

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТНОГО УТОЧНЕНИЯ  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКАЛЬНЫХ И НЕ-  
СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА  
ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ С УЧЕТОМ НАТУР-  
НЫХ ДАННЫХ**

П.В. ШЕСТОПАЛОВ

ОАО «Институт Гидропроект», Москва

*Вследствие различных причин фактические физико-механические характеристики грунтов оснований гидротехнических сооружений могут отличаться от проектных предпосылок. Предлагается методика расчетного уточнения фактических физико-механических характеристик скальных и нескальных оснований гидротехнических сооружений на основе конечно-элементных моделей системы «сооружение - основание» с учетом данных натурных наблюдений за осадками сооружений. Приводятся примеры применения разработанной методики, касающиеся оснований секций бетонной плотины Богучанской ГЭС и водоприемника Загорской ГАЭС-2.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гидротехнические сооружения; «долгострой»; секции бетонной плотины; водоприемник; скальные и нескальные основания; физико-механические характеристики грунтов; контрольно-измерительная аппаратура; данные натурных наблюдений; конечно-элементные модели системы «сооружение-основание»; расчетные исследования; напряженно-деформированное состояние.

Проблема обеспечения безопасности гидротехнических сооружений при их эксплуатации приобрела особую актуальность после принятия Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» (№117-ФЗ от 21 июля 1997 г.). Следует отметить, что безопасная эксплуатация основных сооружений гидроузлов в значительной степени зависит от состояния их оснований. Так, например, при оценке прочности и устойчивости сооружений учитываются физико-механические характеристики основания. В этой связи необходимо определение фактических значений физико-механических характеристик основания. При этом следует отметить, что зачастую фактические значения прочностных и деформативных характеристик оснований гидросооружения отличаются от принимаемых при проектировании. В большей степени это касается объектов так называемого «долгостроя». Среди гидроузлов, гидротехнические сооружения которых возводятся в условиях затянувшихся сроков строительства следует, в первую очередь, перечислить Богучанскую, Бурейскую, Зарамагскую, Рогунскую ГЭС и др. [1, 2, 3].

Автором было предложено уточнять значения фактических физико-механических характеристик оснований гидротехнических сооружений расчет-

ным путем на основе конечно-элементных моделей системы «сооружение - основание» с использованием данных натуральных наблюдений за деформациями основания. Разработанный подход к решению данной задачи показан на примерах секций бетонной плотины Богучанской ГЭС, расположенной на скальном основании, и водоприемника Загорской ГАЭС-2, расположенного на мягком основании.

Одним из основных сооружений напорного фронта Богучанской ГЭС является гравитационная бетонная плотина, основанием которой служат долериты. Максимальная высота бетонной плотины 73 м, общая протяженность - 757 м. Плотина включает 16 глухих секций (№№ 2...10, 23, 29, 30...34); 9 стационарных секций (№№ 11...19); 5 водосбросных секций водосброса №1 (№№ 24...28) и 3 водосбросные секции водосброса №2 (№№ 20...22). Конструкция секции №28 бетонной плотины в продольном разрезе представлена на рис. 1.

