

Экспериментальные исследования

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ 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

Определение фактических физико-механических характеристик скального основания гидросооружений является актуальной задачей, в особенности, при затянувшихся сроках строительства, вызывающих ухудшение свойств основания. Предложена методика определения (уточнения) физико-механических характеристик скального основания бетонной плотины на основе численного (конечноэлементного) моделирования напряженно-деформированного состояния системы «сооружение-основание» с учетом данных натурных наблюдений на характерных стадиях строительства. Представлены результаты расчетного уточнения физико-механических характеристик скального основания бетонной плотины Богучанской ГЭС.

Ключевые слова: затянувшиеся сроки строительства гидросооружений, физико-механические характеристики скального основания, натурные наблюдения за основанием, метод конечных элементов, расчетные исследования напряженно-деформированного состояния системы «сооружение-основание» на основе конечноэлементных моделей, расчетное уточнение физико-механических характеристик скального основания.

Состояние оснований основных сооружений гидроузлов играет важную роль в решении проблемы по обеспечению надежности и безопасности гидротехнических сооружений (ГТС). От физико-механических характеристик основания в значительной мере зависят такие показатели как устойчивость и прочность гидросооружений и их элементов. Таким образом, требуемый уровень обеспечения надежности и безопасности ГТС зависит от знания фактических характеристик основания. В этой связи задачи по определению истинных свойств основания приобретают особую актуальность.

В настоящее время в нашей стране и в ближнем зарубежье возводятся ГЭС в условиях затянувшихся сроков строительства. В данных условиях под влиянием атмосферных и техногенных воздействий происходит изменение (в основном, ухудшение) физико-механических характеристик, как основания, так и уложенного ранее бетона.

Одним из ярких примеров «долгостроя» является Богучанская ГЭС на р. Ангаре. Возведение основных сооружений БоГЭС началось с 1982 г. Более 80% бетона сооружений было уложено до 1992 г. Позднее произошло существенное снижение темпов строительства. Во многих случаях подготовленное скальное основание длительное время оставалось открытым, подверженным прямому воздействию окружающей среды. В настоящее время это, в большей степени, касается основания здания ГЭС последних из агрегатных секций, а также основания водобойного колодца дополнительного водосброса № 2. В ряде случаев участки основания частично возведенных столбов сооружений оказались подверженными длительным сезонным воздействиям отрицательной температуры (в том числе «замораживанию – оттаиванию»). Из-за непредусмотренного проектом увеличения сроков строительства, основание, как и бетон плотины, под-

вергались воздействию сезонных колебаний температур с амплитудой колебания, составляющей 90°C в отдельные годы. Анализ результатов многолетних наблюдений за основанием бетонной плотины показал, что эти температурные колебания способствуют разуплотнению скального массива, особенно на открытых участках основания бетонной плотины.

