

**ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ «СТРОЯЩЕЕСЯ БЕТОННОЕ
СООРУЖЕНИЕ – НЕСКАЛЬНОЕ ОСНОВАНИЕ»**

О.Д. РУБИН, доктор технических наук*,

П.В. ШЕСТОПАЛОВ, инженер**

* АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»;
125362, г. Москва, Строительный проезд, д. 7А, info@niies.ru

** АО «ИГХолдинг Рус», 123317, Москва, Пресненская наб., д.6, стр.2, оф.43-10, info@ighrus.com

Предлагается усовершенствованная методика численного конечно-элементного моделирования строящихся бетонных сооружений на нескальных основаниях. При этом размеры моделируемого фрагмента основания ограничиваются глубиной сжимаемой толщи основания. Учитывается увеличение модулей деформаций грунтов основания с ростом глубины расположения грунтовых слоев.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: строящиеся бетонные сооружения; нескальное основание; конечно-элементное моделирование; фрагмент основания; глубина сжимаемой толщи; вертикальные сжимающие напряжения; компрессионные испытания; напряженно-деформированное состояние; устойчивость; прочность.

Одна из особенностей усовершенствованной методики численного моделирования строящихся бетонных сооружений на нескальном основании заключается в более корректном моделировании фрагмента массива основания [1]. При этом используется физическая величина, называемая глубиной сжимаемой толщи основания [2]. Предварительно определяется глубина сжимаемой толщи основания. Размеры фрагмента основания по вертикали назначаются соответствующими величине глубины сжимаемой толщи основания. Следует упомянуть, что в процессе возведения сооружения глубина сжимаемой толщи основания изменяется. Учитывая данное обстоятельство, конечно-элементные модели системы «строящееся бетонное сооружение – нескальное основание» корректируются в процессе поэтапных расчетных исследований. При этом на каждом этапе расчетов изменяется вертикальный размер моделируемого фрагмента основания.

Другой важнейшей особенностью усовершенствованной методики численного моделирования строящихся бетонных сооружений на нескальном основании является учет изменения модуля деформации грунтов основания по глубине в зависимости от роста дополнительных (помимо бытовых) вертикальных сжимающих напряжений [3]. При этом закономерности изменения модуля деформации по глубине устанавливаются на основе анализа данных компрессионных испытаний грунтов. Также был учтен опыт численного моделирования сооружений с основаниями [4, 5, 6].

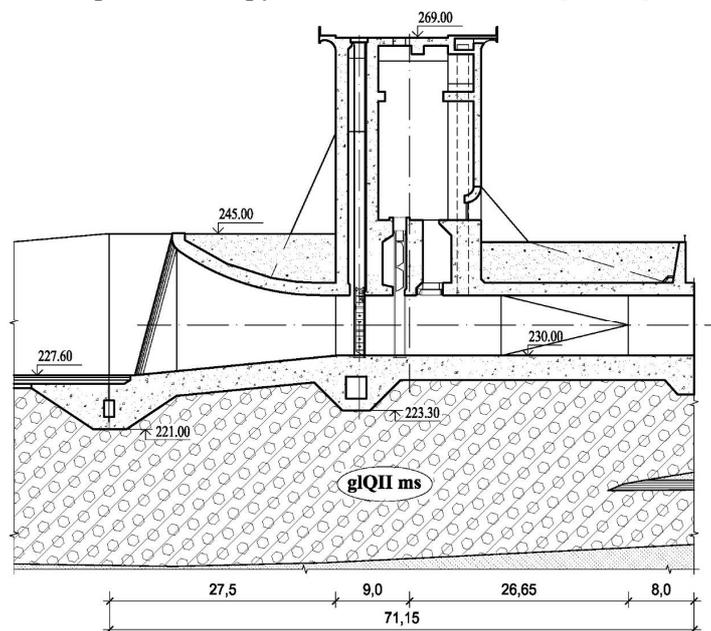


Рис. 1.

Было предложено определять глубину сжимаемой толщи основания непосредственно из решения задачи напряженно-деформированного состояния системы «строящееся бетонное сооружение – нескальное основание» на основе соответствующих конечно-элементных моделей в рамках усовершенствованной

методики математического конечно-элементного моделирования систем «строящееся бетонное сооружение – нескальное основание».

На примере строящегося водоприемника Загорской ГАЭС-2, расположенного на нескальном основании, были выполнены расчеты глубины сжимаемой толщи основания для шести характерных этапов возведения сооружения: 1-й этап (по состоянию на 16.05.2009 г.), 2-й этап (по состоянию на 21.01.2010 г.), 3-й этап (по состоянию на 10.10.2010 г.), 4-й этап (по состоянию на 23.07.2011 г.), 5-й этап (по состоянию на 01.12.2011 г.), 6-й этап (по состоянию на 29.08.2012 г.). Конструкция водоприемника представлена на рис. 1.

