УДК [624.131.7:621.311.21]:004

В.В. Орехов*ФГБОУ ВПО «МГСУ»*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЗДАНИЕ ГЭС — ГРУНТОВОЕ ОСНОВАНИЕ С УЧЕТОМ ПОЭТАПНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЯ

Исследован процесс взаимодействия здания с грунтовым основанием. Исследование проведено на основе численного моделирования строительства здания гидроэлектростанции с учетом разработки котлована, порядка бетонирования здания, пуска агрегатов и планировки территории. Результаты исследований показали: в процессе строительства происходит непрерывное изменение осадки, наклона, прогиба и кручения донной плиты и, соответственно, изменение напряженно-деформированного состояния здания станции. В то же время расчеты, выполненные в предположении мгновенного возведения здания станции, прогнозируют только равномерный наклон донной плиты в сторону верхнего бьефа.

Ключевые слова: численное моделирование, поэтапность строительства, напряженно-деформированное состояние, осадка донной плиты, гидроэлектростанция, грунтовое основание.

Нормы проектирования гидротехнических сооружений и их оснований предписывают выполнять расчетное обоснование их безопасности с учетом основных определяющих факторов, в т.ч. и с учетом поэтапности возведения сооружений.

В настоящее время при использовании численных методов, расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) плотин из грунтовых материалов уже не мыслимы без учета поэтапности их строительства [1, 2], оказывающей существенное влияние на развитие пластических деформаций в грунтовых материалах [3—5].

В то же время расчеты НДС бетонных сооружений (плотины, надземные здания гидроэлектростанции (ГЭС) и т.д.) выполняются до сих пор, как правило, при их мгновенном возведении [6—15]. Данный подход совершенно не правомочен, так как НДС бетонных сооружений формируется, в т.ч. и при их взаимодействии с нелинейно-деформируемыми грунтовыми основаниями, в которых процесс накопления пластических деформаций зависит от траектории нагружения [16—18].

Рассмотрим процесс такого взаимодействия на примере математического моделирования строительства здания станции Камбаратинской ГЭС-2, возводимой в пределах аккумулятивной аллювиальной террасы, сложенной валунно-галечниками, мощность которых на участке расположения котлована 90 м.

Для выполнения расчетных исследований НДС здания станции Камбаратинской ГЭС-2 в процессе ее возведения была разработана объемная математическая модель системы здание ГЭС — грунтовое основание (рис. 1).

Рис. 1. Расчетная область системы здание станции — грунтовое основание

Математическое моделирование формирования НДС системы здание ГЭС — грунтовое основание при строительстве выполнялось с помощью вычислительной программы «Земля» [19], реализующей метод конечных элементов. При этом поведение грунтов основания описывалось с помощью упруго-пластической модели грунта [20], параметры которой определялись из результатов трехосных испытаний.

В расчетную модель системы вошла часть грунтового основания, размерами в плане 150×300 м. В модели основания была учтена конфигурация котлована под здание станции и засыпка до планировочной отметки.

Геометрическая модель здания станции, включающая три блока и монтажную площадку (МП), создавалась по рабочим чертежам на основе твердотельного моделирования с максимальным учетом геометрических особенностей здания и с учетом порядка бетонирования блоков здания ГЭС (рис. 2).

Рис. 2. Этапы возведения элементов здания ГЭС: 1 — устройство донной плиты

В соответствии с графиком строительства в расчетной модели системы были предусмотрены 40 расчетных этапов (табл.), включающих моделирование природного НДС основания, разработку котлована, возведение здания станции, планировку территории и пуск агрегатов. При этом в расчетной модели вес надземной части станции, гидротурбин и гидрогенераторов, а также давление воды в водопроводящем тракте задавались с помощью нагрузки. Кроме того, после пуска 1-го агрегата и затопления территории нижнего бьефа учитывалось взвешивающее действие воды.

