

Расчет напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины в программном комплексе SOFiSTiK

Reliability of low pressure waterworks with earthen dams

д.т.н., профессор Лалин Владимир Владимирович
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
vllalin@yandex.ru
Санкт-Петербург
Российская Федерация

D. Sc., Professor Vladimir Vladimirovich Lalin
Saint-Petersburg State Polytechnical University
vllalin@yandex.ru
Saint-Petersburg
Russian Federation

аспиранты Савченко Алексей Владимирович, Яваров Александр Валерьевич,
Зданчук Елизавета Викторовна, Беляев Дмитрий Игоревич
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
ya.int@yandex.ru, yavarov_av@mail.ru, zelizaveta@yandex.ru, belyaevj@mail.ru
Санкт-Петербург
Российская Федерация

Graduate students Alexey Vladimirovich Savchenko, Alexandr Valerjevich Yavarov,
Elizaveta Viktorovna Zdanchuk, Belyaev Dmitriy Igorevich
Saint-Petersburg State Polytechnical University
ya.int@yandex.ru, yavarov_av@mail.ru, zelizaveta@yandex.ru, belyaevj@mail.ru
Saint-Petersburg
Russian Federation

Ключевые слова: Расчет, МКЭ, арочно-гравитационная плотина, плотина+основание, SOFiSTiK.

В августе 2009 г. произошла авария в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС, повлекшая человеческие жертвы.

С целью оценки возможных последствий аварии для надежности (прочности и устойчивости) плотины Саяно-Шушенской ГЭС руководство компании «РусГидро» решило провести проверку прочности и устойчивости плотины с помощью конечно-элементного моделирования.

Выполнение этой работы было поручено нескольким организациям, в числе которых был и Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. В настоящей статье кратко излагаются методология и некоторые результаты проведенной работы.

Key words: calculation, FEM, arch-gravity dam, dam+foundation, SOFiSTiK.

There was a failure in the engine room of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station, caused victims in August 2009. In order to assess the possible consequences for the reliability (strength and stability) of the Sayano-Shushenskaya HPP management of "RusHydro" decided to test the strength and stability of the dam using finite-element modeling. The implementation of this work was entrusted to several organizations, including St. Petersburg State Polytechnic University. This paper summarizes the methodology and some of the results of the work.

Введение

В августе 2009 г. произошла авария в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС, повлекшая человеческие жертвы. С целью оценки возможных последствий аварии для надежности (прочности и устойчивости) плотины Саяно-Шушенской ГЭС руководство компании «РусГидро» решило провести проверку прочности и устойчивости плотины с помощью конечно-элементного моделирования. Выполнение этой работы было поручено нескольким организациям, в числе которых был и Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. В настоящей статье кратко излагаются методология и некоторые результаты проведенной работы.

Характеристика объекта и задачи работы

Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) на реке Енисей (рисунок 1) является одной из крупнейших в мире. Основные параметры, характеризующие масштаб сооружения следующие: высота плотины в русловой части – 234 м; длина по гребню – 1070 м; размеры профиля: ширина по гребню - 25 м, по подошве – 103 м. Плотина выполнена горизонтальными арками постоянной толщины, разрезана по дуге строительными швами на 68 секций, в поперечном направлении центральные секции разрезаны на четыре столба, шириной 25 – 27 м каждый (рисунок 2а). Береговые секции имеют переменную высоту и толщину.



Рисунок 1. Общий вид плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Плотина СШГЭС возведена в Карловском створе долины реки Енисей, сложенной из прочных скальных пород (пара и ортосланцы). По деформационным свойствам скальное основание и береговые массивы – неоднородные; важное значение для работы плотины имеет асимметрия деформационных свойств берегов: в среднем модули деформации одного берега отличаются в 1,2 раза от модулей деформации противоположного берега. По прочности основание в целом прочное: в среднем по массиву сцепление $c = 0,5$ МПа, угол трения $\varphi = 45^\circ$.

