

УДК 627.8

**ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА
РАСЧЕТНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ
СОСТОЯНИЕ АРОЧНОЙ ПЛОТИНЫ**

Д.В. КОЗЛОВ, *д.т.н., профессор,*

В.И. ВОЛКОВ, *к.т.н., профессор,*

А.И. ГОЛЫШЕВ, *к.т.н., доцент,*

А.А. УЧЕВАТКИН, *аспирант*

*ФГБОУ ВО "Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева"*

127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19

*Светлой памяти учителя, заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н.,
профессора Григория Моисеевича КАГАНОВА посвящается*

Рассмотрен вопрос влияния размеров конечных элементов на расчетное напряженно-деформированное состояние арочной плотины применительно к математическому обоснованию эффективности конструктивных решений, направленных на усиление сооружения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усиление плотин, напряженно-деформированное состояние, МКЭ, размеры конечных элементов, арочная плотина.

Исследованию напряженно-деформированного состояния бетонных плотин, включая арочно-гравитационную плотину Саяно- Шушенской ГЭС и другие аналогичные, а также путям его улучшения и повышения несущей способности посвящено значительное число работ, например, [1, 2, 3, 4, 7]. Вопрос усиления бетонных плотин встает, как правило, очень остро при длительной эксплуатации гидроузла, что приводит к появлению трещин на напорной грани, ослабленных зон в бетоне плотины и в основании.

В рамках проведенных ранее исследований по усилению профиля арочной плотины был выполнен комплекс предварительных расчетов с небольшим количеством элементов (2100 элементов для плотины и 9800 элементов для основания). Крупные элементы в плотине не позволяли корректно аппроксимировать форму напорной грани плотины до заданных параметров. Благодаря этим расчетам удалось на первом этапе сделать ориентировочные оценки возможности применения предлагаемых для усиления мероприятий с количественной оценкой положительного эффекта. На основании анализа полученных результатов было принято решение продолжить работу в данном направлении с уменьшением размеров конечно-элементной сетки, чтобы приблизить КЭ модель к

проектному профилю арочной плотины, и проанализировать влияние на численные значения получаемых расчетных напряжений усиления плотины, направленного на улучшение общей картины напряженно-деформированного состояния.

На первом этапе решения этой задачи было произведено тотальное обновление конечно-элементной сетки и более точное приближение модели к форме арочной плотины для удобства ее использования в дальнейших расчетах. Всего было построено пять новых моделей. Сетка в каждой последующей была гуще (на контакте плотины-основание) сетки предыдущей модели (рис. 1). Сделано это было с целью возможности сравнения полученных результатов для выбора оптимальной разбивки для данной постановки задачи.

Для определения изменения величины дополнительных сжимающих напряжений на фоне уменьшения размеров конечных элементов также был проведен расчет и для плотины с усилением гребня со стороны верховой грани (рис. 2).

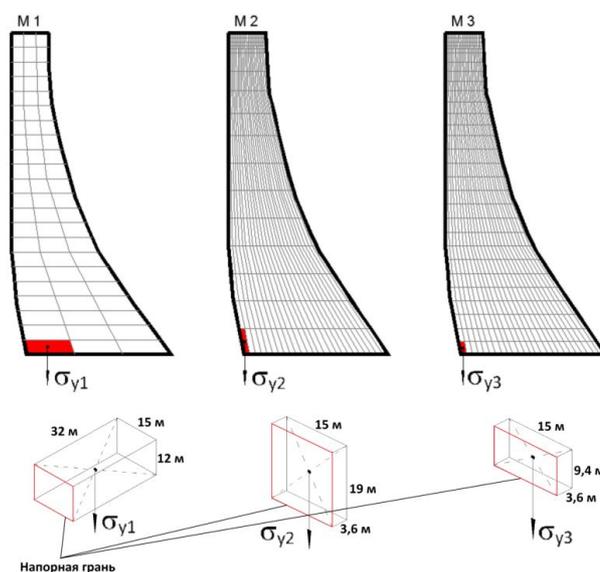


Рис. 1. Частота разбивки различных моделей (M1, M2, M3) и размеры элементов, в которых оценивалось влияние усиления. Модели M4 и M5 условно не показаны. Размеры элементов: M4 – $15 \times 4,7 \times 3,6$ м, M5 – $15 \times 2,3 \times 3,6$ м.

