

Анализ напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины с помощью ПК SOFiSTiK

Лалин В.В. - доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительная механика и теория упругости» СПб Государственного Политехнического Университета, Беляев Д.И., Зданчук Е.В., Савченко А.В., Яваров А.В. – аспиранты.

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 (рис.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 (рис.2). Береговые секции имеют переменную высоту и толщину.

Плотина СШГЭС возведена в Карловском створе долины реки Енисей, сложенном из прочных скальных пород (пара и ортосланцы). По деформационным свойствам скальное основание и береговые массивы – неоднородные; важное значение для работы плотины имеет несимметрия 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 $\varphi = 45^\circ$.

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 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, не 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 (www.sofistik.com) - **интегрированный программный комплекс конечно-элементного анализа строительных конструкций, зданий, мостов, тоннелей и решения геотехнических задач.**

Пакеты модулей SOFiSTiK управляются комплексом SOFiSTiK Structural Desktop (SSD). SSD предоставляет пользователям ориентированный на задачу способ работы, предлагая различные процедуры или определенную задачу из библиотеки. Ввод исходных данных возможен путем моделирования специальными препроцессорами SOFiPLUS и WinTUBE в среде AutoCAD, чтения моделей конструкций из AutoCAD и Autodesk Revit Structure или через табличный редактор.

Широкий спектр возможностей моделирования конструкций и нагрузок, современный графический интерфейс, адаптированный под строительные задачи, возможность параметризации расчетов, большое количество специализированных модулей, внешние интерфейсы (AutoCAD, Revit, Femap, IFC, и др.), уникальный опыт применения решений SOFiSTiK ведущими европейскими проектировщиками позволяют выделить SOFiSTiK, как пример удачного сочетания достоинств известных hi-end пакетов - лидеров среди программ МКЭ с адаптацией для строительных задач и локализацией для применения на территории России и стран СНГ.

Программный комплекс имеет сертификат соответствия нормам проектирования РФ.

Важной особенностью этого комплекса является возможность рассчитывать совместные пространственные системы «сооружение-основание», в том числе, с физически 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 (рис.3а). Зоны установки односторонних связей приведены на этом же рисунке. На рис.3б приведены схемы моделирования шести этапов возведения плотины.

На рис. 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.

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 рис.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 рис.8 приведена первая форма собственных колебаний плотины. Во всех расчетах удалось добиться удовлетворительного совпадения расчетных и натуральных результатов, максимальная погрешность не превосходила 10%.

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.

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.

Большую помощь в оснащении программными средствами МКЭ анализа нам оказала компания ПСС (www.pss.spb.ru), которая в рамках специальной акции «Инновационный прорыв – инженеры будущего» предоставила СПб ГПУ безвозмездно для обучения студентов и научно-исследовательской работы лицензионный программный комплекс анализа конструкций методом конечных элементов SOFiSTiK.

На сегодняшний день в СПб ГПУ на базе продуктов SOFiSTiK организован учебный класс на 30 рабочих мест (сетевая лицензия), элементы SOFiSTiK включены в учебные программы, используются в курсовом и дипломном проектировании. Решение учебных и научно-исследовательских задач, углубленное изучение возможностей SOFiSTiK, осуществляется аспирантами и преподавателями кафедры «Строительная механика и теория пружности». Так же многие технические вопросы решаются при участии компании ПСС и службы технической поддержки компаний разработчиков программ МКЭ анализа SOFiSTiK и FIDES.

Компания ПСС, эксклюзивный авторизованный дистрибьютор программ МКЭ анализа SOFiSTiK в России и СНГ, оказывает весь комплекс услуг и работ, связанный с внедрением программного комплекса SOFiSTiK:

- *Консалтинговые услуги по внедрению*
 - *Поставка программного комплекса*
 - *Предоставление бесплатно полнофункциональной версии ПК для тестов*
 - *Обучение сотрудников*
 - *Техническая поддержка*
-



