

УДК 627.8.04

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-390-395

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Учет наполнения водохранилища при расчете напряженно-деформированного состояния бетонной плотины

И.В. Баклыков

АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” им. С.Я. Жука»
Волоколамское шоссе, 2, Москва, 125080, Российская Федерация

(поступила в редакцию: 02 апреля 2018 г.; доработана: 05 сентября 2018 г.; принята к публикации: 15 сентября 2018 г.)

Цель. В работе рассматривается вопрос учета водохранилища при расчете напряженно-деформированного состояния бетонной плотины и ее основания.

Методы. Как правило, водохранилища в глобальном масштабе представляют собой большую гравитационную массу в виде воды, которая оказывает воздействие на инженерно-геологическую обстановку в большой толще пород основания. Для исследования данного фактора проведены исследования силовой составляющей водохранилища на основании системы «водохранилище – сооружение – основание». Для расчетов был выбран гидроузел Богучанской ГЭС, который входит в Ангарский каскад и располагается в Сибири. Для выполнения расчетов деформированного состояния создана трехмерная математическая конечно-элементная модель системы «водохранилище – сооружение – основание» на основе которой определены прогнозные значения расчетной осадки бетонной плотины. Математическая модель состоит из фрагмента основания, представленного литосферой и верхней частью астеносферы. Для верификации предложенного учета водохранилища прогнозные величины осадки были сравнены с натурными геодезическими данными, при этом результаты сравнения показали высокую степень корреляции. Высокая степень корреляции позволяет предположить, что предложенный метод достаточно хорошо прогнозирует осадку основания и сооружения при наполнении водохранилища.

Выводы. Результаты проведенных исследований и сопоставлений расчетных и натуральных данных показали необходимость учета водохранилища при расчетных прогнозах величин осадки гидротехнических сооружений и их оснований. Данный прогноз важен при определении критериальных значений диагностических показателей для контроля безопасности сооружения.

Ключевые слова: водохранилище, осадка основания, напряженно-деформированное состояние плотины, конечно-элементная модель

Введение

Водохранилища, создаваемые при сооружении гидроузла, являются источниками сильных техногенных воздействий на геологическую среду [1–6]. Создаваемые водохранилища формируют на большой территории техногенную гидрогеологическую обстановку. Создание водохранилищ приводит к неустановившимся фильтрационным процессам в больших массивах оснований плотин, проявляющихся в изменении силовых и температурных воздействий на горные породы.

На плотинах проводятся многочисленные натурные исследования, в частности ведется мониторинг за осадкой сооружений как в строительный период, так и в период наполнения и эксплуатации сооружения. Многие авторы, ведущие наблюдения за осадкой, отмечают, что при напол-

нении водохранилища плотины приобретают дополнительную осадку [7–11].

Силовое воздействие на систему «водохранилище – сооружение – основание» со стороны водохранилища проявляется через несколько форм, среди которых можно выделить основные, проявляющиеся вследствие фильтрационных воздействий на массив основания и берегов, а также оставшийся в верхнем бьефе «неизрасходованный» на формирование фильтрации напор. Фильтрационные воздействия на породы основания проявляются в виде поверхностных и объемных сил.

Цели исследования и постановка задачи

Целью настоящей работы является определение реальной осадки ложа водохранилища с учетом давления веса водохранилища. В статье в качестве при-

мера описываются исследования влияния водохранилища на напряженно-деформированное состояние плотины Богучанской ГЭС на основе пространственных конечно-элементных моделей системы «водохранилище – сооружение – основание».

В исследованиях использовалась математическая конечно-элементная модель системы «водохранилище – сооружение – основание» в трехмерной постановке.

Разработка математических моделей велась с учетом рекомендаций и наработок [12–16], которые позволили достичь высокой точности расчетов.

В связи с тем, что, как правило, водохранилище ГЭС распространяется на многие километры, исследования были проведены для двух математических моделей:

- общая модель, включающая территорию в несколько десятков километров, для определения общей осадки ложа водохранилища;

- локальная модель, позволяющая проанализировать воздействие водохранилища на бетонную плотину.

Результаты исследований

Зона водохранилища Богучанской ГЭС затрагивает огромную территорию, представленную на рис. 1.