Поэтапность возведения здания станции

Номер этапа расчета	Описание
1	Начальное НДС основания
2	Разработка котлована
3	Возведение элементов 1—6 (см. рис. 2)
4	
5	
6	
7	
8	
9	Возведение торцевой стены около МП
10	Устройство бетонной подготовки под МП
11	Окончание возведения блока закрытой МП
12	Возведение элементов 7—16
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	Возведение элемента 17 (задается нагрузкой)
23	Возведение элемента 18
24	Возведение элемента 19
25	Возведение элемента 20
26	Возведение элемента 21 + вес турбины
27	Возведение элемента 22
28	Возведение элемента 23 + вес генератора
29	Возведение торцевой стены 3-го агрегата
30	Засыпка пазух и планировка территории
31	Затопление нижнего бьефа, пуск 1-го агрегата
32	Возведение элемента 24
33	Возведение элемента 25
34	Возведение элемента 26 (задается нагрузкой)
35	Возведение элемента 27 + вес турбины
36	Возведение элемента 28 + вес генератора
37	Возведение элемента 29 (задается нагрузкой)
38	Возведение элемента 30 + вес турбины
39	Возведение элемента 31 + вес генератора
40	Пуск 2 и 3-го агрегатов

Как показали результаты расчетов, принятый график строительства станции, начиная от возведения первого блока и примыкающей к нему МП, приводит к формированию изначального крена донной плиты в сторону МП (рис. 3). В процессе дальнейшего строительства здания станции, вплоть до 29 этапа возведения, происходит равномерное увеличение его осадки.

Рис. 3. Вертикальные перемещения угловых точек здания станции (рис. 4, а) в процессе строительства

Поскольку строительство здания станции ведется в глубоком котловане ($H = 25$ м) и вес здания не превышает вес вынутого грунта, то при повторном нагружении совместные осадки донной плиты и основания на данном этапе возведения невелики — максимальные значения порядка 4,5 см.

К резкому изменению ситуации приводит засыпка пазух котлована и планировка территории строительства. В этом случае, поскольку отметка планировки территории превышает отметку рельефа, в грунтовом основании развиваются пластические деформации, приводящие к значительным осадкам донной плиты под первым блоком (до 7,4 см). В результате дополнительные осадки грунта края донной плиты приобретают большие вертикальные перемещения по сравнению с ее центральной частью, и она изгибается вокруг оси X , что приводит к возникновению больших величин растягивающих горизонтальных напряжений S_z (до 2,17 МПа) в конструктивных элементах верхней части здания станции.

После пуска 1-го агрегата и затопления территории нижнего бьефа за счет взвешивающего действия воды вертикальные перемещения здания станции неравномерно уменьшаются (рис. 4) в зависимости от предыстории нагружения различных частей грунтового основания под зданием станции.

Рис. 4. Вертикальные перемещения, м, донной плиты станции (вид снизу): а — поэтапное возведение; б — мгновенное возведение

Достройка здания станции приводит к увеличению вертикальных перемещений донной плиты под третьим блоком (в т.ч. и по сравнению с дополнительными перемещениями под построенным ранее первым блоком).

Таким образом, как показали результаты расчетов, в процессе строительства происходит непрерывное изменение осадки, наклона, прогиба и кручения донной плиты и соответственно изменение НДС здания станции.

В то же время расчеты, выполненные в предположении мгновенного возведения здания станции, несмотря на совпадение средней величины осадки (см. рис. 4), прогнозируют только равномерный наклон донной плиты в сторону верхнего бьефа и не позволяют отследить процесс формирования НДС здания станции для соответствующего армирования его элементов.