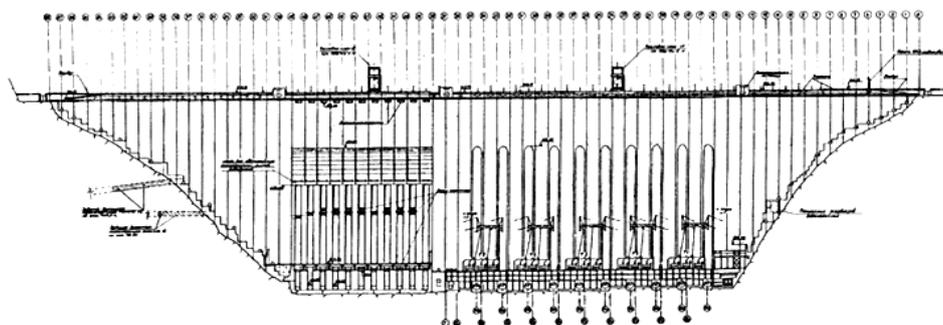


Рисунок 2а. Схема плотины с разбивкой на секции

Строительство плотины началось в 1970 г. и было закончено в 1988 г. На этапе проектирования расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины велись на основе упрощенных расчетных схем, что было связано с недостаточным развитием в то время методов расчета и отсутствием мощных компьютеров. Этот факт, а также имевшие место отклонения от проектной последовательности возведения и нагружения плотины, привели к тому, что в процессе эксплуатации выявились отклонения от проектного состояния плотины.

Наиболее существенным было появление со стороны напорной грани зон разуплотнения (трещин) субгоризонтального направления: по контакту плотины с основанием и на отметке 40 м выше основания. Появление таких зон привело к резкому увеличению фильтрационных расходов через тело плотины и основание. Для уменьшения фильтрационных расходов в 1996 - 2003 гг. были проведены ремонтные

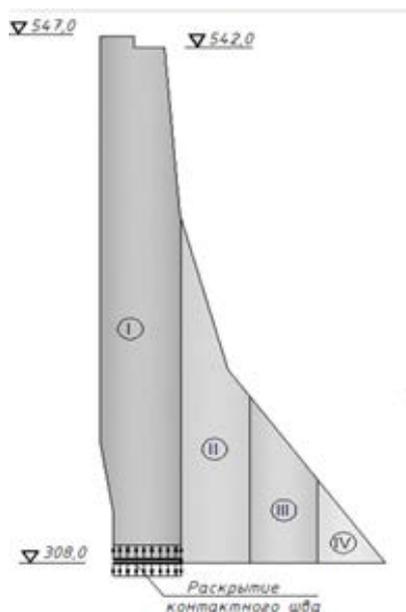


Рисунок 26. Разрез центральной секции с разбивкой на столбы

работы – заполнение (инъектирование) разуплотненных зон специальными заполнителями – вязкими полимерными смолами.

За состоянием плотины и основания СШГЭС осуществляется постоянное наблюдение с помощью разветвленной системы контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Предметом наблюдения являются горизонтальные и вертикальные смещения отдельных точек сооружения, углы поворота поперечных сечений на различных отметках, температуры и деформации в отдельных точках, величина и глубина раскрытия деформационных строительных швов, вертикальные и горизонтальные напряжения в отдельных точках, фильтрационные расходы в теле плотины, в основании и берегах, а также температура внешней среды - воздуха и воды в водохранилище. Общее количество аппаратуры, используемой для контроля состояния плотины, основания и береговых массивов составляет почти 7000 шт.

Для всех основных контролируемых параметров установлены критериальные значения, превышение которых свидетельствует о том, что система находится в нормальном эксплуатационном состоянии.

Согласно техническому заданию Заказчика конечно-элементная модель системы «плотина – основание» должна была расчетным путем воспроизвести все основные этапы возведения, загрузки и эксплуатации плотины СШГЭС:

1. последовательное возведение и нагружение плотины с учетом возможного раскрытия трещин;
2. работу плотины при переменном уровне водохранилища с учетом раскрытия трещин;
3. проведение ремонтных работ - инъектирование трещин;
4. работу плотины при переменном уровне водохранилища в современном послеремонтном состоянии.

Наряду с переменной гидростатической нагрузкой и собственным весом сооружения необходимо было учесть переменное температурное воздействие – сезонные колебания температур воздуха и воды в водохранилище, которые оказывают значительное влияние на НДС системы «плотина - основание».

Качество разработанной конечно-элементной модели должно было оцениваться путем сопоставления результатов расчетов с данными натурных наблюдений, полученных с помощью КИА.

Описание конечно-элементной модели

В качестве инструмента для построения расчетной модели был использован комплекс программ конечно-элементного моделирования SOFiStiK. Этот комплекс позволяет рассчитывать совместные пространственные системы «сооружение-основание», в том числе, с нелинейными свойствами, и включает в себя модули для решения статических, динамических фильтрационных и теплофизических задач.