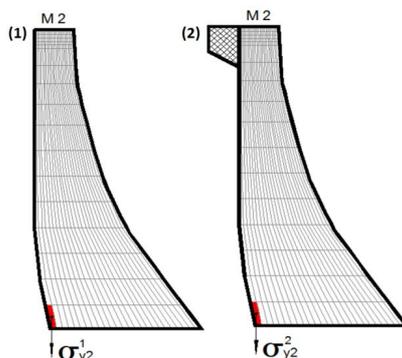


Рис. 2. Вариант плотины (M2) без усиления (1) и с усилением (2) соответственно

Вопросу о назначении размеров и типа конечных элементов в зависимости от вида моделируемой конструкции посвящен ряд работ, в которых даются те

или иные рекомендации применительно к сравнительно простым элементам сооружений: железобетонные перекрытия, плиты, балки, рамы, фермы и т.п. [5, 8]. К примеру, для железобетонной балки и плиты перекрытия под распределенной нагрузкой расчет методом конечных элементов можно верифицировать аналитическим, приведенным в [6]. Однако, когда речь заходит об анализе напряженно-деформированного состояния весьма сложной пространственной системы, провести верификацию, зачастую, просто не представляется возможным. Несмотря на попытки авторов статей, и научных работ (о назначении размеров и типов конечных элементов) "докопаться" до истины, выводы носят, как правило, рекомендательный характер со ссылкой на математические погрешности вычислительных комплексов.

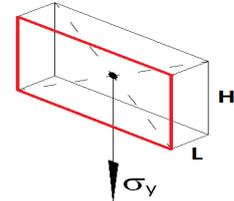


Рис. 3. Рассматриваемый конечный элемент

Суммируя вышеизложенное, в данной работе был проведен сравнительный анализ расчетных вертикальных напряжений в ключе арки на верхней грани на контакте плотины с основанием для моделей с разной частотой разбивки на конечные элементы. Были проведены сравнения для элементов с относительными размерами $H_{эл}/L_{эл}$ равными 5.3, 2.6, 1.3, 0.65, 0.33 (рис. 3.)

Проведенный анализ с уточненной сеткой показали значительные расхождения величины добавки к сжатию, полученной при расчетах на старой модели (Model1). Значение погрешности определения напряжений в крайних элементах возрастало, что привело к прогрессивному росту приращения величины напряжений. Результаты сравнения представлены на Рис. 4 и в Таблице.

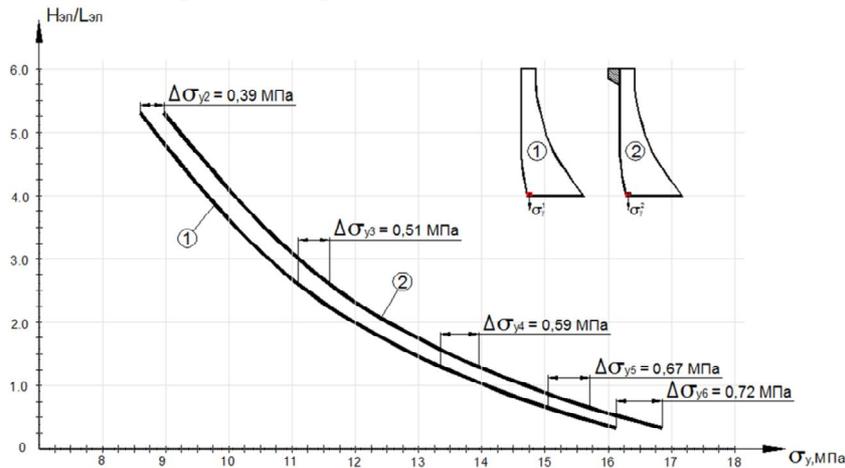


Рис. 4. Величина сжимающих напряжений в ключе арки на верхней грани на контакте плотины с основанием, $H_{эл}/L_{эл}$ – относительный размер рассматриваемого конечного элемента, σ_y – расчетное вертикальное напряжение, МПа, 1 – плотина без усиления, 2 – плотина с усилением