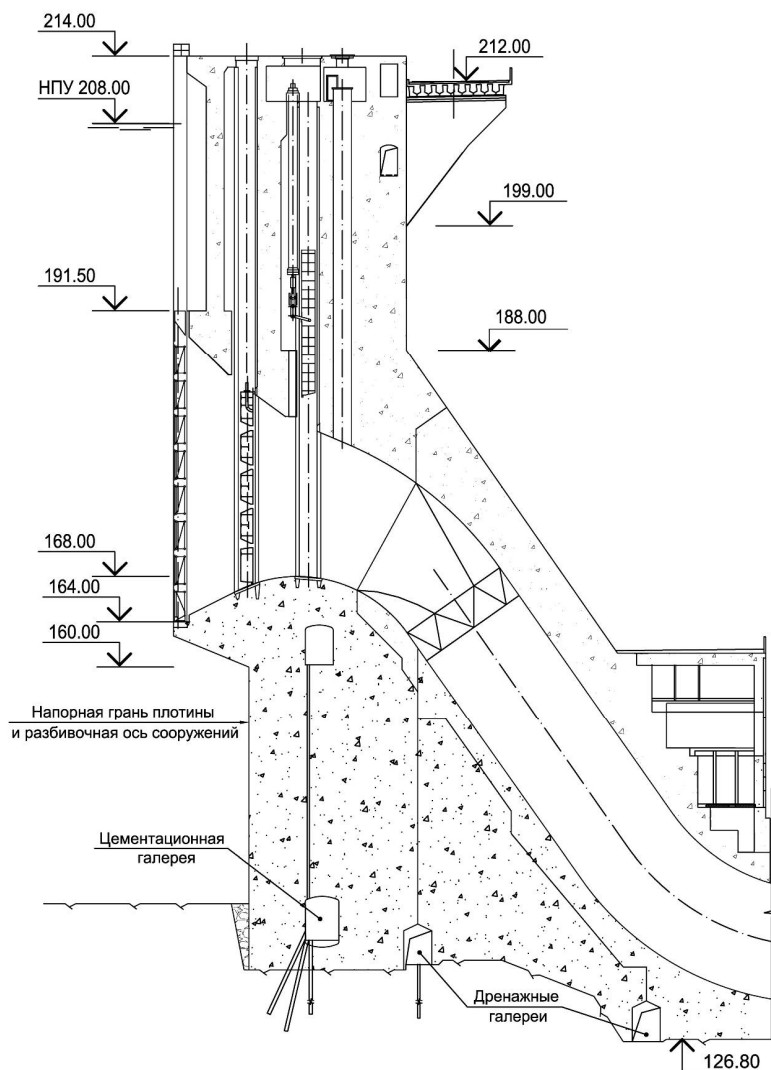


Рис. 1. Конструкция секции № 19 в сечении вдоль потока

В результате указанных выше факторов под негативным воздействием окружающей среды происходило ежегодное ухудшение физико-механических свойств основания (таких как прочность, жесткость, трещиностойкость, водонепроницаемость и др.). При этом можно выделить две характерные зоны основания: приконтактную, условно принимаемую равной 5 м, в пределах которой реализуется наибольшая доля деформаций, и активную (составляющую десятки метров), в пределах которой происходят практически все деформации.

Необходимо отметить встречающиеся в материалах натурных обследований и публикациях сведения о снижении прочностных и деформативных свойств скального основания в основании бетонной плотины. Так, по данным,

опубликованным в статье «Контрольные наблюдения на бетонной плотине Богучанской ГЭС в строительный период» [1], а также в материалах «Акта обследования гидротехнических сооружений строящейся Богучанской ГЭС» (1999 г.) [2] отмечалась величина модуля деформации скалы приконтактной зоны основания глубиной до 5 м при действующих нагрузках порядка 0,7 МПа в 5-6 раз меньше среднего проектного значения по массиву. Наиболее низкими деформативными характеристиками отличалось основание под первым столбом в районе секции № 21. Также отмечалось существенное увеличение показателей водопроницаемости основания на глубине до 10...25 м в секциях №№ 21, 22, 29, 30 и снижение показателей его деформативных свойств.