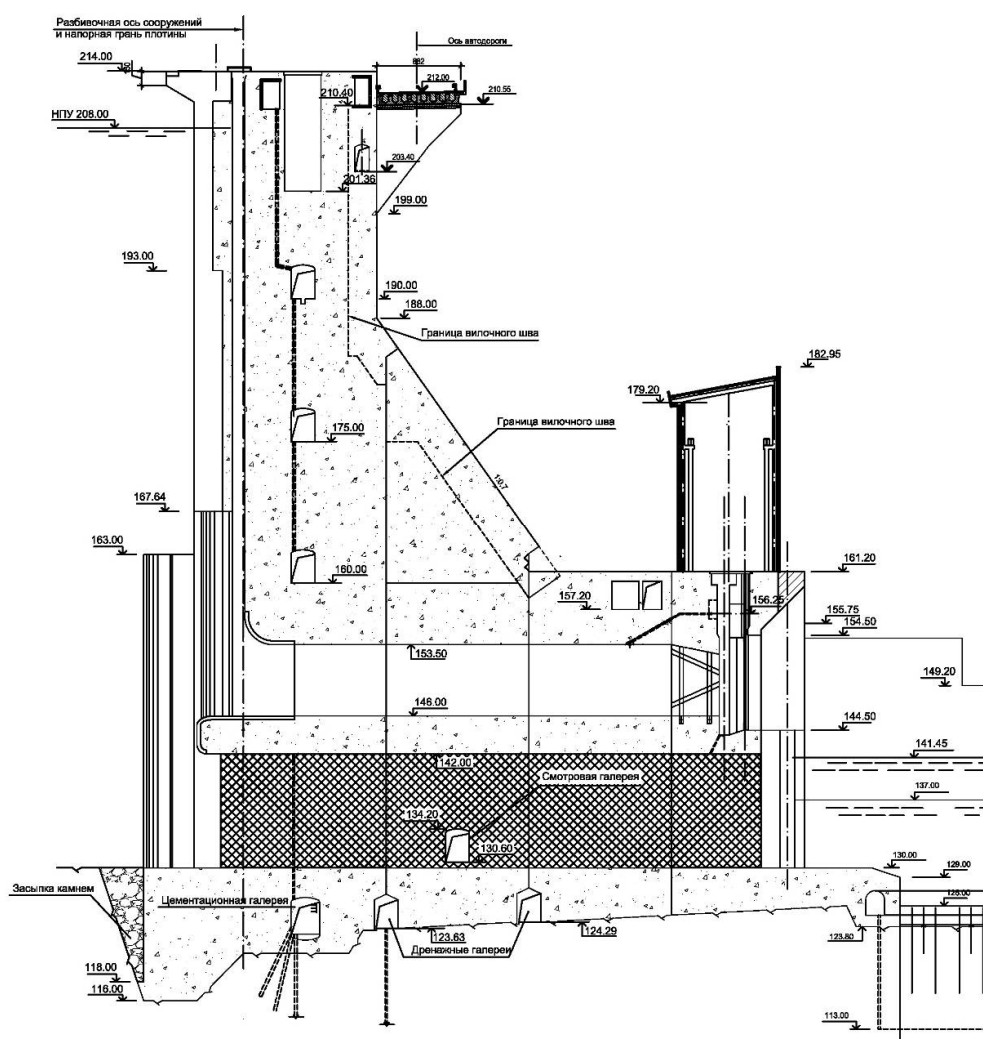


Рис. 1. Конструкция секции №28 бетонной плотины в продольном разрезе

Долериты, слагающие основание бетонной плотины Богучанской ГЭС, имеют различный состав и различные свойства. Проектные значения модулей деформации  $E$  следующие:

- в зоне неизменной части массива  $E = 23000$  МПа;
- в зоне разгрузки  $E = 15000$  и  $6000$  МПа;
- в зоне интенсивной разгрузки  $E = 3000$  и  $6000$  МПа.

Массив долеритов на участке бетонных сооружений по структурным особенностям разделяется на три основные части: основание секций плотины №№ 1...16; основание секций №№ 17...22; и основание секций №№ 23...34.

Инженерно-геологическое строение основания секции №28 бетонной плотины представлено на рис. 2.