На основании предложенной методики определения глубины сжимаемой толщи, были получены следующие результаты (соответствующие расчетным этапам): 6,0; 7,7; 9,9; 12,7; 17,9; 21,0 м.

Графики зависимости глубины сжимаемой толщи H_c (м) от величины давления на основание P (кПа), а также в относительных единицах представлены на рис. 2 и 3.

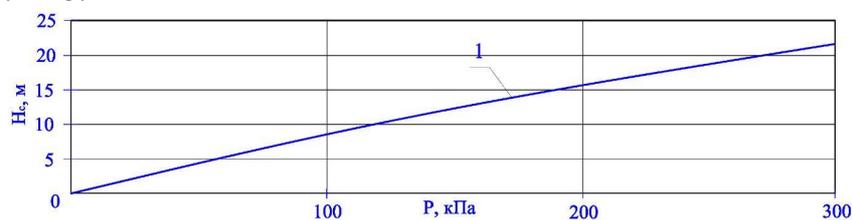


Рис. 2.

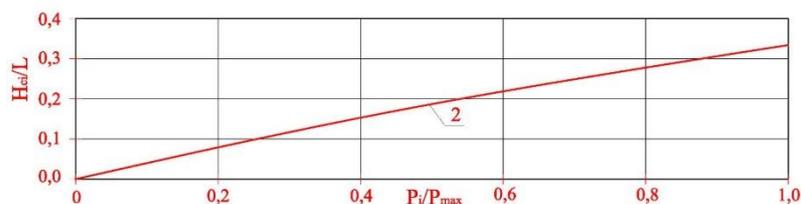


Рис. 3.

На основе анализа полученных результатов была разработана зависимость для определения глубины сжимаемой толщи (м) основания водоприемника Загорской ГАЭС-2 на каждом из этапов расчета:

$$H_{ci} = -0,00009 \cdot P_i^2 + 0,086 \cdot P_i, \quad (1)$$

где P_i – давление на основание (кПа) на данном (i -том) этапе расчетов.

В относительных единицах данная зависимость имеет вид:

$$\xi = -0,122 \cdot \rho^2 + 0,393 \cdot \rho, \quad (2)$$

где ξ – относительная величина сжимаемой толщи h/L (относительно длины сооружения L); ρ – относительная (относительно максимального значения P_{\max}) величина давления на основание.

Учёт изменения деформационных характеристик грунтов по глубине основания водоприемника проводился на основе анализа данных компрессионных испытаний. При этом была установлена закономерность увеличения значений модулей деформации с ростом глубины заложения каждого слоя конечных элементов, аппроксимирующих грунтовое основание.

Так, в зависимости от величины вертикальных сжимающих напряжений в рамках анализа данных компрессионных испытаний образцов грунтов основания водоприемника Загорской ГАЭС-2 для начального этапа исследований было получено следующее:

- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,0 до 0,1 МПа, модуль деформации E составил 17,6 МПа;
- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,1 до 0,2 МПа, модуль деформации E составил 25,0 МПа;
- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,2 до 0,3 МПа, модуль деформации E составил 32,5 МПа;
- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,3 до 0,4 МПа, модуль деформации E составил 40,9 МПа;
- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,4 до 0,5 МПа, модуль деформации E составил 50,0 МПа;
- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,5 до 0,6 МПа, модуль деформации E составил 60,0 МПа;
- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,6 до 0,7 МПа, модуль деформации E составил 71,4 МПа;
- для вертикальных сжимающих напряжений в интервале от 0,7 до 0,8 МПа, модуль деформации E составил 88,2 МПа.

На основе анализа полученных результатов была разработана зависимость для определения модулей деформации грунта при изменении действующих вертикальных сжимающих напряжений в основании водоприемника Загорской ГАЭС-2:

$$E = 62,5 \cdot \sigma^2 + 47,35 \cdot \sigma + 15,97, \quad (3)$$

где E – модуль деформации грунта (кПа), σ – вертикальные напряжения в данном слое основания (кПа). Разработанная зависимость представлена на графике (рис. 4).

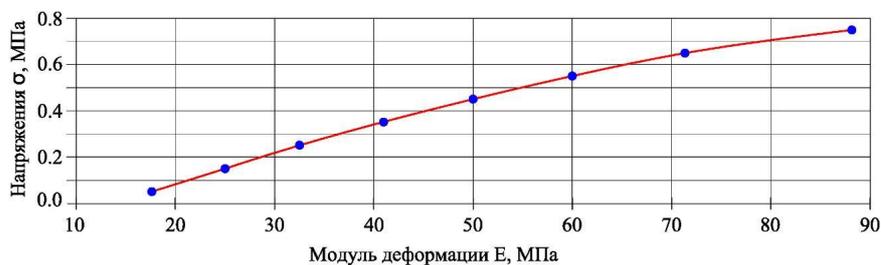


Рис. 4.