В комплексе SOFiStiK есть инструменты, позволяющие удобно моделировать процесс последовательного возведения сооружений, при этом можно учесть изменение свойств материалов во времени, например, «старение» бетона. Также есть инструменты для моделирования возможного раскрытия трещин – односторонние связи, которые включаются в работу при сжатии и выключаются при достижении критического растягивающего усилия.

Пространственная конечно-элементная модель системы «плотины-основание» построена из объемных восьмиузловых конечных элементов с учетом разделения плотины на секции и столбы, необходимости проведения расчета последовательности возведения сооружения, задания зон неоднородности бетона и скального массива, а также установления односторонних связей. По гребню плотины расположены четыре конечных элемента, по подошве центральных секций – шестнадцать элементов. Таким образом, на каждый столб плотины приходится по четыре конечных элемента (рисунок 3а). Зоны установки односторонних связей приведены на этом же рисунке. На рисунке 3б приведены схемы моделирования шести этапов возведения плотины.

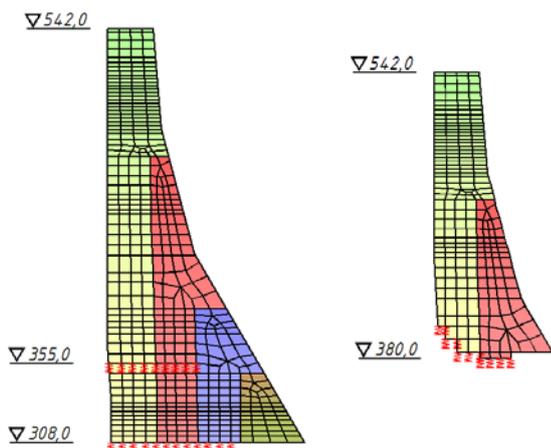


Рисунок 3а. Конечно-элементарная разбивка секций с зонами установки односторонних связей

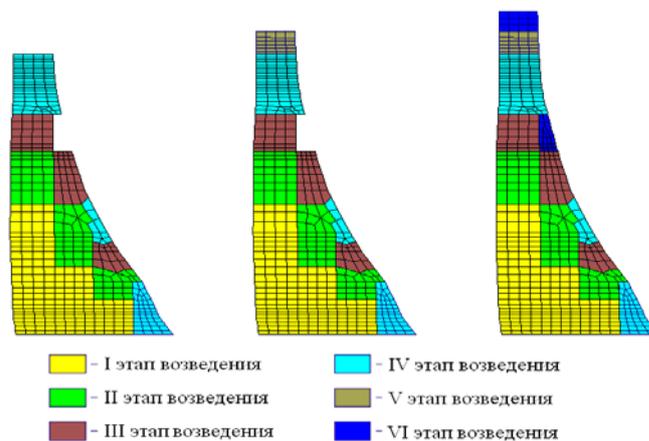


Рисунок 3б. Моделирование этапов возведения плотины

На рисунках 4, 5, 6 приведен общий вид конечно-элементных моделей основания, плотины и системы «плотина-основание». Общее число узлов в модели – 292722, из них в плотине – 109928; общее число конечных элементов в модели – 260904, из них в плотине – 92938. Таким образом, общее количество степеней свободы (неизвестных) в построенной конечно-элементной модели составляет почти 900000.

