheniya GES Yali vo V'etname [Volume Mathematical Model of Geofiltration of the Rocky Massif Accommodating Underground Structures of Yali HPP in Vietnam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2004, no. 12, pp. 46—47. (In Russian)
7. Aniskin N.A., Antonov A.S., Mgalobelov Yu.B., Deyneko A.V. Issledovanie fil'tracionnogo rezhima osnovaniy vysokikh plotin na matematicheskikh modelyakh [Studying the Filtration Mode of Large Dams' Foundations on Mathematical Models]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 10, pp. 114—131. (In Russian)
8. 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. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:6\(521\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:6(521))
9. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The Theory of Heat Conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967, 600 p. (In Russian)
10. Zienkiewicz O.C., Cheung Y.K. *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics*. London, McGraw-Hill, 1967, 240 p.
11. Fadeev A.B. *Metod konechnykh elementov v geomekhanike* [Finite Element Method in Geomechanics]. Moscow, Nedra Publ., 1987, 221 p. (In Russian)
12. Connor J.J., Brebbia C.A. *Finite Element Technique for Fluid Flow*. London, Newnes-Butterworth, 1977, 260 p.
13. Randy H. Shih. *SolidWorks 2015 and Engineering Graphics*. SDC Publication, 2015, 632 p.
14. Bol'shakov V.P., Bochkov A.L., Sergeev A.T. *3D-modelirovanie v AutoCAD, Kompas-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex* [3D modeling in AutoCAD, Kompas-3D, SolidWorks, Inventor, N-Flex]. Saint Petersburg, Piter Publ., 2011, 328 p. (In Russian)
15. Vladimirov V.B., Zaretskiy Yu.K., Orekhov V.V. Matematicheskaya model' monitoringa kamenno-zemlyanoy plotiny gidrouzla Khoabin' [Mathematical Monitoring Model for Rock-Earth Dam of the Hoa Binh HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2003, no. 6, pp. 47—52. (In Russian)
16. Mgalobelov Yu.B., Il'in Yu.V. Ispol'zovanie trekhmernoy matematicheskoy modeli pri proektirovanii i obosnovanii nadezhnosti betonnykh sooruzheniy gidrouzla Merove (Sudan) [Using Three-Dimensional Mathematical Model For The Design And Rationale Reliability Of Merove HPP Concrete Structures (Sudan)]. *Yubileynyy sbornik nauchnykh trudov Gidroproekta (1930—2000)* [Anniversary Collection of Scientific Works of Gidroproekt (1930—2000)]. No. 159. Moscow, Gidroproekt Publ., 2000, pp. 327—339. (In Russian)
17. Baranova T.E., Istochnikov V.O. Metodika i opyt postroeniya prostranstvennoy inzhenerno-geologicheskoy modeli skal'nogo massiva (na primere uchastka podzemnykh sooruzheniy GES Yali vo V'etname) [Technique And Experience In Building Space Engineering-Geological Model Of The Rock Mass (on the Example of the Area of Underground Structures of Yali HPP in Vietnam)]. *Geotekhnika. Otsenka sostoyaniya osnovaniy i sooruzheniy : trudy Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proceedings of the International Conference "Geotechnics. Assessment of the State of Bases and Structures"]. Saint Petersburg, 2001, pp. 90—94. (In Russian)
18. Orekhov V.V. Ob'emnaya matematicheskaya model' i rezul'taty raschetnykh issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya osnovnykh sooruzheniy Rogunskoy GES [Volume Mathematical Model and the Results of the Numerical Studies of Stress-Strain State of Rogun HPP Main Structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2011, no. 4, pp. 12—19. (In Russian)
19. Shestakov V.M., Pozdnyakov S.P. *Geogidrologiya* [Geohydrology]. Moscow, Akademkniga Publ., 2003, 176 p. (In Russian)
20. Darsy N. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris, Victor Dalmont, 1856, 647 p.

About the authors: **Orekhov Vyacheslav Valentinovich** — Doctor of Technical Sciences, chief research worker, Scientific and Technical Center "Examination, Design, Inspection", **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; V.Orehov@rambler.ru;

Khokhotva Sergey Nikolaevich — Deputy Head, Centre of Hydraulic Structures Safety Validation, **Moscow branch of ENEX**, 13 Vol'naya str., Moscow, 105118, Russian Federation; Hohotva@rambler.ru.

For citation: Orekhov V.V., Khokhotva S.N. Gidrogeologicheskaya model' territorii gidrouzla Kousar [Hydrogeological Model of the Territory of Kowsar Hydraulic Project]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 3, pp. 59—68. (In Russian)