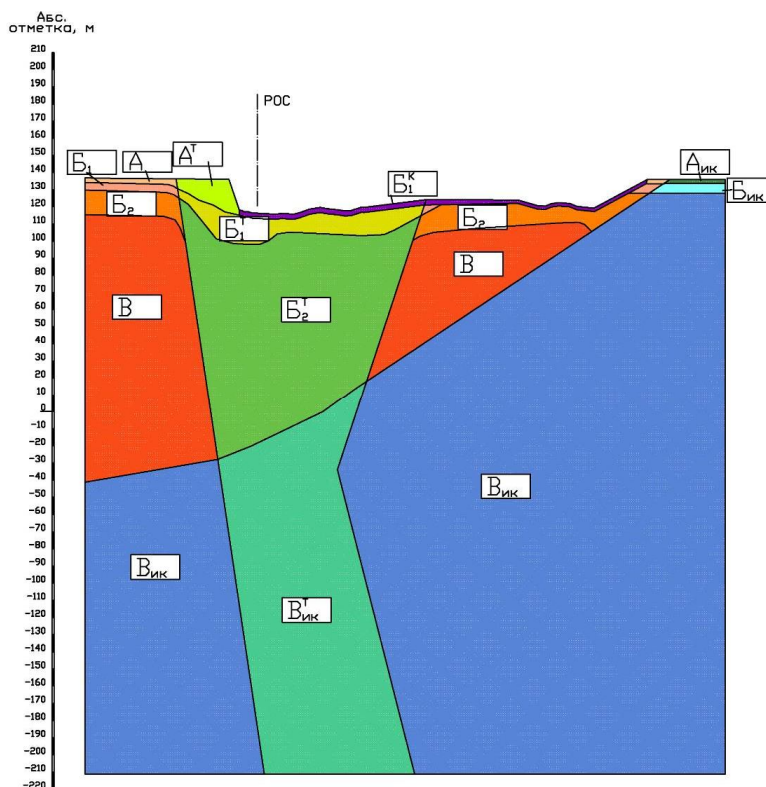


Рис. 2. Инженерно-геологическое строение основания секции №28 бетонной плотины

Для контроля состояния основания бетонной плотины была установлена дистанционная контрольно-измерительная аппаратура. При этом величина осадки и температура приконтактной зоны основания измеряются посредством приборов, смонтированных на штангах-удлинителях длиной 2 м; 5 м; 15 м, которые были заложены в пробуренные скважины перед укладкой бетона. Полные осадки основания (его активной области) определяются путем нивелирования потолочных марок, установленных в цементационной галерее секций №№ 5...34 по две марки в каждой из секций.

Анализ данных многолетних натуральных наблюдений за напряженно-деформированным состоянием скального основания бетонной плотины Богучанской ГЭС, выполненных под руководством и при непосредственном участии проф., д.т.н. Калустяна Э.С., показал ухудшение свойств скального основания, произошедшего, в основном, вследствие «долгостроя» [4, 5, 6].

В целях проведения расчетных исследований уточненных фактических значений модулей деформации основания секций бетонной плотины были разработаны конечно-элементные модели систем «сооружение-основание» для ха-

рактерных секций бетонной плотины (№№ 12, 21, 28, 31, 34) - так называемых створных секций, оснащенных контрольно-измерительными приборами в значительной степени. В качестве примера конечно-элементная модель секции №28 с основанием представлена на рис. 3.

