

## Экспериментальные исследования

### **УТОЧНЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ, СЛАГАЮЩИХ ОСНОВАНИЕ ВОДОПРИЕМНИКА СТРОЯЩЕЙСЯ ЗАГОРСКОЙ ГАЭС-2 НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ**

П.В. ШЕСТОПАЛОВ

ОАО «Проектно-изыскательский и НИИ «Гидропроект» имени С.Я. Жука,  
125993, Москва, Волоколамское шоссе, 2; Email: p.shestopalov@hydroproject.ru

*Приводятся результаты расчетного определения фактических физико-механических характеристик основания водоприемника на основе конечноэлементных моделей системы «строящийся водоприемник - основание» с использованием данных натурных наблюдений за осадками строящегося водоприемника. При этом исследования проводились для различных этапов строительства, соответствующих циклам геодезических наблюдений.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** физико-механических характеристик грунтов; основание водоприемника; данные натурных наблюдений; осадки водоприемника; поэтапность возведения водоприемника; конечно-элементные модели системы «сооружение-основание»

Основание основных сооружений строящейся Загорской ГАЭС-2 имеет сложное инженерно-геологическое строение. Специальные изыскания и исследования последних лет, показали, что свойства основания водоприемника (главного напорного сооружения строящегося гидроузла) отличаются от значений, принятых в ТЭО (проекте). Опыт эксплуатации действующей Загорской ГАЭС показал, что происходило изменение физико-механических свойств основания водоприемника в отличие от проектных значений. Особенности инженерно-геологического строения основания водоприемника действующей Загорской ГАЭС обусловили значительные осадки и смещения водоприемника. Анализ данных геодезических наблюдений за осадками строящегося водоприемника Загорской ГАЭС-2 показал, что они неравномерны как в продольном направлении (к зданию ГАЭС-2), так и в поперечном направлении, что свидетельствует о неоднородности основания. Потребовалось уточнение свойств основания водоприемника Загорской ГАЭС-2, в том числе, для последующего использования в поверочных расчетах устойчивости и прочности водоприемника.

Автором предложено определять фактические физико-механические характеристики основания водоприемника расчетным путем на основе конечно-элементных моделей системы «сооружение - основание» с использованием данных натурных наблюдений за осадками водоприемника.

В состав основных сооружений строящейся Загорской ГАЭС-2 входят: верхний аккумулирующий бассейн, огражденный дамбами; водоприемник с подпорными стенами (основное сооружение напорного фронта); напорные водоводы; здание ГАЭС; нижний бассейн [1].

В первую очередь, в соответствии с решаемой задачей, следует упомянуть инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации водоприемника.

Сооружение располагается в верхней части левобережного склона р. Кунья в пределах абсолютных отметок поверхности земли 230,00...234,00 м. Геологический разрез основания водоприемника показан на рис. 1. Согласно этому разрезу сверху вниз:

- со стороны дневной поверхности залегают покровные отложения мощностью 1,0...5,0 м (на оси водоприемника мощность около 6,0 м в пределах отметок 232,00...226,00 м);

