

## Статический расчет варианта тонкостенного лабиринтного водослива Майнской ГЭС на р. Енисей с использованием программного комплекса SOFiSTiK

### Static calculation of option of Mainskaya hydroelectric power station's labyrinth spillway with use of the SOFiSTiK software

ассистент Савченко Алексей Владимирович

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
+ 7 (911) 115 3597; ya.int@yandex.ru  
Санкт-Петербург  
Российская Федерация

Assistant Alexey Vladimirovich Savchenko

Saint-Petersburg State Polytechnical University  
+ 7 (911) 115 3597; ya.int@yandex.ru  
Saint-Petersburg  
Russian Federation

старший преподаватель Лалина Ирина Игоревна

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
irinalalina@yandex.ru  
Санкт-Петербург  
Российская Федерация

Senior lecturer Irina Igorevna Lalina

Saint-Petersburg State Polytechnical University  
irinalalina@yandex.ru  
Saint-Petersburg  
Russian Federation

**Ключевые слова:** статический расчет, лабиринтный водосброс, метод конечных элементов, SOFiSTiK, WinTUBE.

Целью настоящей статьи является информация об использовании для расчетов аналогичных конструкций современного программно-вычислительного комплекса SOFiSTiK ([www.sofistik.ru](http://www.sofistik.ru)), реализующего метод конечных элементов (МКЭ).

Расчет проведен на примере тонкостенного лабиринтного водосброса Майнской гидроэлектростанции.

**Key words:** static calculation, thin-walled spillway, finite element method, SOFiSTiK, WinTUBE.

The purpose of the present article is information on use for calculations of similar structures of the modern SOFiSTiK program computer system ([www.sofistik.ru](http://www.sofistik.ru)), realizing of the finite element method (FEM).

## 1. Введение

Целью настоящей статьи является информация об использовании для расчетов аналогичных конструкций современного программно-вычислительного комплекса SOFiSTiK ([www.sofistik.ru](http://www.sofistik.ru)), реализующего метод конечных элементов (МКЭ).

## 2. Постановка задачи и исходные данные для расчета

В связи с рассмотрением департаментом проектирования ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева одного из вариантов конструкции водослива Майнской ГЭС возникла необходимость выполнения следующего исследования:

1. Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) сооружения с учетом его совместной работы с грунтовым основанием от собственного веса сооружения и от гидростатического давления на водослив при двух состояниях верхнего бьефа (НПУ и ФПУ).

2. Определение давления на грунт по площади контакта водослива с грунтовым основанием.

Эта задача решалась на кафедре «Строительная механика и теория упругости» Санкт-Петербургского Политехнического университета с учетом опыта расчетов и исследований гидротехнических сооружений в России и за рубежом [1-21].

Исполнителю расчетов были предоставлены следующие исходные данные:

1. *Схема водослива*, выполненная в программе AutoCAD (рис. 1), с указанием размеров отдельных его элементов (на рис. 1 они не приведены).

2. *Характеристики материалов сооружения:*

Бетон Б30 – собственный вес  $24.53 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0.2, модуль упругости  $3.24711\text{E}+07 \text{ кН/м}^2$ ;

Бетон Б60 – собственный вес  $24.53 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0.2, модуль упругости  $4.00248\text{E}+07 \text{ кН/м}^2$ .

3. *Характеристики грунтового основания:*

Суглинок - собственный вес  $20.3 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0.35, модуль упругости  $25000 \text{ кН/м}^2$ , сцепление  $0.03 \text{ кН/м}^2$ , угол внутреннего трения  $20^\circ$ ;

Гравийно-галечниковый грунт с песчаным заполнителем (взвешенный в воде) - собственный вес  $11.2 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0.28, модуль упругости  $40000 \text{ кН/м}^2$ , сцепление  $0 \text{ кН/м}^2$ , угол внутреннего трения  $35^\circ$ ;

Гравийно-галечниковый грунт с песчаным заполнителем - собственный вес  $18.0 \text{ кН/м}^3$ , коэффициент Пуассона 0.28, модуль упругости  $40000 \text{ кН/м}^2$ , сцепление  $0 \text{ кН/м}^2$ , угол внутреннего трения  $35^\circ$ .

4. *Данные об НПУ и ФПУ и противодействии воды* по площади контакта водослива с грунтовым основанием:

НПУ – на отметке 326 м. Противодействие воды на основание сооружения учитывалось согласно действующему при НПУ столбу воды (при НПУ уровень воды в нижнем бьефе не учитывался);

ФПУ – на отметке 329 м. Противодействие воды на основание сооружения учитывалось согласно действующему при ФПУ столбу воды.

5. *Данные об учете зоны грунтового основания под сооружением.*

На отметке 300 м был задан жесткий контакт грунтового основания с заданными характеристиками со скальным основанием.