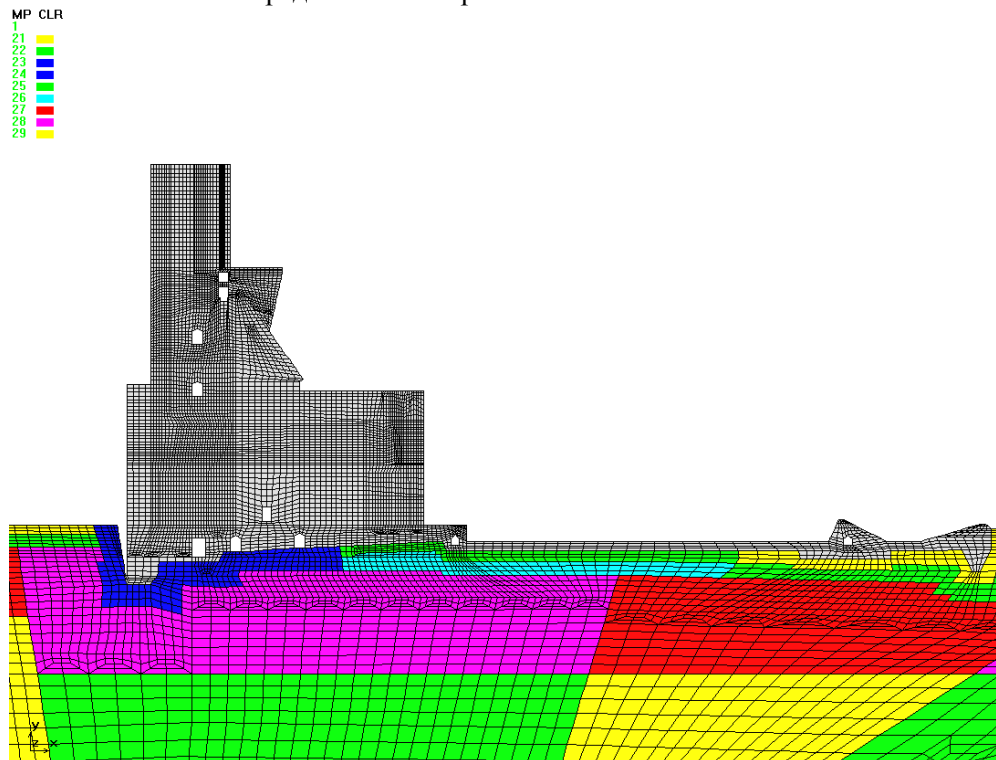


Рис. 3. Конечно-элементная модель секции №28 с основанием

Уточненное расчетным путем значение модуля деформации верхнего слоя приконтактной зоны секции №28 глубиной до 2-х метров составило 400 МПа; нижнего слоя приконтактной зоны (в пределах от 2-х до 5-ти метров) той же секции №28 - 750 МПа. Также было выполнено расчетное уточнение физико-механических свойств основания водоприемника Загорской ГАЭС-2, строящейся на мягком грунтовом основании [7], на основе предложенной автором усовершенствованной методики.

Массивное железобетонное сооружение водоприемника строящейся Загорской ГАЭС-2 высотой 48,00 м, шириной вдоль потока 63,15 м, протяженностью поперек потока 78,70 м представляет собой неразрезную конструкцию, включает четыре водопроводящие галереи, башню управления затворами, а также певобережный и правобережный устои. Отметка гребня водоприемника - 269,00 м, отметка подошвы фундаментной плиты - 227,50 м.

Одной из основных конструкций является массивная фундаментная плита толщиной 2,5 м. Она имеет три зуба по своей протяженности, которые предназначены для увеличения длины контактной фильтрации и для повышения сопротивления сдвигу. Отметки подошв верхового, центрального и низового зубьев, соответственно, 221,00, 223,30 и 225,50 м. Продольный разрез конструкции водоприемника представлен на рис. 4.

Следует упомянуть, что основание сооружения водоприемника строящейся Загорской ГАЭС-2 имеет сложное инженерно-геологическое строение.

Значительная часть подошвы водоприемника располагается на моренных суглинках. В восточной части основания водоприемника была обнаружена линза озерно-болотных микулинских отложений, представленных суглинками с прослоями глины и песка, мощностью 6,0 м. Данные грунты оказались непригодными для основания водоприемника. Они были удалены и заменены качественным грунтом. Инженерно-геологическое строение основания водоприемника показано на рис. 5.