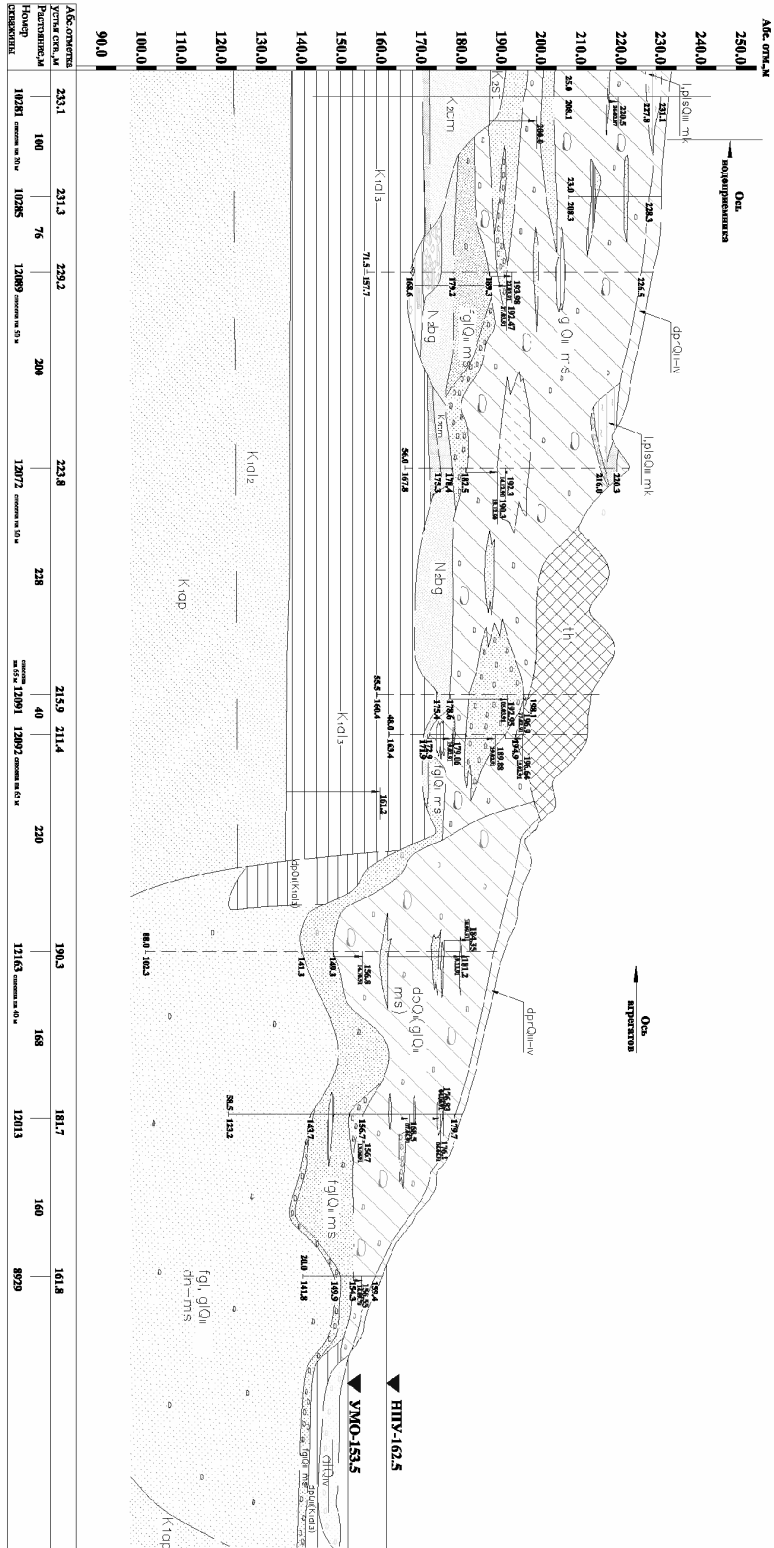


Рис. 1. Геологическое строение массива в разрезе по оси водоприемника Загорской ГАЭС-2

- в восточной части контура водоприемника в плане развиты озерно-болотные отложения микулинского горизонта толщиной до 6,0 м;
- под покровными отложениями на оси водоприемника в пределах отметок 226,00...191,00 м залегают моренные суглинки; моренные суглинки перемежаются прослоями песков и песчано-гравийных грунтов; общая мощность моренных суглинков и прослоев песчано-гравийных грунтов на оси водоприемника составляет приблизительно 35,0 м;
- под моренными суглинками и прослоями песка на оси водоприемника залегает слой сантонских отложений толщиной до 2-х м, представленный так называемыми «зелёными» глинами; слева и справа от оси водоприемника на расстояниях приблизительно 40,0 м толщина слоя «зелёных» глин увеличивается до 3-х м;
- под «зелёными» глинами на расстояниях приблизительно 40,0 м слева и справа от оси водоприемника развиты пески водно-ледникового происхождения; непосредственно под водоприемником эти отложения отсутствуют;
- непосредственно под водоприемником в пределах отметок 189,00...172,00 м залегает слой сенманских отложений, представленный песками мелкими и средними;
- в пределах отметок 172,00...138,00 м залегают верхнеальбские отложения, представленные чаще всего песками мелкими и пылеватыми, реже - средними;
- ниже отметки 138,00 м залегают апт-альбские отложения, представленные песками от пылеватых до средней крупности, глинистыми, незначительной водопроницаемостью из-за наличия в них прослоев глин и крепкого песчаника.