Рис.1. Общий вид плотины Саяно-Шушенской ГЭС

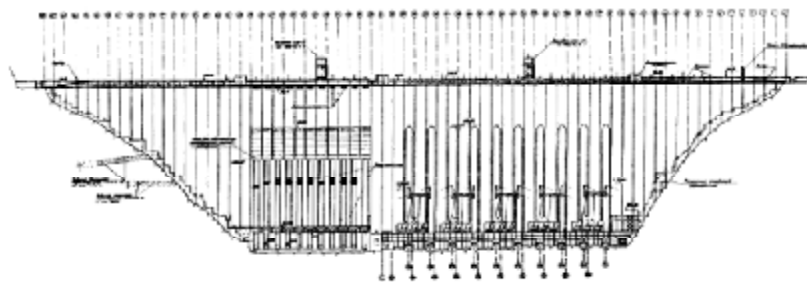


Рис.2а. Схема плотины с разбивкой на секции

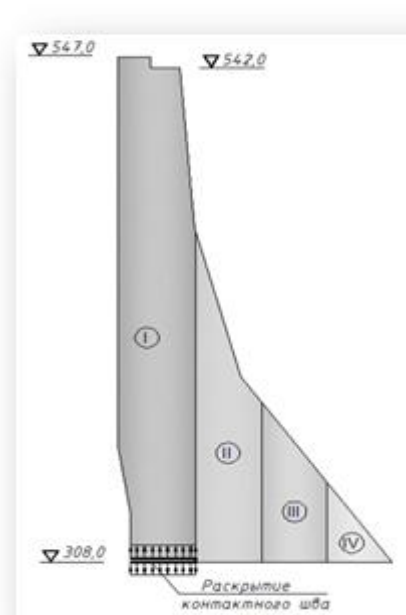


Рис.2б. Разрез центральной секции с разбивкой на столбы

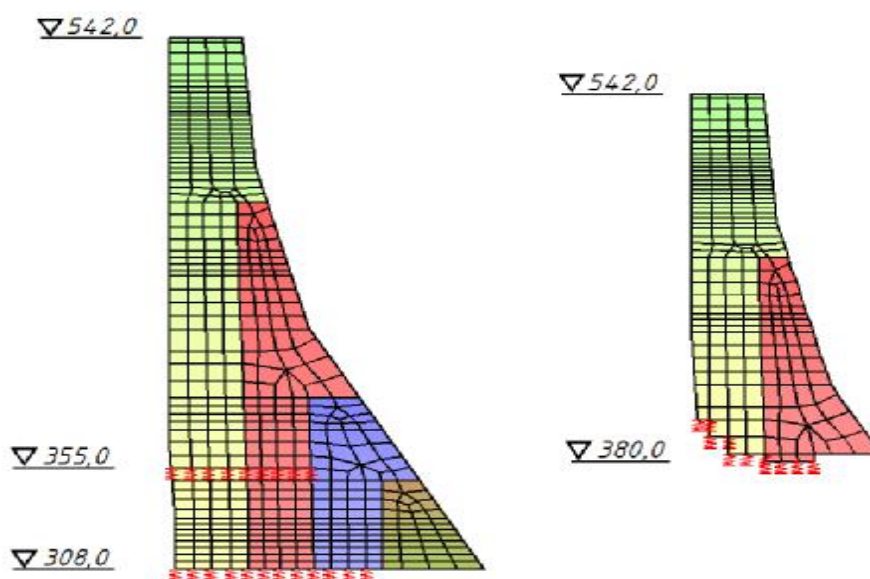


Рис.3а. Конечно-элементная разбивка секций с зонами установки односторонних связей