Библиографический список

1. Гольдин А.Г., Рассказов Л.Н. Проектирование грунтовых плотин. М. : Энергоатомиздат, 1987. 304 с.
2. Farivar A.R., Mirghasemi A.A., Mahin Roosta R. Back analysis of Tabarak Abad dam behavior during construction // Proc. of the int. symp. on dams for a changing world — 80th annual meet. and 24th congr. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012. Pp. (4) 13—18.
3. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. М. : Энергоатомиздат, 1983. 255 с.
4. Орехов В.В. Объемная математическая модель и результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния основных сооружений Рогунской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2011. № 4. С. 12—19.
5. Владимиров В.Б., Зарецкий Ю.К., Орехов В.В. Математическая модель мониторинга каменно-земляной плотины гидроузла Хоабинь // Гидротехническое строительство. 2003. № 6. С. 47—52.
6. Зарецкий Ю.К., Карабаев М.И., Тверитнев В.П. Математическая модель мониторинга системы «здание ГЭС — грунтовое основание» // Юбил. сб. науч. тр. Гидропроекта (1930—2000). Вып. 159. М. : АО «Институт Гидропроект», 2000. С. 692—703.
7. Долгих А.П., Подвысоцкий А.А. Расчет прочности массивных железобетонных элементов с использованием метода эквивалентных оболочек // Гидротехническое строительство. 2010. № 8. С. 23—26.
8. Волынчиков А.Н., Мзгалобелов Ю.Б., Орехов В.В. О сейсмостойкости основных сооружений Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 3. С. 22—29.
9. Ghiasian M., Ahmadi M.T. Effective model for dynamic vertical joint opening of concrete arch dam // Proc. of the int. symp. on dams for a changing world — 80th annual meet. and 24th congr. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012. Pp. (4) 41—46.
10. Mohamad T. Amadi, Tahereh Amadi. Failure analysis of concrete dam under unexpected loading // Proc. of the int. symp. on dams for a changing world — 80th annual meet. and 24th congr. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012. Pp. (5) 127—132.
11. Girard J.C., Demirdache M., Diel G., Babini C., Porcelli P. Earthquake design of a gated spillway using 3D finite element method for the Theum Hinboun Expansion Project (THXP) in Laos // Proc. of the int. symp. on dams for a changing world — 80th annual meet. and 24th congr. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012. Pp. (6) 31—36.
12. Dai Huichao, Tain Bin. Design calculation of «soft» gasket in penstock intended for replacement of the expansion joint in the place of abutment of dam power house // Proc. of the 4th int. conf. on dam engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004. Pp. 273—280.
13. Mei Mingrong, Zhou Zhengdong. Analysis of local stress in gravity dam caused by drilling of hole // Proc. of the 4th int. conf. on dam engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004. Pp. 611—617.

14. Mirzabozorg H., Ghaemian M. Nonlinear seismic response of concrete gravity dams using damage mechanics dam-reservoir interaction // Proc. of the 4th int. conf. on dam engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004. Pp. 635—642.
15. Zheng Dongjian, Zhong Lin. Interface behaviour of Roller concrete dam // Proc. of the 4th int. conf. on dam engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004. Pp. 1111—1117.
16. Зарецкий Ю.К., Воронцов Э.И., Гарицелов М.Ю. Экспериментальные исследования упругопластического поведения грунтов // Проектирование и исследование гидротехнических сооружений : тр. Всесоюз. совещ. М. : Энергия, 1980. С. 189—192.
17. Зарецкий Ю.К., Чумичев Б.Д., Воробьев В.Н. Деформируемость крупнообломочного грунта // Сб. науч. тр. Гидропроекта. М., 1993. Вып. 154. С. 10—15.
18. Зарецкий Ю.К., Чумичев Б.Д., Щербина В.И. Прочность и деформируемость горной массы при изменении влажности и условий нагружения // Сб. науч. тр. Гидропроекта. М., 1993. Вып. 154. С. 16—22.
19. Орехов В.В. Комплекс вычислительных программ «Земля-89» // Исследования и разработки по компьютерному проектированию фундаментов и оснований : межвуз. сб. Новочеркасск, 1990. С. 14—20.
20. Зарецкий Ю.К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М. : Стройиздат, 1988. 350 с.

Поступила в редакцию в ноябре 2014 г.

Об авторе: **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.

Для цитирования: 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.

V.V. Orekhov

MATHEMATICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF THE SYSTEM HPP BUILDING — SOIL BASE WITH ACCOUNT FOR THE PHASED CONSTRUCTION OF THE BUILDING

The interaction process of a power plant building with the soil base is studied basing on mathematical modeling of the construction process of Kambarata-2 HPP, taking into account the excavation of foundation pit, the concreting schedule of the building construction, the HPP units putting into operation and territory planning.