При принятой отметке заложения подошвы водоприемника естественное основание водоприемника было бы неоднородным. В направлении вдоль оси водоприемника в его восточной части расположена линза озерно-болотных микулинских отложений, представленных суглинками с прослоями глины и песка. Мощность озерно-болотной пачки достигает 6,0 м. Эти грунты признаны непригодными для основания водоприемника. Они удалены и заменены качественным грунтом. Остальная часть водоприемника располагается на моренных суглинках, которые являются благоприятными для основания грунтами.

Водоприемник представляет собой неразрезную железобетонную конструкцию, включающую четыре водопроводные галереи и башню управления затворами. Высота водоприемника составляет 48,00 м, ширина вдоль потока 63,15 м, поперек потока 78,70 м. Гребень водоприемника расположен на отметке 269,00 м. Подошва фундаментной плиты расположена на отметке 227,50 м. Фундаментная плита водоприемника имеет толщину 2,5 м. По длине вдоль потока она имеет три зуба, предназначенные для увеличения длины контактной фильтрации и повышения сопротивления сдвигу. Верховой, центральный и низовой зубья заглубляются до отметок соответственно 221,00, 223,30 и 225,50 м. Конструкция водоприемника в продольном разрезе представлена на рис. 2.

В соответствии с графиком бетонирования блоков водоприемника, были рассмотрены следующие этапы его возведения: этап с 2008 г. по 4-й квартал 2009 г. (период возведения фундаментной плиты и бычков водоприемника); этап с конца 3-го квартала по начало 4-го квартала 2010 г. (полностью возведены центральные и устойчивые бычки водоприемника до отм. 242.92 м, возводились перекрытия входных и выходных участков водоприемника); этап с 1-го по 4-й квартал 2011 г. (были полностью возведены перекрытия входных и выходных участков водоприемника, начиналось возведение контрфорсов водоприемника, выполнялись отдельные блоки на левобережном и правобережном устоях и в центральной части водоприемника); этап с 1-го по 4-й квартал 2012 г. (выполнялись отдельные блоки на левобе-

режном и правобережном устоях, а также в центральной части водоприемника); этап 2-го квартала 2012 г. (выполнялись отдельные блоки на левобережном и правобережном устоях, а также в центральной части водоприемника).