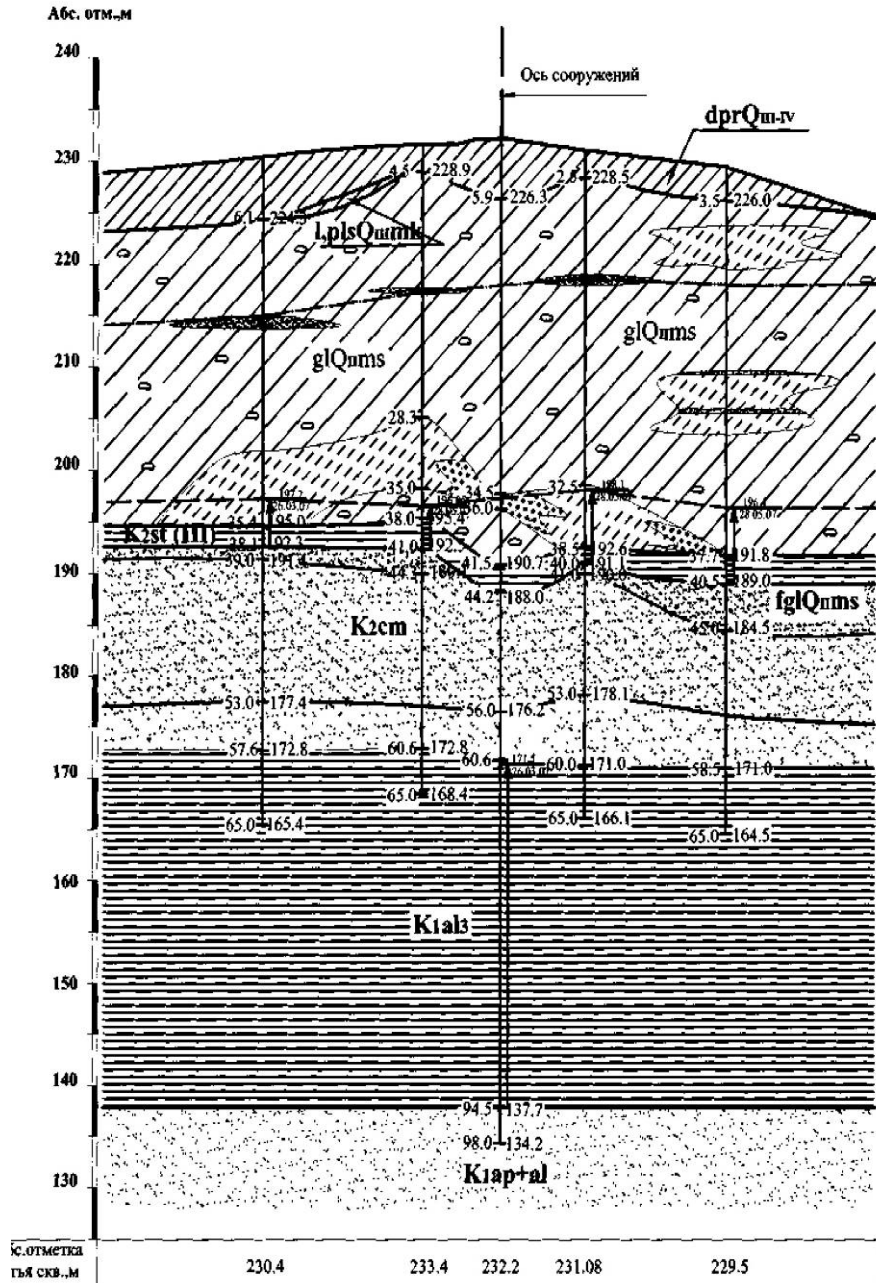


Рис. 4. Продольный разрез конструкции водоприемника

Геодезические наблюдения за осадками строящегося водоприемника Загорской ГАЭС-2 проводятся посредством шести трубо-марок, установленных на верхней грани фундаментной плиты.