Mathematical modeling of stress-strain state of the system “power plant — soil base” in the process of construction was performed by using the computer program “Zemlya” (the Soil), which implements the method of finite elements. Such a behavior of soil was described using elastoplastic soil model, the parameters of which were determined from the results of the triaxial tests.

As shown by the results of the research, the continuous change of settlement, slope, deflection and torsion of the bottom plate and accordingly change of stressed-strained state of power plant are noted during the construction process.

The installed HPP construction schedule, starting from the construction of the first block and the adjacent mounting platform, is leading to the formation of initial roll of bottom plate to the path of the mounting pad. In the process of further construction of powerhouse, up to the 29th phase of construction (out of 40), a steady increase in its subsidence (maximum values of about 4.5 cm) is noted.

Filling of foundation pit hollows and territorial planning of the construction area lead to drastic situation. In this case, as a territory planning points exceeded the relief, the plastic deformation in the soil evolves, resulting in significant subsidence of the bottom plate under the first block (up to 7.4 cm). As a result, the additional subsidence of the soil of bottom plate edges lead to the large vertical movement in relation to its central part and it is bent around the X axis, resulting in a large horizontal tensile stress values of Sz (up to 2.17 MPa) in the constructive elements of the upper part of the powerhouse.

At the same time, the calculations performed on the assumption of instantaneous power plant construction forecast only a uniform slope of bottom plate in the direction of the headwater and do not allow us to track the process of stress-strain state of the power plant for adequate reinforcement of its elements.

Key words: numerical simulation, phased construction, stress-strain state, settlement of the bottom plate, hydro power plant, soil foundation.

References

1. Gol'din A.G., Rasskazov L.N. *Proektirovanie gruntovykh plotin* [Design of Earth Dams]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 304 p. (In Russian)
2. Farivar A.R., Mirghasemi A.A., Mahin Roosta R. Back Analysis of Tabarak Abad Dam Behavior During Construction. Proc. of the Int. Symp. on Dams for a Changing World — 80th Annual Meet. and 24th Congr. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012, pp. (4) 13—18.
3. Zaretskiy Yu.K., Lombardo V.N. *Statika i dinamika gruntovykh plotin* [Statics and Dynamics of Earth Dams]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 255 p. (In Russian)
4. 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 Numerical Studies of the Stress-strain State of the Main Structures of the Rogun HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2011, no. 4, pp. 12—19. (In Russian)
5. 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* [Hydrotechnical Construction]. 2003, no. 6, pp. 47—52. (In Russian)
6. Zaretskiy Yu.K., Karabaev M.I., Tveritnev V.P. Matematicheskaya model' monitoringa sistemy «zдание GES — gruntovoe osnovanie» [Mathematical Monitoring Model of the System «Power Plant Building — Soil Foundation»]. *Yubileynyy sbornik nauchnykh trudov Gidroproyekta (1930—2000)* [Jubilee Collection of the Scientific Papers of Hydroproject (1930—2000)]. No. 159, Moscow, AO «Institut Gidroproyekt» Publ., 2000, pp. 692—703. (In Russian)
7. Dolgikh A.P., Podvysotskiy A.A. Raschet prochnosti massivnykh zhelezobetonnykh elementov s ispol'zovaniem metoda ekvivalentnykh obolochek [Strength Calculation of Massive Concrete Elements Using the Method of Equivalent Shells]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2010, no. 8, pp. 23—26. (In Russian)
8. Volynchikov A.N., Mgalobelov Yu.B., Orekhov V.V. O seysmostoykosti osnovnykh sooruzheniy Boguchanskoy GES [On Seismic Resistance of the Main Structures of Boguchanskaya HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2009, no. 3, pp. 22—29. (In Russian)
9. Ghiasian M., Ahmadi M.T. Effective Model for Dynamic Vertical Joint Opening of Concrete Arch Dam. Proc. of the Int. Symp. on Dams for a Changing World — 80th Annual Meet. and 24th Congr. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012, pp. (4) 41—46.
10. Mohamad T. Amadi, Tahereh Amadi. Failure Analysis of Concrete Dam under Unexpected Loading. Proc. of the Int. Symp. on Dams for a Changing World — 80th Annual Meet. and 24th Cong. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012, pp. (5) 127—132.
11. Girard J.C., Demirdache M., Diel G., Babini C., Porcelli P. Earthquake Design of a Gated Spillway Using 3D Finite Element Method for the Theum Hinboun Expansion Project (THXP) in Laos. Proc. of the Int. Symp. on Dams for a Changing World — 80th Annual Meet. and 24th Cong. of ICOLD. Kyoto, Japan, 2012, pp. (6) 31—36.
12. Dai Huichao, Tain Bin. Design Calculation of "Soft" Gasket in Penstock Intended for Replacement of the Expansion Joint in the Place of Abutment of Dam Power House. Proc. of the 4th Int. Conf. on Dam Engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004, pp. 273—280.