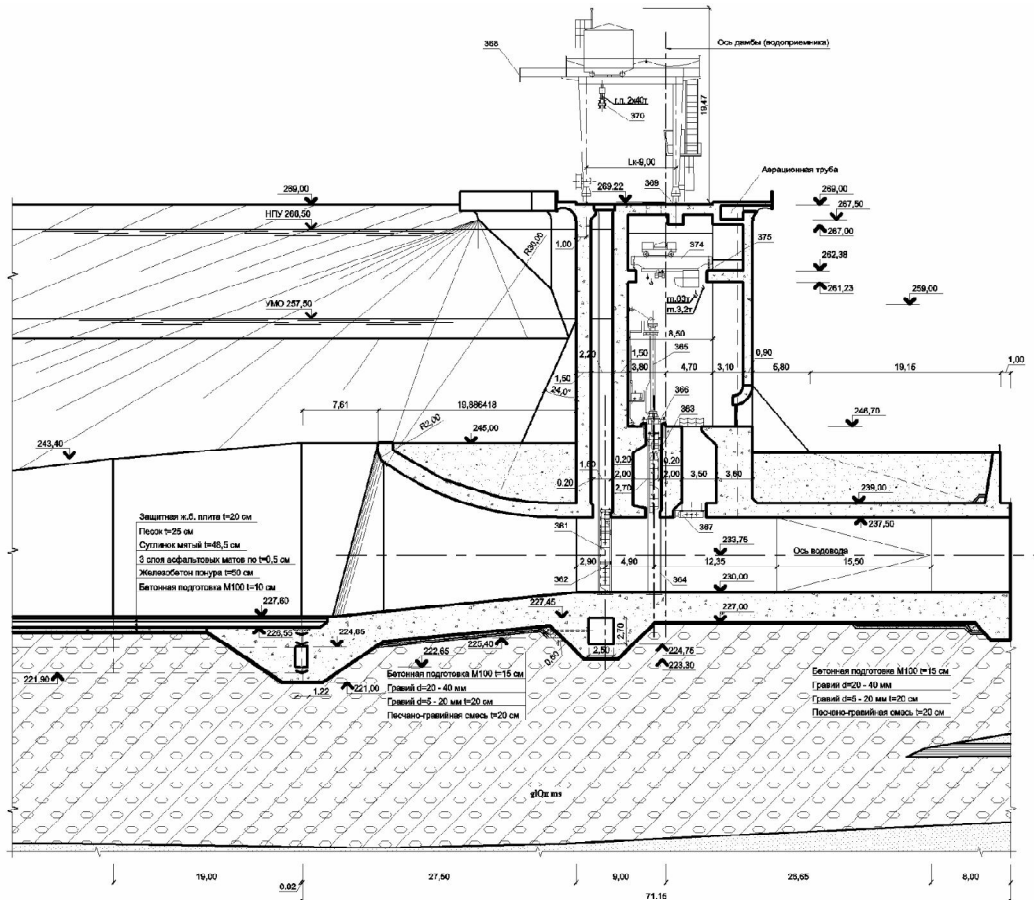


Рис. 2. Конструкция водоприемника Загорской ГАЭС-2 по сечению вдоль потока

В соответствии с проектом геодезических наблюдений за осадками водоприемника Загорской ГАЭС-2 с начала возведения фундаментной плиты на ее низовой половине были установлены шесть трубо-марок 1ТМ01...1ТМ06.

При этом трубо-марки 1ТМ01, 1ТМ02 и 1ТМ07 установлены в левых блоках фундаментной плиты водоприемника, а трубо-марки 1ТМ03, 1ТМ04 и 1ТМ05 установлены в правых блоках фундаментной плиты водоприемника, соответственно, в направлении от верховой грани водоприемника к его низовой грани.

По трубо-маркам 1ТМ04, 1ТМ02, 1ТМ03 и 1ТМ01 показания снимаются с первой половины 2009 года. По трубо-маркам 1ТМ05 и 1ТМ06 наблюдения начались с января 2010 г. и сентября 2009 г., соответственно. Результаты геодезических наблюдений за осадками водоприемника приведены в табл. 1.

Анализ имеющихся результатов геодезических измерений показывает, что осадки водоприемника по трубо-маркам 1ТМ01, 1ТМ02, 1ТМ03 и 1ТМ06 находятся в диапазоне от 59,9 до 121,3 мм. Для решения задач, связанных с уточнением физико-механических характеристик грунтов основания водоприемника Загорской ГАЭС-2, были разработаны конечно-элементные модели системы «сооружение – основание», соответствующие различным этапам возведения водоприемника. Вид конечно-элементной модели представлен на рис. 3.

Таблица 1

Значения осадок фундаментной плиты водоприемника Загорской ГАЭС-2 по показаниям трубо-марок

Обозначение трубо-марки	Дата начала наблюдения	Полная величина осадки, мм
1ТМ01	16.05.2009 г.	73,9
1ТМ02	20.01.2009 г.	59,9
1ТМ03	18.04.2009 г.	96,4
1ТМ04	20.01.2009 г.	52,2
1ТМ05	21.01.2010 г.	102,7
1ТМ06	04.09.2009 г.	121,3

Разработанные конечно-элементные модели системы «сооружение – основание» включают в себя конструкцию строящегося водоприемника, а также грунтовый массив в основании водоприемника в соответствии с инженерно- геологическим разрезом (рис. 1).