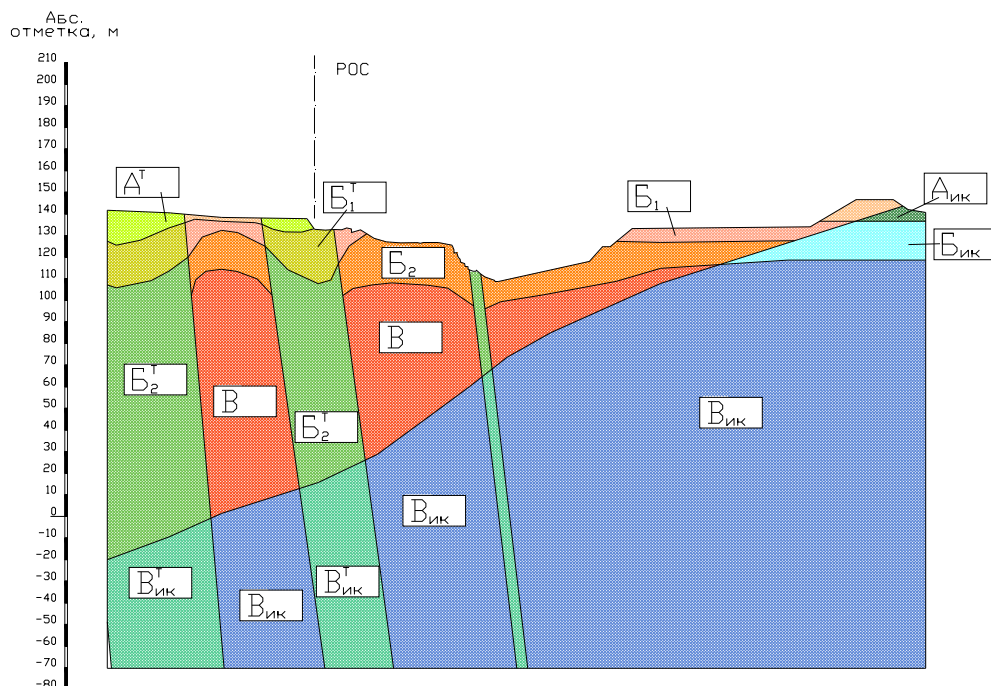


Рис. 2. Инженерно-геологический разрез основания секции №19 вдоль потока

В «Акте по комплексной проверке качества строительства Богучанской ГЭС» [3] отмечалось, что длительное нахождение скального основания бетонных сооружений Богучанской ГЭС в условиях резко континентального климата привело к дополнительному выветриванию на значительную глубину. Характерным является расширение трещин за счет гравитации и выветривания. Отмечалось, что при возобновлении работ в 1999-2000 гг. подготовка основания сопровождалась значительными переборами выемки породы до 4...6 м.

В материалах, опубликованных в статье «Состояние основания бетонной плотины Богучанской ГЭС по данным натурных наблюдений» [4] указывалось: «Сравнение осадок в приконтактной пятиметровой зоне "бетон-скала", измеренных скальными деформометрами, с аналогичными значениями в активной зоне соответствующих секций показывает, что деформации пятиметровой приконтактной области основания составляют большую часть от осадки в активной зоне основания. Это указывает на наличие более деформируемой зоны основания на контакте с бетонной плотинной».

Основание бетонной плотины Богучанской ГЭС представлено долеритами различными как по составу, так и свойствам.