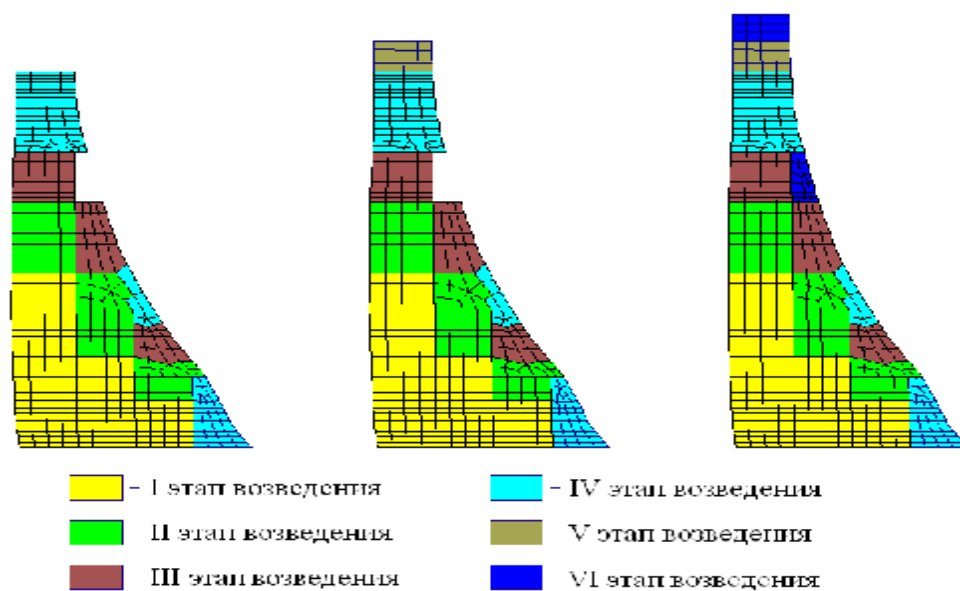


Рис 36. Моделирование этапов возведения плотины.