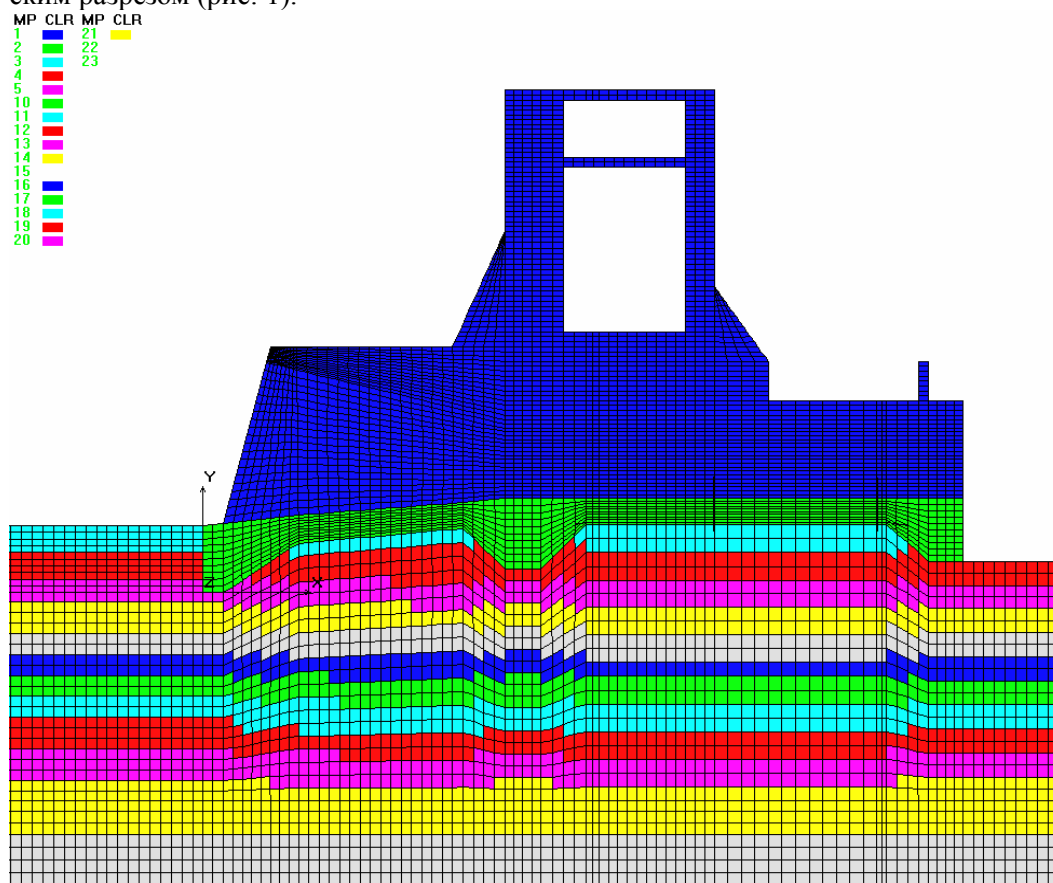


Рис. 3. Вид конечно-элементной модели водоприемника Загорской ГАЭС-2 совместно с основанием

Глубина грунтового основания в моделях принималась равной высоте сжимаемой толщи грунта, ниже которой вертикальные напряжения в грунте от веса сооружения не превышают 50% от бытовых напряжений. В горизонтальном направлении размеры определялись из условия минимального влияния на работу сооружения граничных условий по границе расчётной области.

Определение расчетной глубины сжимаемого слоя основания проводилось на основе метода послойного суммирования в соответствии с положениями дейст-

вующих нормативных документов: СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений»[2] и СП 23.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»)[3].