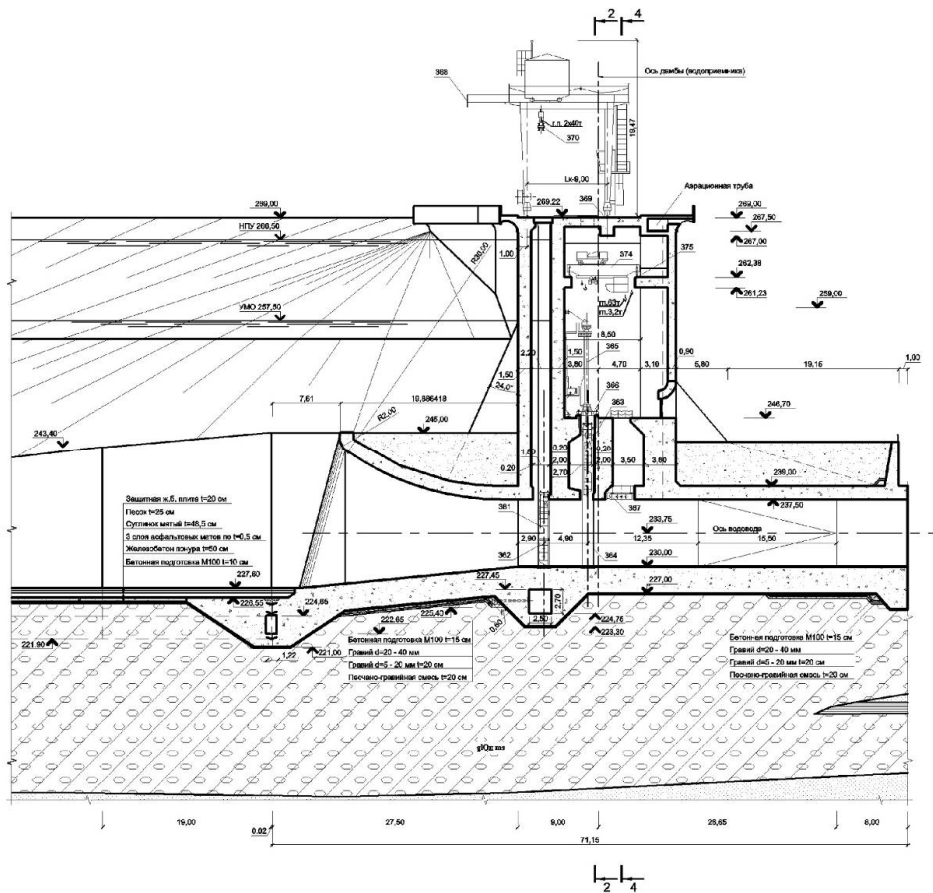


Рис. 5. Инженерно-геологическое строение основания водоприемника

Полученные данные показывают определенную неравномерность осадки фундаментной плиты водоприемника, что свидетельствует о неоднородности основания. Результаты геодезических наблюдений за осадками строящегося водоприемника Загорской ГАЭС-2 приведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения осадок фундаментной плиты водоприемника Загорской ГАЭС-2 по показаниям трубно-марок

| Обозначение трубно-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                    | 20.01.2010 г.          | 102,7                      |
| 1ТМ06                    | 24.09.2009 г.          | 121,3                      |

Учитывая вышесказанное, возникла необходимость в уточнении физико-механических характеристик грунтов основания водоприемника Загорской ГАЭС-2. В качестве исходных данных были приняты характерные этапы возведения водоприемника, начиная с 2008 г. и по 4-й квартал 2012 г.

В целях решения задачи по уточнению физико-механических характеристик грунтов основания водоприемника Загорской ГАЭС-2 были разработаны

конечно-элементные модели системы «водоприемник – основание», соответствующие различным этапам возведения водоприемника. Для примера на рис. 6 представлена конечно-элементная модель, соответствующая одному из расчетных этапов.