Как видно из таблицы и графика (рис. 4), расчетная величина сжимающих напряжений с уменьшением размеров элементов непрерывно возрастает от 5,76 МПа до 16,13 МПа для неусиленного профиля, и от 5,99 МПа до 16,85 МПа для плотины с усилением гребня со стороны верхней грани. Возрастает также и величина добавки к сжатию, вызванная усилением профиля плотины со стороны верхнего бьефа: от 0,23 МПа до 0,72 МПа. При этом величина приращения вертикальных напряжений (по которой можно оценивать влияние предлагаемого усиления на напряженно-деформированное состояние плотины) остается практически неизменной и составляет 4,3 %.

Таблица. Сравнение полученных результатов при различном сгущении конечно - элементной сетки (сжатие принято со знаком +; 1 – плотина без усиления; 2 – плотина с усилением)

Вариант плотины и сетки		Параметр			
		Расчетное вертикальное напряжение, σ_y , МПа	Дополнительное сжатие $\Delta\sigma_y$, МПа	Приращение сжатия при сгущении сетки $\Delta\sigma_y^n / \Delta\sigma_y^{n-1}$, %	Приращение напряжений при сгущении сетки, $\sigma_{y2}^n / \Delta\sigma_{y1}^n$, %
Model1	1	5,76	0,23	41	3,8
	2	5,99			
Model2	1	8,58	0,39	23,5	4,3
	2	8,97			
Model3	1	11,08	0,51	13,6	4,4
	2	11,59			
Model4	1	13,35	0,59	11,9	4,2
	2	13,94			
Model5	1	15,04	0,67	6,9	4,3
	2	15,71			
Model6	1	16,13	0,72		4,3
	2	16,85			

Выводы:

1. Проведенное исследование показало, что имеет место существенная зависимость расчетной величины сжимающих напряжений σ_y от разбивки сетки и от размеров элементов, что требует более углубленной проработки.

2. При изменении размеров конечных элементов (сгущение сетки), значение приращения вертикальных напряжений, связанное с усилением плотины, остается практически неизменным - 4,3 %. Использование этого относительного, весьма информативного показателя возможно в дальнейших исследованиях по определению влияния различных типов усилений на напряженно-деформированное состояние арочных плотин.

3. Принимая во внимание отсутствие влияния частоты сетки КЭ на величину приращения вертикальных напряжений (применительно к решению задачи по оценке эффективности мероприятий по усилению плотины), выбор сетки необходимо осуществлять с учетом заданной точности аппроксимации формы арочной плотины, а также с учетом скорости вычисления на ПК.

Литература

- Каганов Г.М., Волков В.И., Учеваткин А.А. К вопросу усиления арочных плотин при невозможности сработки водохранилища// Природообустройство. – № 1. – 2012. –С. 40-42.
- Каганов Г.М., Волков В.И., Учеваткин А.А. Пути усиления некоторых типов арочных плотин в широких створах// Гидротехническое строительство. – № 8. – 2011. – С. 46-50.
- Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Гребенчиков В.П., Цыбаков В.А., Нефёдов А.В., Катанов А.Д., Пономарёв Д.И. Расчетное обоснование решений по обеспечению надёжности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС. // В сб. «Бетонные и железобетонные гидротехнические сооружения», Известия ВНИИГ, т. 244, 2005, стр. 227-233.
- Александров А.В., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б. Расчетное обоснование и технические решения по усилению железобетонных конструкций ГЭС (ГАЭС), имеющих трещины различного направления, при действии комплекса нагрузок // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений, 2014. № 6. С. 50-54.
- Шимановский А.О., Путько А.В. Применение методов конечных элементов в решении задач прикладной механики: Учебно-методическое пособие. – Гомель: БелГУТ, 2008. – 61 с.
- Ассоциация «ЖЕЛЕЗОБЕТОН». Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003), Москва, 2005. – Электронный документ, условия доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/PosobieSP521012003Posobi.html>