В соответствии с указаниями СП 23.13330.2011 расчетная глубина сжимаемого слоя основания  $H_c$  принималась из условия:

$$\sigma_{zp} = 0,5 \sigma_{zg}$$

где  $\sigma_{zp}$  – вертикальные напряжения от внешней нагрузки на нижней границе сжимаемой толщи грунта;  $\sigma_{zg}$  – максимальные вертикальные напряжения в грунте до строительства сооружения.

При моделировании основания учитывалось увеличение модуля деформации с ростом глубины заложения данного слоя конечных элементов [4,5], воспроизводящих основание водоприемника. При этом закон изменения модуля деформации по глубине принимался в соответствии с результатами полевых испытаний.

В соответствии с данными полевых испытаний модуль деформации моренных суглинков ненарушенной структуры определялся несколькими способами. Результаты, полученные при изысканиях для строящейся Загорской ГАЭС-2 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование грунтов	Методы испытаний			
	прессиометрические испытания	Испытания штампом	компрессионные испытания	Статическое зондирование
	при P=0,3...1,0 МПа	при P=0,0...0,2 МПа	при P=1,0...6,0 МПа	при P=0,0...0,2 МПа
Суглинок моренный	10,8...22,0 МПа	11,0...37,0 МПа	6,7...12,0 МПа	16,0...46,0 МПа

В расчётных исследованиях, выполненных численными методами использовалась итерационная схема [6]. Исходные данные, касающиеся деформативных характеристик грунтов, были откорректированы с учётом напряжений [7,8], полученных на основе конечно-элементных моделей с учетом поэтапного возведения водоприемника. В итоге было выделено две зоны, в которых распределение модулей деформации получается различным: зона под низовым зубом фундаментной плиты водоприемника рядом с местом установки трубо-марок 1ТМ02, 1ТМ04, 1ТМ05, 1ТМ06, и зона под центральным зубом рядом с местом установки трубо-марок 1ТМ01, 1ТМ03. С учётом изменения деформационных характеристик грунтов по глубине в процессе поэтапного возведения водоприемника, на основании данных компрессионных, штамповых и прессиометрических испытаний были подсчитаны модули деформации в определенных зонах для каждого слоя конечных элементов, аппроксимирующих грунтовое основание.

Расчет глубины сжимаемой толщи основания водоприемника, который базируется на предпосылках теории линейного деформирования грунта, применяемых в СНиП 2.02.02-85 (СП 23.13330.2011), проводился для шести характерных этапов возведения сооружения: 1-й этап (2 квартал 2009), 2-й этап (1 квартал 2010 г.), 3-й этап (4 квартал 2010 г.), 4-й этап (3 квартал 2011 г.), 5-й этап (4 квартал 2011 г.), 6-й этап (3 квартал 2012 г.).

В результате расчетов получены значения глубины сжимаемой толщи основания водоприемника для шести характерных этапов возведения сооружения, кото-

рые составили, соответственно, 11,3 м, 13,8 м, 15,1 м, 17,4 м, 20,1 м, 21,3 м.

Приведенные выше расчеты по определению сжимаемой толщи водоприемника методом послойного суммирования позволили определить, что граница сжимаемой толщи находится в пределах слоя флювиогляциальных отложений, представленных преимущественно суглинками моренными.

Как отмечалось выше, расчетное уточнение физико-механических характеристик основания водоприемника проводилось для шести характерных этапов возведения сооружения на основе соответствующих конечно-элементных моделей водоприемника совместно с основанием.

В результате выполненных расчетных исследований были получены уточненные значения модулей деформации основания водоприемника по глубине, приведенные в табл. 3.