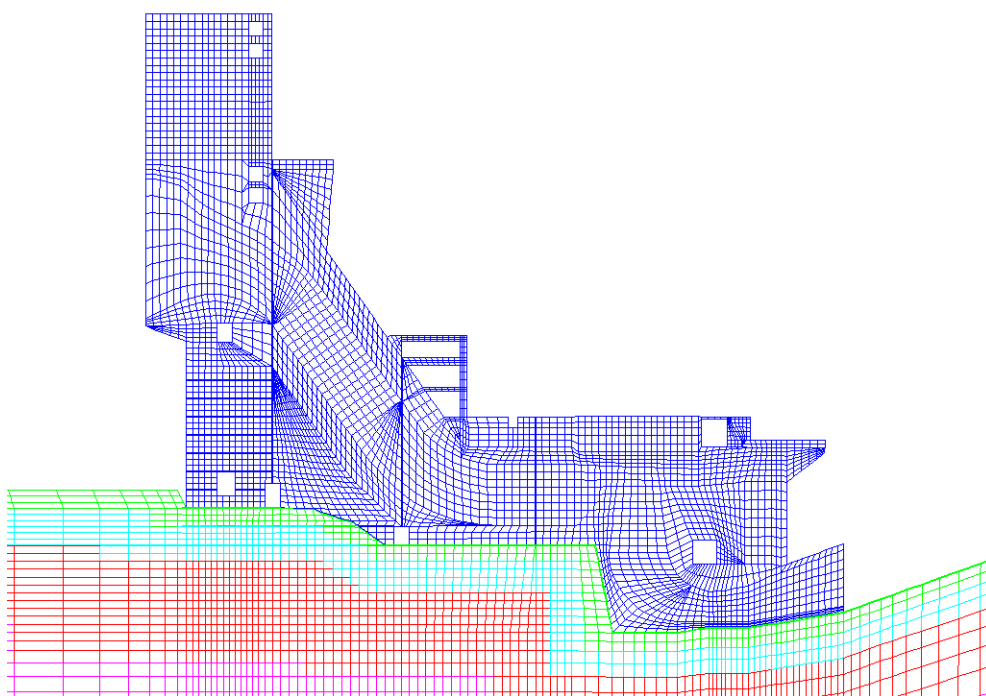


Рис. 3. Конечноэлементная модель секции №19 в сечении вдоль потока

Натурные наблюдения за деформациями и температурой основания бетонной плотины Богучанской ГЭС организованы в 1983 г. и после перерыва в течение 1993 - 1996 гг. проводятся до настоящего времени. Установка контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) в основании со стороны верховой грани бетонной плотины на глубину до 15×20 м выполнена в скважинах основания практически всех секций перед укладкой бетона в плотину Богучанской ГЭС, а со стороны низовой грани – в отдельных створных секциях (значительно оснащенных КИА). Осадки основания в приконтактной 2-х; 5-ти; 15-ти метровой области измеряются датчиками деформаций ПЛПС-10, установленными в скважинах скального массива основания с момента начала укладки бетона в секции плотины. Одновременно в местах установки датчиков деформаций производится измерение температуры основания датчиками температуры в скважинах на глубинах закладки приборов, что позволяет проследить влияние температуры на деформации основания. Обработка результатов натурных наблюдений в основании бетонной плотины и их анализ в настоящее время производится по более чем 200 приборам дистанционной КИА, установленным в основании левобережных глухих секций №№ 6-10; станционной и водосбросной части секций №№ 11-29 и в сопрягающих секциях №№ 30-34. В активной области основания бетонной плотины осадки с 1985 г. определяются нивелированием 42 потолочных марок, размещенных в цементационной галерее.

Следует также отметить, что основные расчеты по обоснованию прочности и устойчивости сооружений БоГЭС (в том числе бетонной плотины) были проведены при проектных значениях характеристик основания и бетона сооружений, в то время как данные многолетних наблюдений по показаниям контрольно-измерительной аппаратуры свидетельствуют о существенных отличиях (в целом ряде случаев) фактических значений от проектных предпосылок. Требу-

ются соответствующие поверочные расчеты секций бетонной плотины с учетом фактических свойств основания. В этой связи задача по уточнению фактических свойств скального основания бетонной плотины приобретает особую актуальность. Необходимо отметить, что ранее были выполнены определенные исследования в данном направлении на основе различных подходов, основанных на использовании разнообразных расчетных математических моделей основания. При этом наиболее существенные натурные и расчетные исследования основания бетонной плотины Богучанской ГЭС проведены д.т.н., проф. Калустяном Э.С.

Один их подходов к решению данной задачи основан на расчетах в предположении упругого поведения скального основания и равномерного распределения сжатия под расчетными столбами секций плотины. При этом основание рассматривается отдельно от сооружения, влияние сооружения учитывается равномерной вертикальной сжимающей нагрузкой, соответствующей весу сооружения. Наряду с получением натурных данных по осадкам, производится учёт укладываемого бетона с последующей оценкой напряжений по подошве плотины. Вертикальные сжимающие напряжения в основании бетонной плотины принимаются равномерно распределенными и определяются путем деления веса столба плотины на площадь его подошвы. Учитывая имеющиеся данные по напряжениям в основании и его осадкам за различные интервалы времени, представляется возможным определить расчётом деформационные характеристики основания плотины в приконтактной и в активной областях основания. Наряду с определенными недостатками и принимаемыми допущениями, следует отметить, что данный подход позволяет оперативно оценить величину модуля деформации основания.