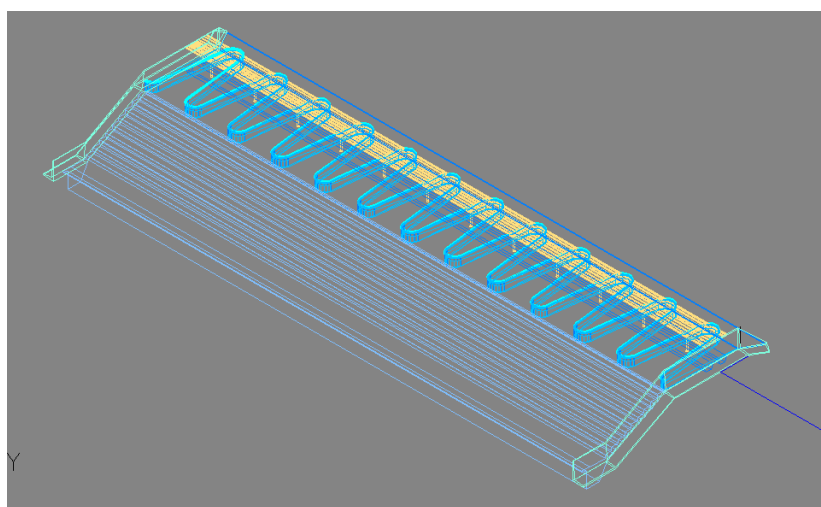


Рис. 1. Схема тонкостенного лабиринтного водослива, построенная в AutoCAD

### 3. Построение расчетной модели системы «сооружение-основание»

Для решения поставленной задачи расчетным способом должна быть рассмотрена расчетная схема (модель) системы «сооружение - основание» при конкретно заданном на нее воздействии и при заданных характеристиках материала сооружения и грунта основания. В расчетной модели учитываются и стадии возведения сооружения и различные условия его эксплуатации.

При составлении расчетной модели определяющим является выбор метода расчета и возможность его численной реализации при учете различных факторов, интересующих расчетчика.

Как известно, в настоящее время основным методом решения задач по определению НДС промышленных и гражданских сооружений является численный метод решения системы уравнений прикладной механики для твердых линейно и нелинейно деформируемых тел, известный как *Метод конечных элементов*.

В практике проектирования строительных сооружений этот метод определения их НДС от различных воздействий реализуется с помощью программно-вычислительных комплексов.

Современные вычислительные программы отличаются друг от друга интерфейсом и возможностями решения конкретных задач, например, создание нелинейной модели грунтового основания, учета последовательности возведения сооружения и т.д.

Выбор вычислительного комплекса для построения расчетной модели и для решения заданной задачи определился следующими факторами:

1. Сложной пространственной конструкцией рассматриваемого железобетонного варианта водослива Майнской ГЭС (см. рис.1), требующей разбиения на большое число объемных конечных элементов различных размеров.

2. Исходя из требований к расчетной схеме:

- материал сооружения задать линейно-деформируемым;
- грунты представить как нелинейные материалы при использовании модели Кулона-Мора.

3. Результаты расчетов должны быть получены с учетом последовательности возведения сооружения:

- сначала требовалось определить НДС грунта в естественном (природном) состоянии (без бетонной конструкции и гидростатической нагрузки);
- затем требовалось рассмотреть загрузку водослива собственным весом бетона и гидростатической нагрузкой в двух вариантах: при давлении воды на отметках НПУ и ФПУ.

Напряжения в грунте, полученные в первой стадии загрузки, требовалось просуммировать с напряжениями, полученными во второй стадии загрузок (перемещения суммировать не требовалось).

Для выполнения кафедрой поставленной задачи был выбран программный комплекс SOFiSTiK, который позволял составить расчетную модель системы «сооружение+основание» в соответствии с поставленными условиями и выполнить требуемый расчет.

На основании конструкции, изображенной в программе AutoCAD (рис. 1), в SOFiSTiK была создана расчетная схема, в которой сооружение и грунтовое основание представлены в виде восьмиузловых конечных элементов с различными жесткостными характеристиками. Большие размеры сооружения, состоящего из повторяющихся фрагментов-секций, позволили рассматривать в качестве расчетной модели один фрагмент шириной 20м (рис. 2).

Анализ результатов расчетов, выполненных с учетом всех вышеперечисленных требований, позволил сделать следующие выводы:

1. Определены напряжения и перемещения в конструктивных элементах сооружения. Максимальные значения напряжений не превысили допустимых (рис.3).

2. Определены напряжения и перемещения грунтового основания с учетом всех стадий возведения. Максимальные значения напряжений не превысили допустимых (рис. 4).