Общая модель включает фрагмент основания (литосферы и верхней части астеносферы), подверженный нагрузке, вызванной весом воды в водохранилище (рис. 2).



Рис. 1. Карта расположения Богучанского водохранилища
[Figure 1. Location map of the Boguchansky reservoir]

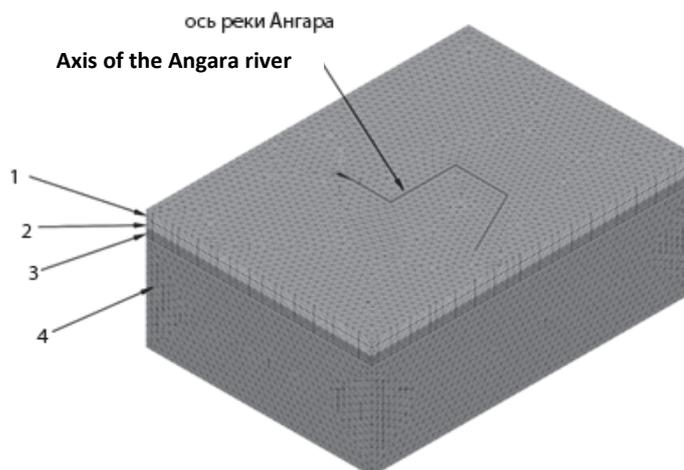


Рис. 2. Общая модель системы «водохранилище – основание»
[Figure 2. General model of the “reservoir – foundation” system]

Основание представлено прочными материалами, в связи с этим в расчетах приняты линейно-упругие модели материалов. Однако, как известно, чем глубже от дневной поверхности расположен грунт, тем он более прочный, соответственно, с глубиной дополнительные деформации от нагрузки уменьшаются. Для этого основание по высоте было разбито на слои с разными модулями деформации.

Так как глубины расчетной области достаточно большие, физико-механические параметры для них были определены исключительно математически (на основе зависимости модуля деформации

от скорости прохождения сейсмических волн), исходя из распределения скоростей продольных сейсмических волн [17]. Значения физико-механических параметров сведены в таблице.

Результаты расчета деформированного состояния основания представлены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, после начала наполнения водохранилища постепенно под действием веса воды основание начинает прогибаться.

Заметно, что при наполнении водохранилища высотой 73 м до отметки НПУ дополнительные вертикальные перемещения ложа водохранилища составляют 143 мм.

Таблица

Физико-механические параметры
[Table. Physico-mechanical parameters]

| № материала [Item no.] | E , МПа [E , MPa] | ν | γ , тс/м ³ [γ , tf/m ³] | $\text{tg}\varphi$ | C , МПа [C , MPa] | Название [Name] |
|---------------------------|---------------------------|-------|--|--------------------|---------------------------|--|
| 1 | 16 000 | 0,20 | – | – | – | 1-й слой земной коры [1st layer of the earth's crust] |
| 2 | 55 000 | 0,20 | – | – | – | 2-й слой земной коры [2nd layer of the earth's crust] |
| 3 | 100 000 | 0,20 | – | – | – | 3-й слой земной коры [3rd layer of the earth's crust] |
| 4 | 100 000 | 0,20 | – | – | – | астеносфера [asthenosphere] |