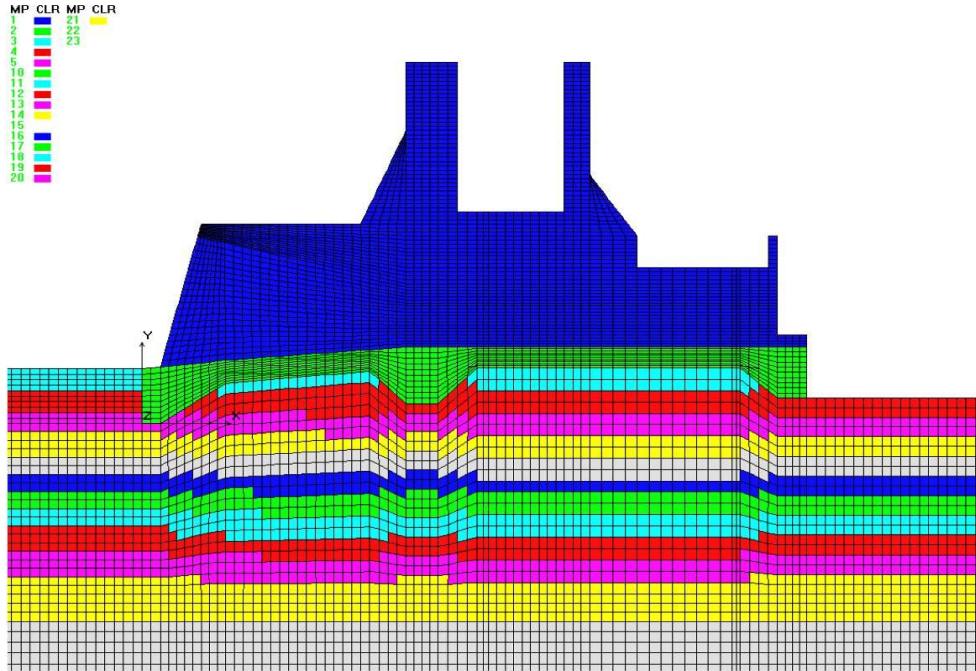


Рис. 6. Конечно-элементная модель, соответствующая одному из расчетных этапов

Таблица 3. Результаты расчета для промежуточного этапа возведения водоприемника (по состоянию на 01.12.2011 г.).

| Глубина залегания слоя | Модули деформации, МПа  |   |
|------------------------|---|---|
|                        | В верхней части основания<br>(в зоне установки трубо-марок 1ТМ01 и 1ТМ03) | В нижней части основания<br>(в зоне установки трубо-марок 1ТМ02, 1ТМ04-1ТМ06) |
| 0-2                    | 40.8  | 40.0  |
| 2-4                    | 44.0  | 43.1  |
| 4-6                    | 47.2  | 46.3  |
| 6-8                    | 50.5  | 49.5  |
| 8-10                   | 53.7  | 52.7  |
| 10-12                  | 57.0  | 55.8  |
| 12-14                  | 60.2  | 59.0  |
| 14-16                  | 63.4  | 62.2  |
| 16-18                  | 66.7  | 65.4  |
| 18-20                  | 69.9  | 68.5  |
| 20-24                  | 73.1  | 71.7  |

Величина фрагмента основания, включаемого в конечно-элементные модели, определялась глубиной сжимаемой толщи основания [8, 9]. На основе расчетов послойного суммирования была определена граница сжимаемой толщи основания водоприемника, которая находится в пределах слоя флювиогляциальных отложений, представленных преимущественно суглинками моренны-

ми. Также при моделировании основания водоприемника учитывалось увеличение модуля деформации грунта в зависимости от глубины заложения данного слоя основания в соответствии с результатами компрессионных испытаний образцов грунта.

Расчётные исследования напряженно-деформированного состояния основания водоприемника на основе конечно-элементных моделей выполнялись итерационным путем.

В результате проведенных расчетных исследований были уточнены значения модулей деформации основания водоприемника, которые представлены в табл. 3. Таким образом, расчетным путем на основе усовершенствованной автором методики были получены уточненные значения модулей деформации скального основания бетонной плотины Богучанской ГЭС, а также мягких грунтов основания водоприемника Загорской ГАЭС-2, которые были позднее использованы при проведении поверочных расчетов прочности и устойчивости данных бетонных сооружений.