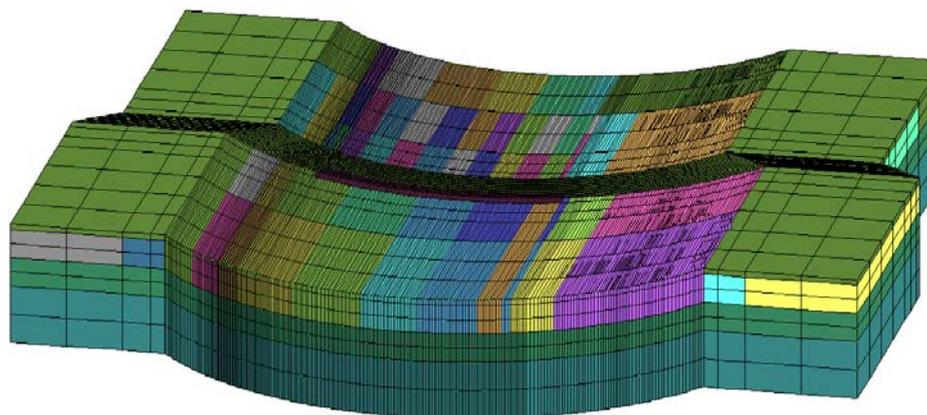


Рисунок 4. Конечно-элементарная модель скального основания

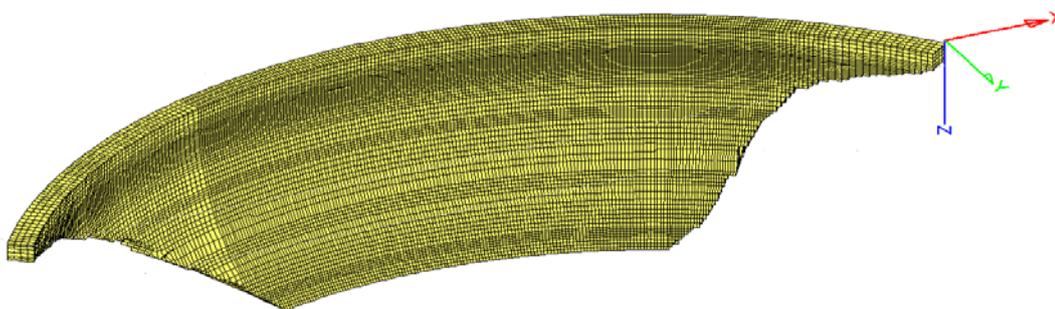


Рисунок 5. Конечно-элементарная модель плотины

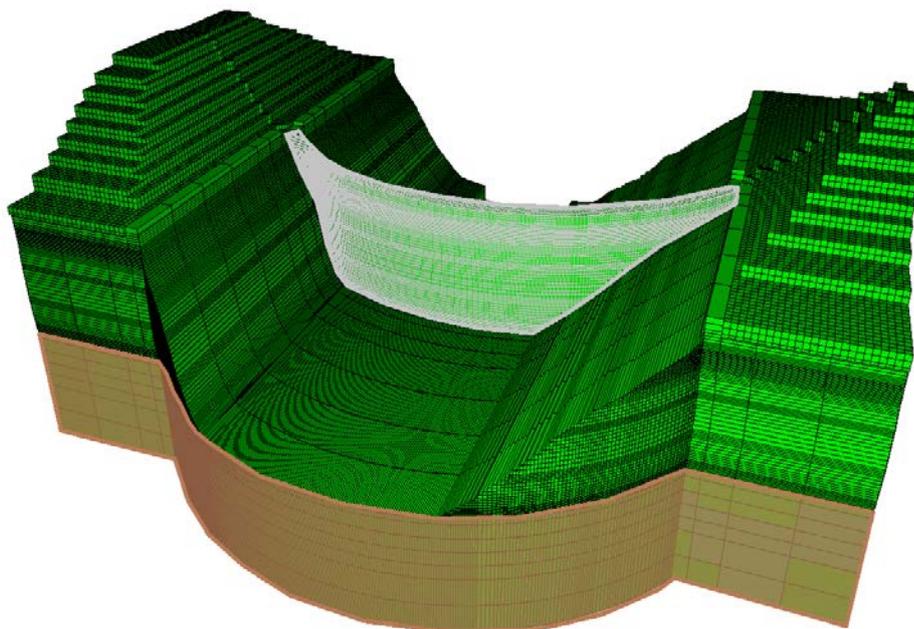


Рисунок 5. Конечно-элементная модель системы «плотина-основание»

Результаты расчетов и выводы

Важным этапом построения конечно-элементной модели был этап параметрической идентификации – уточнения характеристик модели по данным натуральных наблюдений. Такие сравнения проводились на сериях задач при действии гидростатической или температурной нагрузок. В качестве примера на рисунке 7 выполнено сравнение для горизонтальных перемещений гребня плотины при подъеме уровня водохранилища на 32 м. Был выполнен также расчет по определению первой частоты собственных колебаний системы: расчетное значение частоты – 1,2 Гц, по данным натурального эксперимента – 1,1 Гц. На рисунке 8 приведена первая форма собственных колебаний плотины. Во всех расчетах удалось добиться удовлетворительного совпадения расчетных и натуральных результатов, максимальная погрешность не превосходила 10%.