13. Mei Mingrong, Zhou Zhengdong. Analysis of Local Stress in Gravity Dam Caused by Drilling of Hole. Proc. of the 4th Int. Conf. on Dam Engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004, pp. 611—617.
14. Mirzabozorg H., Ghaemian M. Nonlinear Seismic Response of Concrete Gravity Dams Using Damage Mechanics Dam-Reservoir Interaction. Proc. of the 4th Int. Conf. on Dam Engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004, pp. 635—642.
15. Zheng Dongjian, Zhong Lin. Interface Behaviour of Roller Concrete Dam. Proc. of the 4th Int. Conf. on Dam Engineering. Nanjing, China, A.A. Balkema, 2004, pp. 1111—1117.
16. Zaretskiy Yu.K., Vorontsov E.I., Garitselov M.Yu. Eksperimental'nye issledovaniya uprugoplasticheskogo povedeniya gruntov [Experimental Studies of Elastic-plastic Behavior of Soils]. *Proektirovanie i issledovanie gidrotekhnicheskikh sooruzheniy : trudy vsesoyuznogo soveshchaniya* [Proceedings of the All-Union Conference "Design and Study of Hydraulic Structures"]. Moscow, Energiya Publ., 1980, pp. 189—192. (In Russian)
17. Zaretskiy Yu.K., Chumichev B.D., Vorob'ev V.N. Deformiruemost' krupnooblomoch-nogo grunta [Deformability of Coarse Soil]. *Sbornik nauchnykh trudov Gidroproekta* [Collection of the Scientific Papers of Hydroproject]. Moscow, 1993, no. 154, pp. 10—15. (In Russian)
18. Zaretskiy Yu.K., Chumichev B.D., Shcherbina V.I. Prochnost' i deformiruemost' gor-noy massy pri izmenenii vlazhnosti i usloviy nagruzheniya [Strength and Deformability of Rock Mass with Changes in Humidity and Loading Conditions]. *Sbornik nauchnykh trudov Gidroproekta* [Collection of the Scientific Papers of Hydroproject]. Moscow, 1993, no. 154, pp. 16—22. (In Russian)
19. Orekhov V.V. Kompleks vychislitel'nykh programm «Zemlya-89» [Computing Pro-grams Complex "Earth-89"]. *Issledovaniya i razrabotki po komp'yuternomu proektirovaniyu fundamentov i osnovaniy : mezhvuzovskiy sbornik* [Interuniversity Collection "Research and Development in Computer-aided Design of Foundations and Bases"]. Novocherkassk, 1990, pp. 14—20. (In Russian)
20. Zaretskiy Yu.K. *Vyazkoplastichnost' gruntov i raschety sooruzheniy* [Visco-Plasticity of Soils and Calculation of Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988, 350 p. (In Russian)

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

For citation: Orekhov V.V. Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovan-nogo sostoyaniya sistemy zdanie GES — gruntovoe osnovanie s uchetom po etapnosti stroitel'stva zdaniya [Mathematical Modeling of Stress-Strain State of the System HPP Build-ing — Soil Base with Account for the Phased Construction of the Building]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 12, pp. 113—120. (In Russian)