#### Л и т е р а т у р а

1. *Volynchikov A.V.* Structural aspects of the Boguchany project on the Angara river// The International Journal of Hydropower & Dams. – 2007. – No.3. – PP. 58-62.
2. *Kosterin N.V., Vasilyev A.V.* The multipurpose Bureya dam project in Russia// The International Journal of Hydropower & Dams. – 2007. – No. 3. – PP. 54-57.
3. *Schmidt R.* Feasibility study for completion of the Rogun scheme, Tadjikistan// The International Journal of Hydropower & Dams, – 2007. – No. 3. – PP. 102-107.
4. Акт обследования гидротехнических сооружений строящейся Богучанской ГЭС, г. Козинск Красноярского края, 7 – 11 июля 1999 г..
5. Акт по комплексной проверке качества строительства Богучанской ГЭС, г. Козинск Красноярского края, 28.09 – 30.10.2000 г.
6. *Калустян Э.С., Горбушина В.К., Корябин И.А.* Состояние основания бетонной плотины Богучанской ГЭС по данным натурных наблюдений// Гидротехническое строительство. – 2000. – № 4.
7. 1833-КН.4. ТЭО (проект) строительства Загорской ГАЭС-2 на р. Кунье.
8. СП 23.13330.2011 (Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений»).
9. СП 50-101-2004 «Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений».

#### R e f e r e n c e s

1. *Volynchikov, A.V.* (2007). Structural aspects of the Boguchany project on the Angara river, *The International Journal of Hydropower & Dams*, No. 3, 58-62.
2. *Kosterin, N.V. and Vasilyev A.V.* (2007). The multipurpose Bureya dam project in Russia, *The International Journal of Hydropower & Dams*, No. 3, 54-57.
3. *Schmidt R.* (2007). Feasibility study for completion of the Rogun scheme, Tajikistan, *The International Journal of Hydropower & Dams*, No. 3, 102-107.
4. Akt obsledovaniya gidrotehnicheskikh sooruzheniy stroyascheysya Boguchanskoy GES, Kodinsk Krasnoyarskogo kraya, July 7-11, 1999.
5. Akt po kompleksnoy proverke kachestva stroitelstva Boguchanskoy GES, Kodinsk Krasnoyarskogo kraya, 09.28 – 10.30.2000.
6. *Kalustyan, E.S., Gorbushina, V.K., Koryabin, I.A.* (2000). Sostoyaniya osnovaniya betonnoy plotiny Boguchanskoy GES po dannim naturnih nablyudeniya, *Gidrotehnicheskoe stroitelstvo*, № 4.
7. 1833-КН.4. ТЕ'О (proekt) stroitel'stva Zagorskoj GAE'S-2 na r. Kun'e.
8. SP 23.13330.2011 (Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.02-85 “Osnovaniya gidrotehnicheskikh sooruzheniy”).
9. SP 50-101-2004 “Proektirovanie i ustroystvo osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy”



**THE PERFECTION OF A METHOD OF ANALYTICAL ACCURATE DEFINITION  
OF PHYSIC-AND-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROCKY AND NOT  
ROCKY BASES OF HYDROTECHNICAL ERECTIONS ON THE BASIS OF FINITE  
ELEMENT MODELS WITH THE NATURE DATA TAKEN INTO ACCOUNT**

P.V. Shestopalov

*Institut "Hydroproyekt", Moscow*

Owing to the various reasons, the real physic-and-mechanical characteristics of soil of the bases of hydraulic engineering structural systems can differ from design preconditions. The technique of settlement specification of the actual physic-and-mechanical characteristics of the rocky and not rocky bases of hydraulic engineering structural systems is offered. This is done on the basis of finite element models of the system "erection - basis" with taking into account natural supervisions over settling of erections. Examples of the application of the developed technique, concerning the bases of sections of the concrete dam of Boguchany hydroelectric power station and the water intake of the Zagorsk GAES-2 are given.

**KEYWORDS:** hydrotechnical erections; unfinished building; sections of a concrete dam; rocky and not rocky bases; physic-and-mechanical soil characteristics; instrumentation; data of natural supervisions; finite element models of the system "erection - basis"; theoretical analysis; stress-strain state.