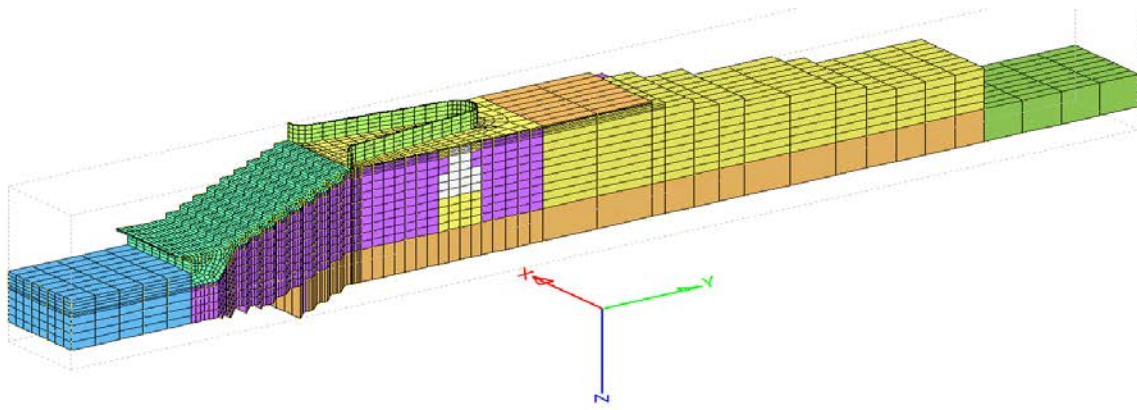


Рис. 2. Расчетная модель в виде выделенной части водослива, шириной 20 м

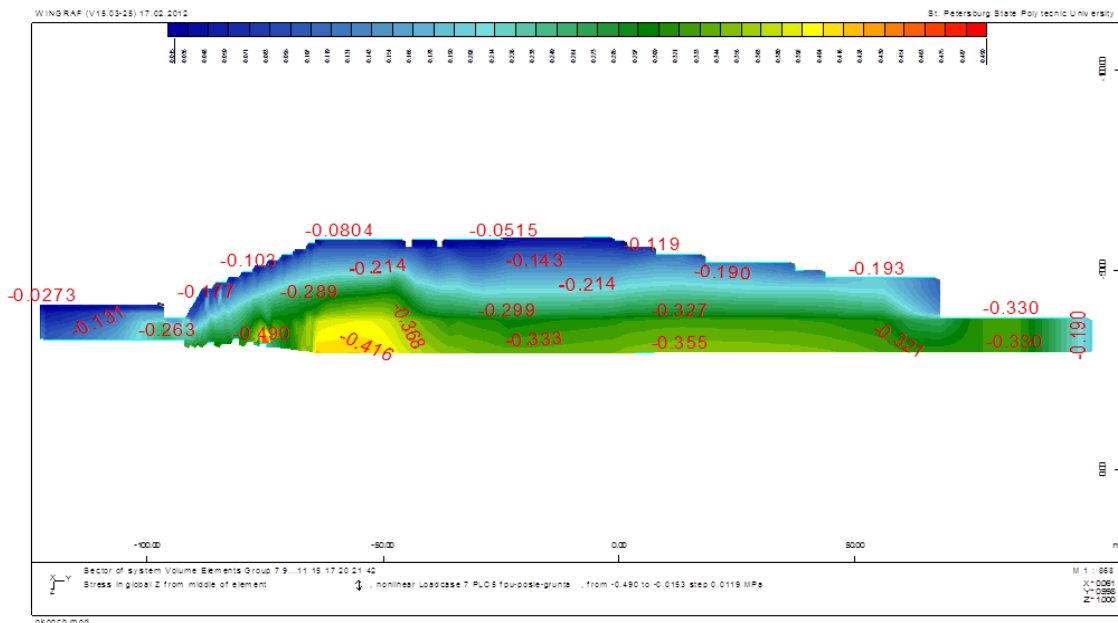


Рис. 3. Главные напряжения в объемных элементах сооружения (МПа)