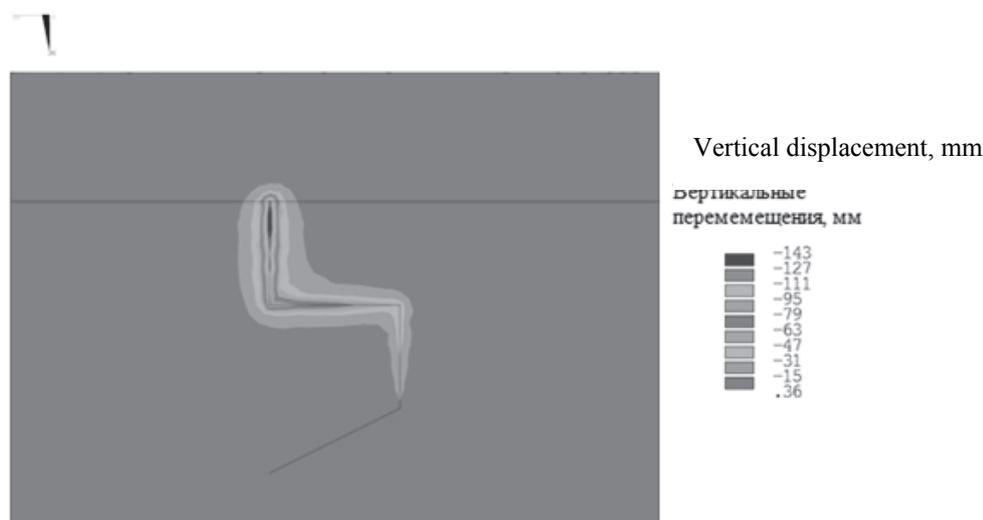


Рис. 3. Дополнительная осадка ложа водохранилища при его наполнении до отметки нормального подпорного уровня (НПУ)
[Figure 3. Additional sediments of the reservoir bed when it is filled to the normal retaining level]

При рассмотрении плана перемещений, а также разреза вдоль русла реки вблизи ГЭС (рис. 4), можно увидеть, что вокруг водохранилища образуется так называемая «воронка проседания», которая распространяется на расстояние порядка 90 км.

Натурные геодезические измерения, как правило, привязываются к фундаментальному реперу, и все измерения отсчитываются исходя из того, что репер неподвижен.

Однако, как видно из рис. 4, фундаментальный репер, который обычно относится по-

дальше от сооружения (порядка 2 км) и считается неподвижным, в свою очередь, попадает в ту самую «воронку проседания», тем самым приобретая дополнительное перемещение.

В связи с этим при сравнении расчетной осадки и измеренной геодезией необходимо учитывать именно относительную расчетную осадку (относительно фундаментального репера).

Сравнение осадки показано на рис. 5.

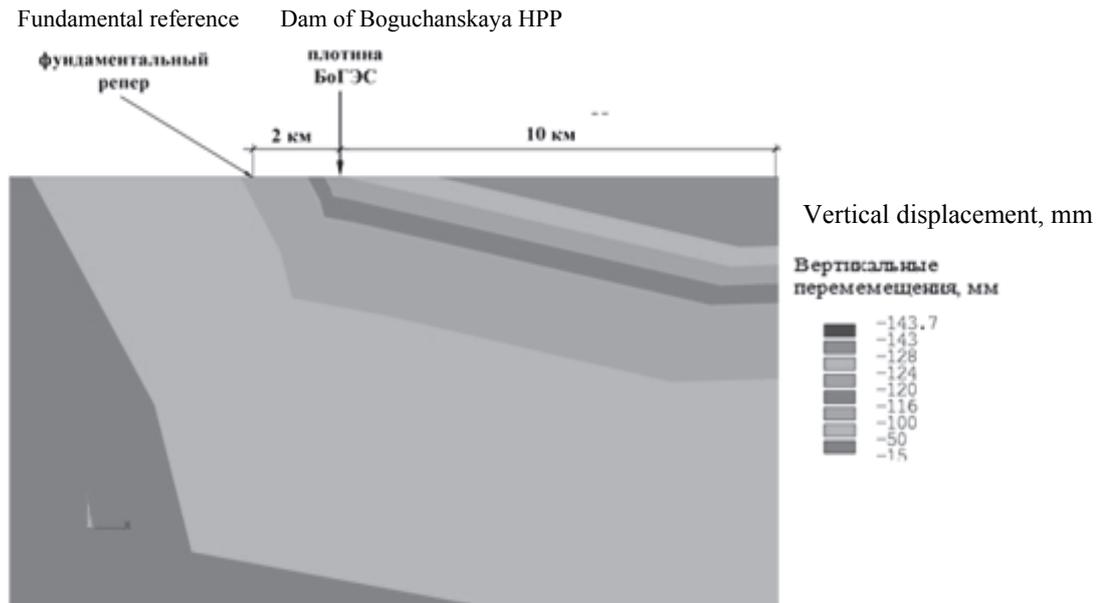


Рис. 4. Вертикальные перемещения на разрезе вдоль русла реки
 [Figure 4. Vertical displacements in the section along the river bed]