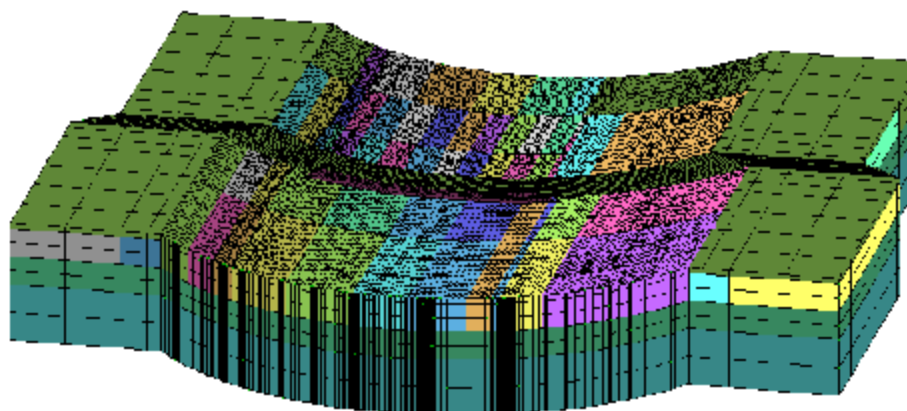


Рис.4. Конечно-элементная модель скального основания

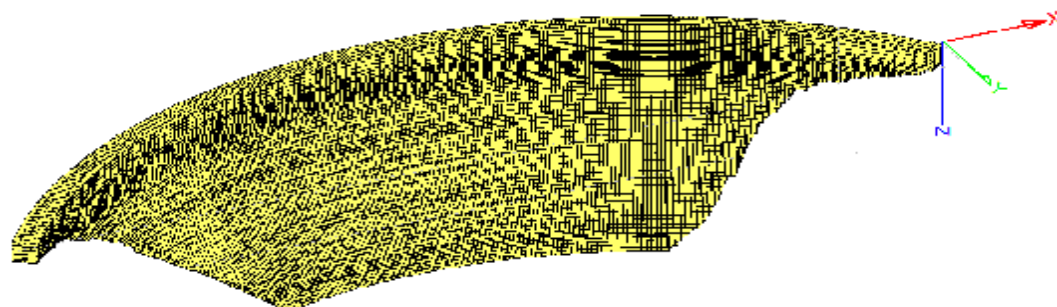


Рис.5. Конечно-элементная модель плотины

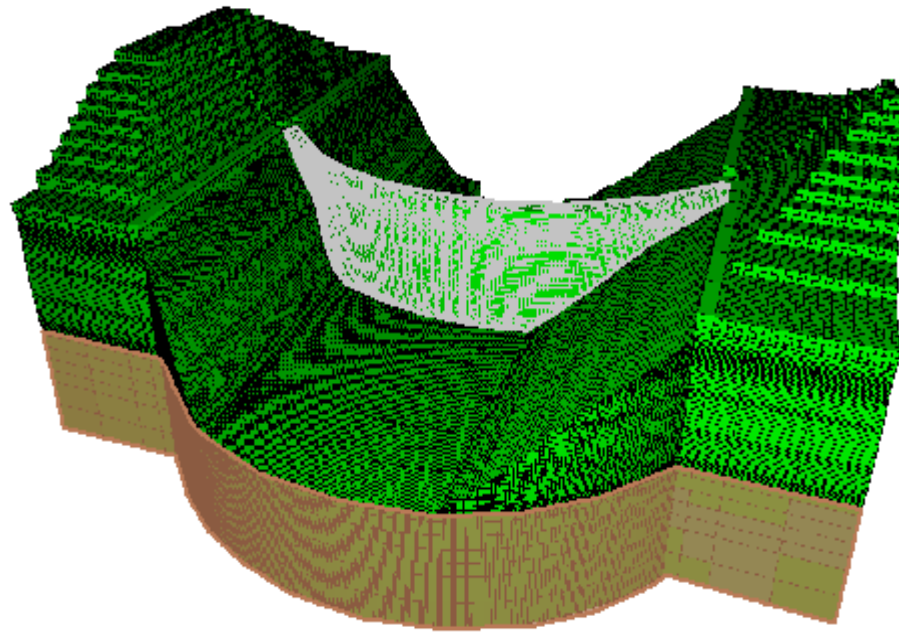


Рис.6. Конечно-элементная модель системы «плотина-основание»

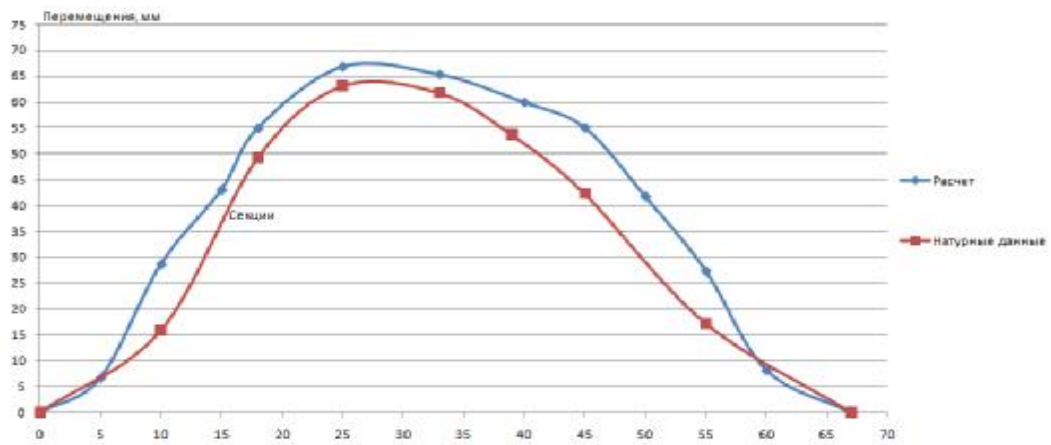


Рис.7. Горизонтальные перемещения гребня плотины.

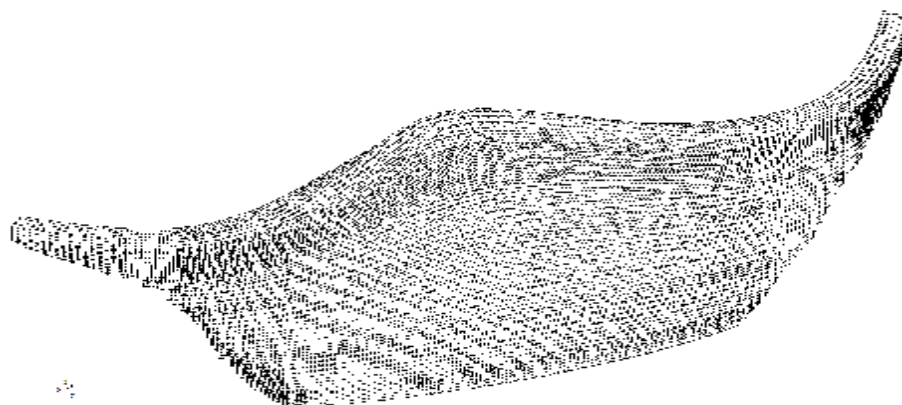


Рис.8. Первая форма собственных колебаний плотины