Таблица 1

Глубина залегания слоя, м	Модули деформации, МПа	
	В верхней части основания (в зоне установки труба-марок 1ТМ01 и 1ТМ03)	В нижней части основания (в зоне установки труба-марок 1ТМ02, 1ТМ04-1ТМ06)
0-2	43,9	42,0
2-4	47,3	45,3
4-6	50,8	48,6
6-8	54,3	52,0
8-10	57,8	55,3
10-12	61,3	58,6
12-14	64,8	62,0
14-16	68,3	65,3
16-18	71,7	68,6
18-20	75,2	72,0
20-24	78,7	75,3

С учетом полученных выше результатов была разработана математическая конечно-элементная модель системы «строящееся бетонное сооружение – не-скальное основание» применительно к водоприемнику Загорской ГАЭС-2 [1]. При этом значения модулей деформации основания принимались в соответствии с табл. 1. На основе разработанной КЭ модели водоприемника Загорской ГАЭС-2 совместно с основанием были выполнены расчетные исследования напряженно-деформированного состояния сооружения и основания, устойчивости и прочности данного сооружения.

Л и т е р а т у р а

1. *Шестопалов П.В.* Уточнение фактических физико-механических характеристик грунтов, слагающих основание водоприемника строящейся Загорской ГАЭС-2 на основе расчетных исследований и данных натурных наблюдений // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2013. – №3. – С. 64-71.

2. *СП 23.13330.2011.* (Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»).

3. *Шестопалов П.В.* Особенности численного моделирования оснований бетонных сооружений с учетом изменения модуля деформации по глубине // *Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы комплексного обустройства техноприродных систем».* – М., МГУП, 2013. – С. 309-312.

4. *Oka F., Kimoto S., Adachi T.* Calibration of elastoviscoplastic models for cohesive soils// Prediction, analysis and design in geomechanical applications/ *The 11th Conf. of IACMAG.* Torino, 2005. – Vol. 1. – P. 449-456.

5. *Brinkgreve R.B., Yamamuro J.A., Kaliakin V.N.* Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application // *Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration.* *Journal of American Society of Civil Engineers,* 2005. – V. 128. – Pp. 69–98.

6. *Poulus H.G., Carter J.P., Small J.C.* Foundations and retaining structures – Research and practice// *International conference on soil mechanics and geotechnical engineering.* –Vol. 4. – 2001. – Pp. 2527-2606.

R e f e r e n c e s

1. *Shestopalov, P.V.* (2013). Utochnenie fakticheskikh fiziko-mekhanicheskikh harakteristik gruntov, slagayushchih osnovanie vodopriemnika stroyashchejsya Zagorskoj GAES-2 na osnove raschetnyh issledovanij i dannyh naturnyh nablyudenij, *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernyh Konstrukcij i Sooruzhenij*, №3, p. 64-71.

2. *SP 23.13330.2011* (Aktualizirovannaya redakciya SNiP 2.02.02-85 «Osnovaniya gidrotexnicheskix sooruzhenij»).

3. *Shestopalov, P.V.* (2013). Osobennosti chislenogo modelirovaniya osnovanij betonnyh sooruzhenij s uchetoм izmeneniya modulya deformacii po glubine, *Materialy mezhd. nauchno-prakt. konferencii «Problemy Kompleksnogo Obustrojstva Tekhnoprirodnih Sistem»*, М., МГУП, pp. 309-312.

4. *Oka, F., Kimoto, S., Adachi, T.* (2005). Calibration of elastoviscoplastic models for cohesive soils, Prediction, analysis and design in geomechanical applications, *The 11th Conf. of IACMAG*, Torino, 2005, Vol. 1, pp. 449-456.

5. *Brinkgreve, R.B., Yamamuro, J.A., Kaliakin, V.N.* (2005). Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application, *Soil Constitutive Models: Evaluation, Selection, and Calibration*, *Journal of American Society of Civil Engineers*, Vol. 128, pp. 69–98.

6. *Poulus, H.G., Carter, J.P., Small, J.C.* (2001). Foundations and retaining structures – Research and practice, *International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 4, 2001, pp. 2527-2606.

THE FEATURES OF MATHEMATICAL FINITE-ELEMENT MODELING OF THE SYSTEM "NEWLY BUILT CONCRETE STRUCTURES – NON ROCK FOUNDATION"

Rubin O.D., Shestopalov P.V.

An improved method of numerical finite-element modeling of concrete structures built on nonrock foundations is provided. The dimensions of the modeled fragment reason to the depth limit of the compressible foundations strata. The increase in deformation modulus of the foundations strata with an increase in the depth of the soil layers is taken into account.

Keywords: concrete structure, nonrock base, the depth of the soil layers, finite element modelling, compression test, stress-strain state, stability, strength.