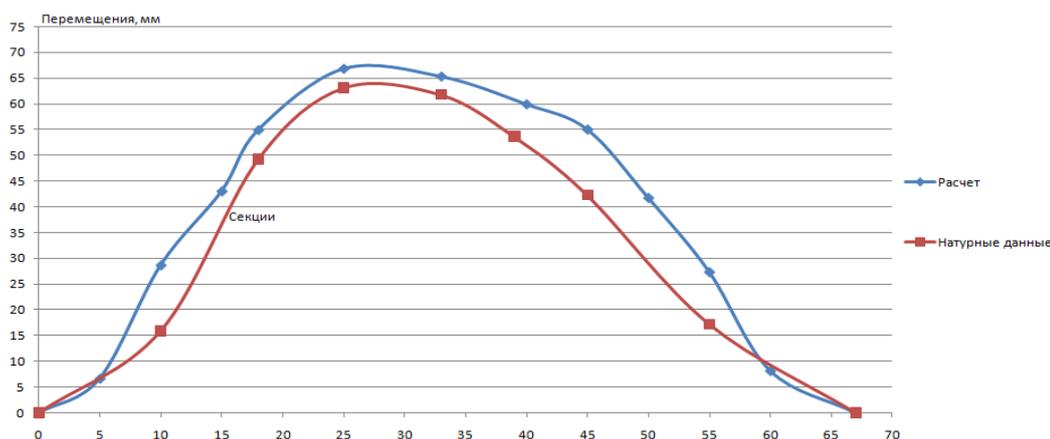


Рисунок 5. Горизонтальные перемещения гребня плотины

После проведенного уточнения параметров модели по данным натуральных измерений была проведена серия расчетов НДС для сравнения с натурными данными 2009 г., в том числе для состояния сооружения после аварии августа 2009 г. В качестве примера в таблице 1 проведено сопоставление горизонтальных перемещений по высоте плотины для трех секций (№18, 33, 45) при изменении уровня водохранилища между датами 05.05.2009 г. и 29.10.2009 г.

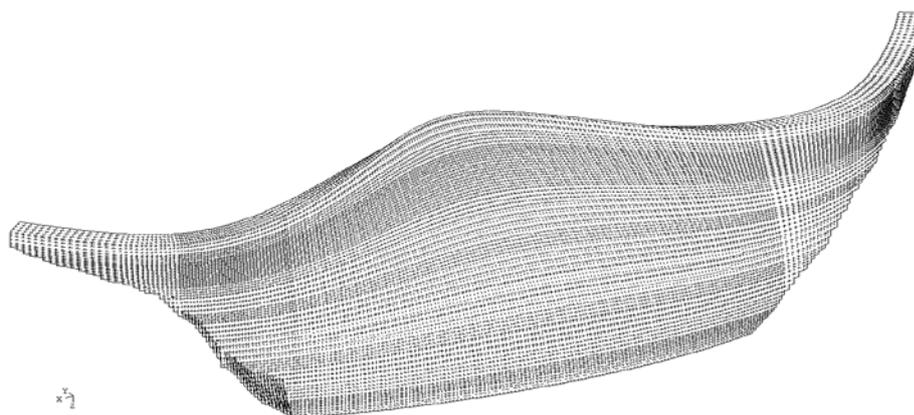


Рисунок 8. Первая форма собственных колебаний плотины

Таблица 1. Горизонтальные перемещения

Отметки	Расчетное перемещение, мм			Натурные данные, мм		
	С.18	С.33	С.45	С.18	С.33	С.45
542	44.7	57.65	41.34	48.28	59.01	36.48
521	38.08	51.28	33.31	43.38	53.13	33.9
494	32.22	43.78	28.24	36.36	44.95	28.46
467	25.83	34.56	22.89	Н/Д*	36.72	Н/Д
440	20.57	28.6	16.9	22.71	29.03	19.14
413	15.87	23.45	13.15	17.03	22.3	14.54
386	11.2	16.27	8.94	12.24	15.81	9.6

*Примечание: Н/Д – нет данных

Аналогичные, достаточно близкие к натурным расчетные значения были получены и для напряжений. Ни одно из этих значений не приближается к установленным критериальным (предельным) значениям.

На основании выполненного исследования был сделан вывод, что авария в августе 2009 г. не привела к недопустимым изменениям в состоянии системы «плотина-основание». В настоящее время плотина Саяно-Шушенской ГЭС находится в нормальном эксплуатационном состоянии.