7. Lin Peng, Zhou Weiyuan, Liu Hongyuan. Experimental Study on Cracking, Reinforcement, and Overall Stability of the Xiaowan Super-High Arch Dam// *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48. – №2. – P. 819-841.
8. Brooker O. How to design reinforced concrete flat slabs using Finite Element Analysis. – Published by the Concrete Centre, May 2006.

References

1. Kaganov, G.M., Volkov, V.I., Uchevatkin, A.A.(2012). On the question of strengthening of arch dams at the inability of the reservoir drawdown, *Prirodoobustroystvo*, № 1, p. 40-42.
2. Kaganov, G.M., Volkov, V.I., Uchevatkin, A.A.(2011). Ways to strengthen certain types of arch dams in wide cross-sections, *Gidrotehnicheskoe Stroitel'stvo*, № 8, p. 46-50.
3. Rubin OD, Lisichkin SE, Grebenshikov VP, Zcibakov VA, Nefedov AV, Katanov AD, Ponomarev DI Raschetnoe obosnovanie resheniy po obespecheniyu nad'ozhnosti konstrukciy vodosbrosa № 2 betonnoy plotini Boguchanskoy GES. Sb. «Betonnii i zhelezobetonnie gidrotehnicheskii sooruzheniya», Izv. VNIIG, t. 244, 2005, pp. 227-233.
4. Aleksandrov, A.V., Rubin, O.D., Lisichkin, S.E., Balagurov, V.B. Raschetnoe obosnovanie I tekhnicheskii resheniya po usileniyu zhelezobetonnykh konstrukcij GES (GAES) imeyushchih treshchini razlichnogo napravleniya pri dejstvii kompleksa nagruzok // *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernykh Konstruktsiy i Sooruzheniy*, 2014 №6, pp. 50-54.
5. Shimanovski, A.O., Putyato, A.V. (2008). *Application of Finite Element Methods in Solving Problems of Applied Mechanics*, Gomel': BelGUT, 61 p.
6. Assootziatziya "Zhelesobeton". *Posobie po Proektirovaniyu Betonnykh i Zhelesobeton. Konstruktsiy iz Tyazhologo Betona bez Predvaritel'nogo Napryazheniya Armatury* (k SP 52-101-2003), Moscow, 2005, elektronniy Dokument: <http://www.gosthelp.ru/text/PosobieSP521012003Posobi.html>
7. Lin Peng, Zhou Weiyuan, Liu Hongyuan. Experimental Study on Cracking, Reinforcement, and Overall Stability of the Xiaowan Super-High Arch Dam, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 48, №2, p. 819-841.
8. Brooker, O. (2006). *How to Design Reinforced Concrete Flat Slabs Using Finite Element Analysis*, Published by The Concrete Centre, May 2006.

FINITE ELEMENT SIZE INFLUENCE UPON DESIGN STRESS-STRAIN STATE OF ARCH DAM

Kozlov D.V., Volkov V.I., Golyshchikov A.I., Uchevatkin A.A.

"Rossiyskiy Gosudarstvennyy Agrarnyy Universitet – MSHA im. K.A. Timiryazeva"

FE size influence upon the design stress-strain state of arch dam is investigated keeping in mind the mathematical substantiation the effectiveness of constructive solutions to strengthen the structure.

Keywords: strengthening dams, stress-strain state, FEM, the sizes of the finite elements, arch dam.