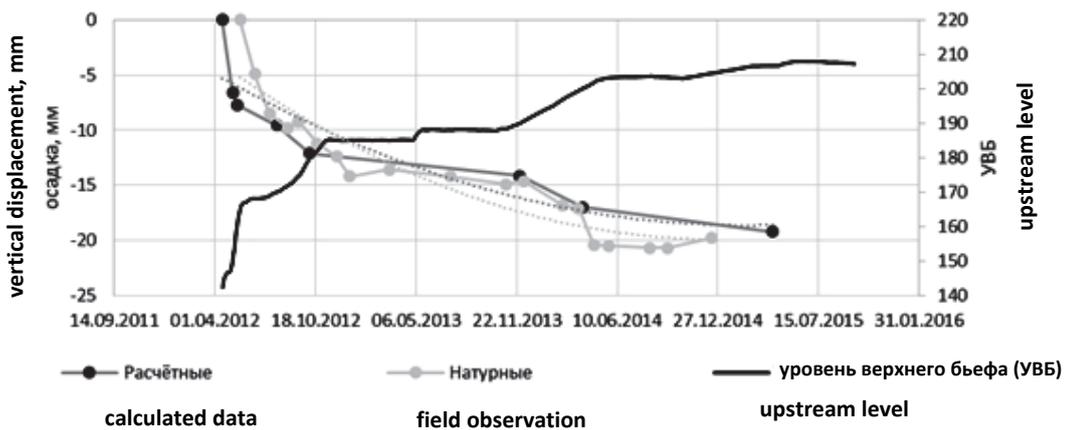


Рис. 5. Сравнение расчетной осадки и натуральных геодезических наблюдений
 [Figure 5. Comparison of calculated sediment and field geodesic observations]

Выводы

Расчеты показали, что наполнение водохранилища влияет на окружающую инженерно-геологическую обстановку. В частности, создание водохранилищ приводит к проседанию, пусть даже небольшому, поверхности вокруг самого водохранилища. Но что самое важное, наполнение водохранилища влияет на глобальные перемещения плотины.

© Баклыков И.В., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Список литературы

1. Савич А.И., Газиев Э.Г. Влияние водохранилищ на поведение скальных массивов оснований высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2005. № 11. С. 33–37.
2. Тетельмин В.В., Уляшинский В.А. Техногенные воздействия и процессы в скальных основаниях плотин. М.: Энергоатомиздат, 1990. 160 с.
3. Балавазе Б.К., Абашидзе В.Г. Наклоны и деформации земной коры в районе Ингурской ГЭС. Тбилиси: Мецниереба, 1985. 117 с.
4. Савич А.И., Ильин М.М. Особенности влияния водохранилищ на скальные основания больших плотин // Гидротехническое строительство. 2003. № 3. С. 48–53.

5. Тетельмин В.В., Баклыков И.В. Глубинные процессы массо- и теплопереноса в основаниях высоких плотин // Известия ВНИИГ. 2017. Т. 283. С. 46–54.

6. Zoback M.D. Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 2010. 461 p.

7. Абакаров А.Р., Дурчева В.Н. Состояние Чиркейского гидроузла по данным многолетних комплексных натуральных наблюдений // Гидротехническое строительство. 2004. № 9. С. 43–51.

8. Дурчева В.Н., Пучкова С.М. Работа плотины Бурейской ГЭС при наполнении водохранилища // Гидротехническое строительство. 2006. № 1. С. 8–15.

9. Марчук А.Н., Марчук Н.А. Тектонофизические аспекты напряженно-деформированного состояния больших бетонных плотин // Гидротехническое строительство. 2010. № 3. С. 31–34.

10. Stateler J.N., Iarossi B. Using monitoring programmes to manage dam safety risks // Hydropower and dams. 2016. No. 4. Pp. 90–96.

11. Brouillac P., Carreaud P. New approaches for improved dam monitoring // Hydropower and dams. 2015. No. 3. Pp. 70–75.

12. Volynchikov A.N., Mgalobelov Y.B., Baklykov I.V. Connecting of the concrete and rock-fill dams at the Boguchanskaya HPP // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 48. No. 6. Pp. 431–438.

13. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Шакарс И.Э., Новиков С.П. Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния левого блока здания Плявиньской ГЭС с учетом данных натуральных наблюдений // Гидротехническое строительство. 1998. № 2. С. 47–53.

14. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Гребенищikov В.П., Цыбаков В.А., Нефедов А.В., Катанов А.Д., Понома-

рев Д.И. Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2005. Т. 244. С. 227–233.

15. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б., Нефедов А.В. Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений // Гидротехническое строительство. 1999. № 8/9. 1999. С. 22–28.

16. Козинец Г.Л. Математическое пространственное моделирование гидроагрегатных блоков высоконапорных ГЭС // Гидротехническое строительство. 2014. № 11. С. 22–25.

17. Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР. М.: Наука, 1987. 238 с.

Об авторе

Баклыков Игорь Вячеславович – ведущий инженер АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” им. С.Я. Жука» (Москва, Россия). *Область научных интересов:* гидротехническое строительство, расчеты сооружений в пространственной постановке, анализ натуральных данных. *Контактная информация:* e-mail – moscow_igor88@mail.ru. eLIBRARY SPIN-код: 7987-9045.

Для цитирования

Баклыков И.В. Учет наполнения водохранилища при расчете напряженно-деформированного состояния бетонной плотины // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 5. С. 390–395. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-390-395.

RESEARCH PAPER

Accounting for the filling of the reservoir when calculating the stress-strain state of a concrete dam

Igor V. Baklykov

JSC “Institute Hydroproject”
2 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125080, Russian Federation

(received: April 02, 2018; revised: September 05, 2018; accepted: September 15, 2018)

Abstract. The aim of work. The paper considers the issue of reservoir accounting when calculating the stress-strain state of a concrete dam and its foundation.

Solution technique. As a rule, reservoirs on a global scale represent a large gravitational mass in the form of water, which affects the engineering-geological situation in a large deep of rocks foundation. To study this factor, an investigation was made of the power component of the reservoir on the basis of the “reservoir – structure – rock foundation” system. For the calculations, the hydro power plant of Boguchanskaya HPP was selected, which is part of the Angara river cascade and is located in Siberia. To perform the stress-strain state calculations, a three-dimensional mathematical finite element model of the “reservoir – structure – rock foundation” system was created on the basis of which the predicted values of the calculated draft of the concrete dam are determined. The mathematical model consists of a fragment of the rock foundation, represented by the lithosphere and the upper part of the asthenosphere. To verify the proposed reservoir account, the predicted sediment values were compared with geodesic data, while the comparison results showed a high degree of

correlation. A high degree of correlation suggests that the proposed method predicts the rock foundation and structure sediments quite well when filling the reservoir.

Results. The results of the conducted investigations and comparisons of calculated and field data have shown the necessity of reservoir accounting when calculating predictions of sediment values of hydraulic structures and their rock foundation. This forecast is quite important in determining the critical values of diagnostic indicators for the safety control of the structure.

Keywords: reservoir, rock foundation sediments, stress-strain state of the dam, finite element model