Выполнение данной задачи применительно к условиям скального основания бетонной плотины Богучанской ГЭС основано на использовании технического решения, предусматривающего учёт упругой составляющей общей измеренной деформации основания. Ниже приводятся значения напряжений в основании бетонной плотины, принимаемые в рамках данного подхода.

Таблица 1

*Напряжения в основании секций бетонной плотины Богучанской ГЭС
(по состоянию на конец 2011 г.)*

№№ секций	Напряжения в основании первых столбов плотины σ_1 , в МПа	Средние напряжения в основании секций плотины, σ_{cp} в МПа	σ_1 / σ_{cp}
12	1,74	0,89	1,96
19	1,81	0,92	1,96
21	1,73	1,36	1,27
23	2,22	1,23	1,81
28	2,31	0,94	2,44
31	1,92	1,00	1,93
34	2,27	1,05	2,16

Модули деформации, определенные с использованием данной методики, составили для приконтактной пятиметровой зоны в основании секций №№ 15, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 27, 28 – 900...2000 МПа; а для активной зоны в основании секций №№ 15, 19, 21, 22, 24, 27 – 4700...8200 МПа. При этом модули де-

формации для активной зоны в основании секций №№ 19, 20, 21 составили 7100...8200 МПа, а в основании секций №№ 22-27 – 4700...6400 МПа.

Другой подход заключался в использовании плоских конечноэлементных моделей секций бетонной плотины совместно с основанием для определения характеристик скального основания. Так в научно-техническом отчете Гидропроекта «Уточнение геомеханической модели основания бетонной плотины Богучанской ГЭС на основе численных расчетов и данных натуральных наблюдений» [5] приводятся результаты численных исследований НДС состояния скального основания для секций № 21 и № 28. На основании расчетов были даны рекомендации по уточнению деформационной модели основания. При этом применительно к условиям секции №21 конечноэлементную модель рекомендуется дополнить зоной выветривания «А» и зоной интенсивной разгрузки «Б₁» мощностью по 5 м каждая. Модуль деформации указанных зон составляет соответственно 350-600 МПа и 6000 МПа, при этом модуль деформации массива со стороны верховой грани в зоне «А» ниже 350 МПа. Применительно к секции №28 рекомендуется включить в модель основания зону выветривания «А^Т» мощностью 5 м, имеющую модуль деформации 750 МПа. Помимо этого, со стороны низовой грани следует выделить подзону «А₁^Т» мощностью 2 м с модулем деформации 350 МПа.

Следует отметить, что в рамках данного подхода были использованы конечноэлементные модели изолированных секций бетонной плотины с основаниями без учета влияния возведения соседних секций плотины. Имеются также другие допущения и упрощения представленной методики.

В этой связи целесообразно упомянуть работы зарубежных специалистов, связанные с численными исследованиями скальных массивов ГЭС, работающих совместно с сооружениями [6-11].

На основе анализа достоинств и недостатков существующих подходов к расчетному определению фактических свойств основания плотины автором была предложена методика, позволяющая более полно учитывать влияние многообразия факторов, а также получать более корректные результаты. Так было учтено, что на деформацию основания исследуемой секции плотины (или даже отдельных столбов секции) существенное влияние оказывает не только процесс возведения каждого из столбов данной секции, но также столбов соседних секций, расположенных как в непосредственной близости, так и на некотором удалении. В отличие от представленных выше подходов предлагаемая автором методика учитывает пространственную конфигурацию возводимых сооружений в целом (по всей протяженности плотины), зафиксированную по исполнительной документации в расчетные периоды времени, а также особенности инженерно-геологического строения основания (то есть геометрию залегающих слоев основания).