*Таблица 3*

Глубина залегания слоя, м	Модули деформации, МПа	
	В верховой части основания (в зоне установки трубо-марок 1ТМ01 и 1ТМ03)	В низовой части основания (в зоне установки трубо-марок 1ТМ02, 1ТМ04, 1ТМ05, 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

Так, в верховой части основания водоприемника модуль деформации составил от 43,9 МПа (на глубине 0-2 м) до 78,7 МПа (на глубине 20-24 м), в низовой части основания модуль деформации составил от 42,0 МПа (на глубине 0-2 м) до 75,3 МПа (на глубине 20-24 м). При этом значения осадок водоприемника хорошо согласуются с результатами по геодезическим измерениям отметок оголовков трубо-марок. В зоне установки трубо-марок 1ТМ01 и 1ТМ03 по результатам расчетов получено значение осадки 84,8 мм при замеренных 73,9 мм (для 1ТМ01) и 92,2 мм (для 1ТМ03); в зоне установки трубо-марок 1ТМ02, 1ТМ04-1ТМ06 по результатам расчетов получено значение осадки 108,1 мм при замеренных 91,0 (для 1ТМ05) и 106,6 мм (для 1ТМ06).

Следует отметить, что для 6-го этапа возведения водоприемника был также проведен расчет при проектном значении модуля деформации основания (35 МПа), принимаемом на всю глубину сжимаемой толщи (21,3 м). По результатам расчета максимальное значение осадки в данном случае составило 138,2 мм, что на 30% больше имеющихся данных натурных наблюдений (106,6 мм).

Таким образом, расчетным путем были получены уточненные значения модулей деформации грунтов основания водоприемника Загорской ГАЭС-2, которые были позднее использованы при проведении поверочных расчетов прочности и устойчивости водоприемника.

Л и т е р а т у р а

1. 1833-КН.4. ТЭО (проект) строительства Загорской ГАЭС-2 на р. Кунье.
2. СП 23.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»).
3. СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений»
4. Wang C.E., Borden R.H. Deformation Characteristics of Piedmont Residual Soils// *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 10, October 1996, pp. 822-830.
5. 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.
6. Xu L., Shen Z., Yang F., Gu X. Stress and Deformation Analysis for the Concrete Face Rockfill Dam of Wuyue Pumped Storage Power Station// *Materials of ASCE*, 2012, Section 4, pp. 986-995.
7. 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.
8. Wehnert M. Ein Beitrag zur drainierten und undrainierten Analyse in der Geotechnik// *Mitt. Inst. fur Geotechnik 53. Universitat Stuttgart*. – Stuttgart, 2006. – 167 s.

R e f e r e n c e s

1. 1833-КН.4. ТЭО (проект строительства Загорской ГАЭС-2 на р. Кунье).
2. СП 23.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»)
3. СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений»
4. Wang, C. E., Borden, R.H. (1996). Deformation Characteristics of Piedmont Residual Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122, No. 10, October 1996, pp. 822-830.
5. 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, p. 449-456.
6. Xu, L., Shen, Z., Yang, F., Gu X. (2012). Stress and Deformation Analysis for the Concrete Face Rockfill Dam of Wuyue Pumped Storage Power Station, *Materials of ASCE*, Section 4, pp. 986-995.
7. 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*, V. 128, pp. 69–98.
8. Wehnert, M. (2006). Ein Beitrag zur drainierten und undrainierten Analyse in der Geotechnik, *Mitt. Inst. fur Geotechnik 53. Universitat Stuttgart*, Stuttgart, 167 s.

**MORE ACCURATE DEFINITION OF REAL PHYSICAL-AND-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF GROUND FORMING THE BASIS OF THE WATER CONTAINER OF ZAGORSK HYDRO ELECTRIC STATION-2 ON THE BASE OF ANALYTICAL INVESTIGATIONS AND DATA OF NATURAL CONTROL**

Shestopalov P. V.

*JSC "Institute Hydroproject", Moscow*

Results of settlement definition of the actual physic-mechanical characteristics of the basis of a water intake on the basis of finite element models of system "a water intake under construction - the basis" with use of this natural supervision over a precipitation of a water intake under construction are given. Thus researches were conducted for the various stages of construction corresponding to cycles of geodetic supervision.

**KEYWORDS:** physic-and-mechanical characteristics of soil; water intake basis; data of natural supervision; water intake precipitation; phasing of construction of a water intake; finite element models of construction basis system.