References

1. Savich A.I., Gaziev Eh.G. (2005). Vliyanie vodohranilishch na povedenie skal'nyh massivov osnovanij vysokih plotin [Influence of reservoirs on the behavior of rock massifs in the foundations of high dams]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (11), 33–37. (In Russ.)
2. Tetel'min V.V., Ulyashinskij V.A. (1990). *Tekhnogennye vozdeystviya i processy v skal'nyh osnovaniyah plotin [Man-caused impacts and processes in rock bases of dams]*. Moscow: Ehnergoatomizdat publ., 160. (In Russ.)
3. Balavaze B.K., Abashidze V.G. (1985). *Naklony i deformacii zemnoj kory v rajone Ingurskoj GEHS [The slopes and deformations of the earth's crust in the region of the Inguri hydroelectric power station]*. Tbilisi: Mecniereba publ., 117. (In Russ.)
4. Savich A.I., Il'in M.M. (2003). Osobennosti vliyaniya vodohranilishch na skal'nye osnovaniya bol'shikh plotin [Features of the influence of reservoirs on the rock bases of large dams]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (3), 48–53. (In Russ.)
5. Tetel'min V.V., Baklykov I.V. (2017). Glubinnye processy masso- i teploperenosa v osnovaniyah vysokih plotin [Deep processes of mass and heat transfer in the foundations of high dams]. *Izvestiya VNIIG*, 283. (In Russ.)
6. Zoback M.D. (2010). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press, 461.
7. Abakarov A.R., Durcheva V.N. (2004). Sostoyanie Chirkejskogo gidrouzla po dannym mnogoletnih kompleksnyh naturnyh nablyudenij [The state of the Chirkei hydroelectric complex according to the data of long-term complex natural observations]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (9), 43–51. (In Russ.)
8. Durcheva V.N., Puchkova S.M. (2006). Rabota plotiny Burejskoj GEHS pri napolnenii vodohranilishcha [The work of the dam at the Bureyskaya HPP during the filling of the reservoir]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (1), 8–15. (In Russ.)
9. Marchuk A.N., Marchuk N.A. (2010). Tektonofizicheskie aspekty napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya bol'shikh betonnyh plotin [Tectonophysical aspects of the stress-strain state of large concrete dams]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (3), 31–34. (In Russ.)
10. Jay N. (2016). Stateler, Brad Iarossi Using monitoring programmes to manage dam safety risks. *Hydropower and dams*, (4), 90–96.
11. Brouillac P., Carreaud P. (2015). New approaches for improved dam monitoring. *Hydropower and dams*, (3), 70–75.
12. Volynchikov A.N., Mgalobelov Y.B., Baklykov I.V. (2015). Connecting of the concrete and rock-fill dams at the Boguchanskaya HPP, *Power Technology and Engineering*, 48(6), 431–438.
13. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Shakars I.Eh., Novikov S.P. (1998). Raschyotnaya ocenka napryazhyonno-deformirovannogo sostoyaniya levogo bloka zdaniya Plyavin'skoj GEHS s uchytom dannyh naturnyh nablyudenij [A computational estimate of the stress-strain state of the left block of the Plavinskaya HPP building, taking into account the field observations], *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (2), 47–53. (In Russ.)
14. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Grebenshchikov V.P., Cybakov V.A., Nefyodov A.V., Katanov A.D., Ponomaryov D.I. (2005). Raschyotnoe obosnovanie reshenij po obespecheniyu nadyozhnosti konstrukcij vodosbrosa № 2 betonnoj plotiny Boguchanskoj GEHS [Calculation justification of the decisions to ensure the reliability of the spillways design of No. 2 concrete dam of the Boguchanskaya HPP]. *Izvestiya VNIIG [Proceedings of the VNIIG]*, 244, 227–233. (In Russ.)
15. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Lyapin O.B., Nefedov A.V. (1999). Issledovaniya betonnyh i zhelezobetonnyh ehnergeticheskikh sooruzhenij [Investigations of concrete and jelly-zibeton energy facilities], *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (8/9), 22–28. (In Russ.)
16. Kozinec G.L. (2014). Matematicheskoe prostranstvennoe modelirovanie gidroagregatnyh blokov vysokonapornyh GEHS [Mathematical spatial modeling of hydrounit blocks of high-pressure hydroelectric power stations], *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo [Hydrotechnical construction]*, (11), 22–25. (In Russ.)
17. *Glubinnoe stroenie slabosejsmichnyh regionov SSSR [Deep structure of the weakly seismic regions of the USSR]*. (1987). Moscow: Nauka publ., 238. (In Russ.)

About the author

Igor V. Baklykov – Leading Engineer of the JSC “Institute Hydroproject” (Moscow, Russia). *Scientific interests:* hydrotechnical construction, calculations of structures in 3D, analysis of field data. *Contact information:* e-mail – moscow_igor88@mail.ru. eLIBRARY SPIN-code: 7987-9045.

For citation

Baklykov I.V. (2018). Accounting for the filling of the reservoir when calculating the stress-strain state of a concrete dam. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(5), 390–395. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-390-395. (In Russ.)