Литература

1. СНиП II-54-77. Плотины бетонные и железобетонные.
2. Пособие по методике обработки данных натурных исследований бетонных гидросооружений. Л.: «Энергия», 1975. 149с .
3. Fanelli V., Giuseppetti G., Riccioni R. Experience gained during control of static behavior of some large Italian dams // 13-th Congr.on large dams/ New Dehli. 1998. № 9. 24 p.
4. Theory on Arch Dams // Pergamon Press. 1965. 558p.
5. Treatise on Dams // Chapter 10. Arch Dams. US Dept. Interior/ Bureau of Reclamation. Denver Col. 1948. 557 p.
6. Bulletin on Dam Safety Management. October 30, 2010. Dam Safety Committee. International Commission on Large Dams (ICOLD).11 p.
7. Шахмаева Е. Ю. База данных для задач контроля и диагностики крупных ГТС. // Гидротехническое строительство. 1998. №9. С. 48-51.
8. Ф1.22. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений. – Собрание законодательства Российской Федерации. №30. Ст.3589.

9. Фрадкин Б. В. Исследования совместной статической работы арочно-гравитационной плотины и основания. // Энергетическое строительство. 1977. №6. С.127-133.
10. РД 153-34.2-21.342-00. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений.
11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М., «Мир», 1975. 571с.
12. Загрядский И. И. Гидротехнические сооружения. Контроль и обработка наблюдений. С-Пб.: СПбГТУ, 1999. 62с.
13. Александров Ю. Н. Разработка математической модели для оценки напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений СШГЭС // Вестник Красноярской архитектурно-строительной академии. 2003. № 6. С.34-37.
14. Александров Ю. Н. Расчетные исследования поведения плотины Саяно-Шушенской ГЭС в годовом цикле изменения нагрузок. // Гидротехническое строительство. М.: Энергопрогресс, 2006. №6. С. 9-12.
15. Александров Ю. Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования ее состояния // Гидротехническое строительство. 2008. № 11. С. 44-49.
16. Гордон Л. А., Френкель А.С. Диагностика бетонных плотин по данным натурных измерений относительных осадок // Известия ВНИИГ. 1989. №214. С. 118-124.
17. Новожилов В. В. Теория упругости. Л: Судпромгиз, 1958. 370 с.
18. Дурчева В. Н., Пучкова С. М., Загрядский И. И. Учет сезонных изменений схемы работы бетонных плотин при анализе данных натурных измерений // Известия ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева, 2000. №237. С. 45-53.
19. Ефименко А. И., Рубинштейн Г. Л. Водосбросные сооружения Саяно-Шушенской ГЭС. Изд. «ОАО ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева». 2008. 509 с.
20. Напряженно-деформированное состояние плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом последовательности возведения, омоноличивания швов при ее возведении и поэтапном наполнении водохранилища / Антонов С. С., Вульфович Н. А., Зайцев В. Н., Леонтьев Б. Н., Суслопаров В. А., Фрид С. А. // Материалы научно-технической конференции. Решение проблем Саяно-Шушенского гидроэнергетического комплекса. Л.: Энергоатомиздат, 1987. С.102-110.
21. Александровская Э. К., Урахчин В. П. Анализ горизонтальных перемещений гребня Красноярской плотины по данным натурных наблюдений // Известия ВНИИГ, 1972. С. 270-279.
22. Kurzin V. B., Seleznev V. S. Mechanism of emergence of intense vibrations of turbines on the Sayano-Shushensk hydro power plant // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2010. Vol. 51. № 4. Pp. 590-597.
23. Brandão J.L.B. Performance of the equivalent reservoir modelling technique for multi-reservoir hydropower systems // Water Resources Management. 2010. Vol. 24. № 12. Pp. 3101-3114.