Определение свойств основания проводилось на основе специально разработанной методики в рамках решения задач о напряженно-деформированном состоянии системы «строящееся сооружение – массив скального основания» с учетом сроков возведения сооружений и соответствующих этим периодам деформациям основания, измеренным посредством установленной в основании КИА. Для выполнения поставленных задач были разработаны конечноэлементные модели поперечных сечений секций плотины, а также конечноэлементные модели продольных сечений по столбам бетонной плотины (в первую очередь, по первым столбам секций плотины). При этом высота столбов секций плотины

принималась соответствующей расчетным периодам времени. В качестве примера на рис. 1-3 представлены конструкция, инженерно-геологическое строение основания и конечноэлементная модель сечения секции № 19 бетонной плотины.

В результате проведенных исследований были определены предварительные расчетные значения модуля деформации основания бетонной плотины на примере секции № 19. В том числе выполнялась оценка прочностных свойств приконтактных зон основания с помощью корреляционных зависимостей, предложенных в [12] и [13], связывающих деформационные и прочностные характеристики массива основания.

Для верхнего слоя приконтактной зоны глубиной до 2-х метров значение модуля деформации, определенное расчетным путем, составило 350 МПа. Для нижнего слоя приконтактной зоны в пределах от 2-х до 5-ти метров значение модуля деформации, определенное расчетным путем, составило 1040 МПа.

Планируются дальнейшие исследования по совершенствованию предложенной методики, в первую очередь, в направлении более корректного учета пространственного напряженного состояния основания бетонной плотины.

Л и т е р а т у р а

1. *Блинов И.Ф., Мирзак Н.М., Лавров Б.А.* и др. Контрольные наблюдения на бетонной плотине Богучанской ГЭС в строительный период// Гидротехническое строительство. – № 9. – 1993. – С. 3-8.

2. Акт обследования гидротехнических сооружений строящейся Богучанской ГЭС. г. Козинск Красноярского края, 7–11 июля 1999 г.

3. Акт по комплексной проверке качества строительства Богучанской ГЭС. г. Козинск Красноярского края, (28.09 – 30.10.2000 г.).

4. *Калустян Э.С., Горбушина В.К., Корябин И.А.* Состояние основания бетонной плотины Богучанской ГЭС по данным натурных наблюдений// Гидротехническое строительство. – № 4.– 2000. – С. 19-31.

5. Богучанская ГЭС на р. Ангаре. «Уточнение геомеханической модели основания бетонной плотины Богучанской ГЭС на основе численных расчетов и данных натурных наблюдений»// Научно-техн. отчет: ОАО «Институт Гидропроект», ЦСГНЭО, М., 2000.

6. *Kaloustian E., et al.* Restoration of workability of «old» dams// XXII ICOLD. Q.82, R.16. Montreal, 2003.

7. Annual Meeting of ICOLD. St.Peterburg, Russie. 24-29 June, 2007.

8. *Vogel A.* Safety, risk and reliability – trends in engineering// Int. Conf., Malta, 2001.

9. *Jafari M., Ashtiani M., and Palasi M.* A general investigation on slope stability of Khersan III hydropower plant using numerical modeling// The 44-th U.S. Rock Mechanics Symposium & 5-th U.S. – Canada Symposium June 27-30, Salt Lake City, 2010.

10. *Bondarchuk A.* Rock Mass Behavior under Hydropower Embankment Dams Results from Numerical Analyses// Thesis, PhD. – Lulea University of Technology, 2008.

11. *Moraes, R.* Numerical codes used to model failure in large fractured scale and jointed rock slopes in hydropower projects// 6-th Int. Conference on Dam Engineering, Feb. 15-17, Lisbon, 2011.

12. *Hoek E. and Brown E.T.* Practical Estimates of Rock Mass Strength// Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Pergamon, vol. 34, No. 8, 1997, pp. 1165-1186.