References

1. SNiP II-54-77. Plotiny betonnye i zhelezobetonnye.(rus)
2. Posobie po metodike obrabotki dannyh naturnyh issledovanij betonnyh gidrosooruzhenij. L.: «Jenergija», 1975. 149с .Fanelli V., Giuseppetti G., Riccioni R. Experience gained during control of static behavior of some large Italian dams // 13-th Congr.on large dams/ New Dehli. 1998. № 9. 24 p. (rus)
3. Fanelli V., Giuseppetti G., Riccioni R. Experience gained during control of static behavior of some large Italian dams // 13-th Congr.on large dams/ New Dehli. 1998. № 9. 24 p.
4. Theory on Arch Dams // Pergamon Press. 1965. 558p.
5. Treatise on Dams // Chapter 10. Arch Dams. US Dept. Interior/ Bureau of Reclamation. Denver Col. 1948. 557 p.
6. Bulletin on Dam Safety Management. October 30, 2010. Dam Safety Committee. International Commission on Large Dams (ICOLD).11 p.
7. Shahmaeva E. Ju. Baza dannyh dlja zadach kontrolja i diagnostiki krupnyh GTS. // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. 1998. №9. S. 48-51. (rus)
8. F1.22. Federal'nyj zakon «O bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenij. – Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federacii. №30. St.3589. (rus)
9. Fradkin B. V. Issledovanija sovmestnoj staticheskoj raboty arochno-gravitacionnoj plotiny i osnovanija. // Jenergeticheskoe stroitel'stvo. 1977. №6. S.127-133. (rus)
10. RD 153-34.2-21.342-00. Metodika opredelenija kriteriev bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenij. (rus)

11. Zenkevich O. *Metod konechnyh jelementov v tehnikе. M., «Mir», 1975. 571 s. (rus)*
12. Zagradskij I. I. *Gidrotehnicheskie sooruzhenija. Kontrol' i obrabotka nabljudenij. S-Pb.: SPbGTU, 1999. 62 s. (rus)*
13. Aleksandrov Ju. N. *Razrabotka matematicheskoy modeli dlja ocenki naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija gidrotehnicheskijh sooruzhenij SShGJeS // Vestnik Krasnojarskoj arhitekturno-stroitel'noj akademii. 2003. № 6. S.34-37. (rus)*
14. Aleksandrov Ju. N. *Raschetnye issledovanija povedenija plotiny Sajano-Shushenskoj GJeS v godovom cikle izmenenija nagruzok. // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. M.: Jenergoprogress, 2006. №6. S. 9-12. (rus)*
15. Aleksandrov Ju. N. *Ispol'zovanie raschetnoj modeli plotiny Sajano-Shushenskoj GJeS dlja ocenki i prognozirovaniya ee sostojanija // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. 2008. № 11. S. 44-49. (rus)*
16. Gordon L. A., Frenkel' A.S. *Diagnostika betonnyh plotin po dannym naturnyh izmerenij otnositel'nyh osadok // Izvestija VNIIG. 1989. №214. S. 118-124. (rus)*
17. Novozhilov V. V. *Teorija uprugosti. L.: Sudpromgiz, 1958. 370 s. (rus)*
18. Durcheva V. N., Puchkova S. M., Zagradskij I. I. *Uchet sezonnyh izmenenij shemy raboty betonnyh plotin pri analize dannyh naturnyh izmerenij // Izvestija VNIIG im.B.E.Vedeneeva, 2000. №237. S. 45-53. (rus)*
19. Efimenko A. I., Rubinshtejn G. L. *Vodosbrosnye sooruzhenija Sajano-Shushenskoj GJeS. Izd. «OAO VNIIG im.B.E.Vedeneeva». 2008. 509 c. (rus)*
20. *Naprjazhenno-deformirovannoe sostojanie plotiny Sajano-Shushenskoj GJeS s uchetom posledovatel'nosti vozvedenija, omonolichivaniya shvov pri ee vozvedenii i pojetapnom napolnenii vodohranilishha / Antonov S. S., Vul'fovich N. A., Zajcev V. N., Leont'ev B. N., Susloparov V. A., Frid S. A. // Materialy nauchno-tehnicheskoy konferencii. Reshenie problem Sajano-Shushenskogo gidroenergeticheskogo kompleksa. L.: Jenergoatomizdat, 1987. S.102-110. (rus)*
21. AleksandrovskaJa Je. K., Urahchin V. P. *Analiz gorizonta'l'nyh peremeshhenij grebnja Krasnojarskoj plotiny po dannym naturnyh nabljudenij // Izvestija VNIIG, 1972. S. 270-279. (rus)*
22. Kurzin V. B., Seleznev V. S. *Mechanism of emergence of intense vibrations of turbines on the Sayano-Shushensk hydro power plant // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2010. Vol. 51. № 4. Pp. 590-597.*
23. Brandão J.L.B. *Performance of the equivalent reservoir modelling technique for multi-reservoir hydropower systems // Water Resources Management. 2010. Vol. 24. № 12. Pp. 3101-3114.*