13. *Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B.* Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition// 5th North American Rock Mechanics Symp. and 17th Tunneling Association of Canada Conf. Toronto, 2002, pp. 267-271.

R e f e r e n c e s

1. *Blinov .F., Mirsak N.M., Lavrov B.A.* and others. Kontrolnie nablyudeniya na betonnoy plotine Boguchanskoy GES v stroitelniy period// Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. - № 9. – 1993. – P.3-8.

2. Акт обследования гидротехнических сооружений строящейся Богучанской ГЭС, Козинск, Красноярский край, July 7-11, 1999.

3. Akt po kompleksnoy proverke kachestva stroitelstva Boguchanskoy GES, Kodinsk, Krasnoyarskiy kray, September 28- November 30, 2000.
4. *Kalustyan E.S., Gorbushina V.K., Koryabin I.A.* Sostoyanie osnovaniya betonnoy plotini Boguchanskoy GES po dannim naturnih nablyudeniyy// Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – № 4. – 2000. – P. 19-31.
5. Boguchanskaya GES na r. Angare. Utochnenie geomehanicheskoy modeli osnovaniya betonnoy plotini Boguchanskoy GES na osnove chislennih raschetov i dannih naturnih nablyudeniyy// Nauchno-tehn. otchet: JSC “Institute Hydroproject”, TzSGNEO, Moscow, 2000.
6. *Kaloustian E., et al.* Restoration of workability of «old» dams// XXII ICOLD. Q.82, R.16. Montreal, 2003.
7. Annual Meeting of ICOLD. St. Peterburg, Russia. 24-29 June, 2007.
8. *Vogel A.* Safety, risk and reliability – trends in engineering// Int. Conference, Malta, 2001.
9. *Jafari M., Ashtiani M., and Palasi M.* A general investigation on slope stability of Khersan III hydropower plant using numerical modeling// The 44-th U.S. Rock Mechanics Symposium & 5-th U.S. – Canada Symposium June 27-30, Salt Lake City, 2010.
10. *Bondarchuk A.* Rock Mass Behavior under Hydropower Embankment Dams Results from Numerical Analyses// Thesis, PhD. – Lulea University of Technology, 2008.
11. *Moraes R.* Numerical codes used to model failure in large fractured scale and jointed rock slopes in hydropower projects// 6-th Int. Conference on Dam Engineering, Feb. 15-17, Lisbon, 2011.
12. *Hoek E. and Brown E.T.* Practical Estimates of Rock Mass Strength// Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Pergamon, vol. 34, No. 8, 1997, pp. 1165-1186.
13. *Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B.* Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition// 5th North American Rock Mechanics Symp. and 17th Tunneling Association of Canada Conf. Toronto, 2002, pp. 267-271.

**CALCULATED RESEARCH FOR CLARIFYING PHYSICAL AND
MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE HYDRAULIC STRUCTURES
BEDROCK FOUNDATION, MADE ON IN-SITU DATA**

P.V. Shestopalov,
JSC “Institute Hydroproject”, Moscow

Definition of the real physical and mechanical characteristics for the bedrock foundations of the hydraulic structures appears to be a crucial task. It begins to be a problem number one if the construction period is prolonged and causes deterioration of the foundation.

The method of definition is suggested as clarification of the physical and mechanical characteristics for the bedrock foundations of the hydraulic structures on the basis of the numerical (finite element) modeling of the “structure-foundation” system strain-stress state, taking into account the field data studies which were made during specific construction phases.

The data on the Boguchany HPP concrete dam are presented as the results of the calculated clarification of the physical and mechanical characteristics for the bedrock foundations.

KEYWORDS: prolonged period in hydro construction, physical and mechanical characteristics of bedrock foundations, field studies on the foundation, finite element method, calculated research of the “structure-foundation” system strain-stress state on the basis of finite element models, calculated clarification of physical and mechanical characteristics of the bedrock foundation.