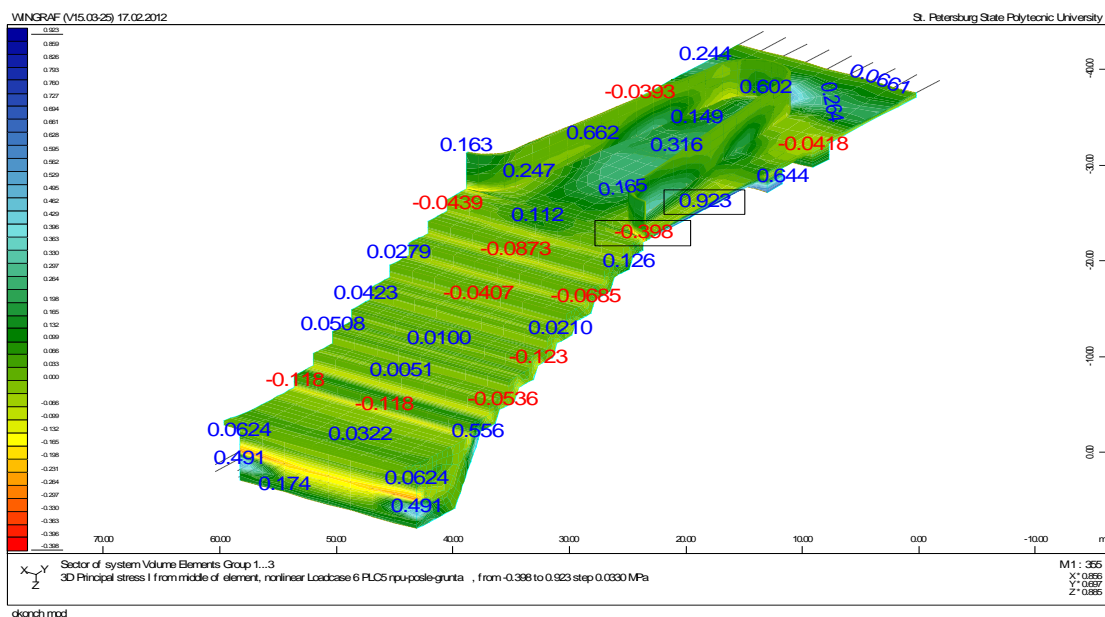


Рис. 4. Вертикальные напряжения в грунте при ФПУ (Мпа)

## 4. Выводы

1. Рассмотренный вариант водосброса удовлетворяет требованиям по прочности и устойчивости.
2. В рассмотренном варианте водосброса нагрузка, передаваемая на грунт, не превышает допустимых значений.
3. Вычислительный комплекс SOFiSTiK позволяет успешно выполнять расчеты сооружений с учетом их совместной работы с грунтовым основанием.

### Литература

1. СНиП II-54-77. Плотины бетонные и железобетонные.
2. Пособие по методике обработки данных натурных исследований бетонных гидросооружений. Л.: «Энергия», 1975. 149 с.
3. Fanelli V., Giuseppetti G., Riccioni R. Experience gained during control of static behavior of some large Italian dams // 13-th Congr. on large dams. New Dehli, 1998. № 9. 24 p.
4. Theory on Arch Dams // Pergamon Press. 1965. 558p.
5. Treatise on Dams // Chapter 10. Arch Dams. US Dept. Interior / Bureau of Reclamation. Denver Col. 1948. 557 p.
6. Bulletin on Dam Safety Management. Dam Safety Committee. International Commission on Large Dams (ICOLD). 2010. Pp. 1-9.
7. Шахмаева Е. Ю. База данных для задач контроля и диагностики крупных ГТС. – Гидротехническое строительство, 1998. № 9. С. 48-51.
8. Ф1.22. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений. – Собрание законодательства Российской Федерации. 1997. №30. Ст.3589.
9. Фрадкин Б. В. Исследования совместной статической работы арочно-гравитационной плотины и основания // Энергетическое строительство, 1977. №6. С.127-133.
10. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. РД 153-34.2-21.342-00.
11. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М., «Мир», 1975. 571 с.
12. Загрядский И. И. Гидротехнические сооружения. Контроль и обработка наблюдений. С-Пб.: СПбГТУ, 1999. 62 с.
13. Александров Ю. Н. Разработка математической модели для оценки напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений СШГЭС // Вестник Красноярской архитектурно-строительной академии. Красноярск: КрасГАСА, 2003. №6. С. 16-27.
14. Александров Ю. Н. Расчетные исследования поведения плотины Саяно-Шушенской ГЭС в годовом цикле изменения нагрузок. // Гидротехническое строительство. М.: Энергопрогресс, 2006. №6. С. 9-12.
15. Александров Ю. Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования ее состояния // Гидротехническое строительство. 2008. №11. С. 64 – 69.
16. Гордон Л. А., Френкель А. С. Диагностика бетонных плотин по данным натурных измерений относительных осадок // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 1989. № 214. С. 44-49.
17. Новожилов В. В. Теория упругости. Л: Судпромгиз, 1958. 370 с.
18. Дурчева В. Н., Пучкова С. М., Загрядский И. И. Учет сезонных изменений схемы работы бетонных плотин при анализе данных натурных измерений // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 2000. №237. С. 45-53.
19. Ефименко А. И., Рубинштейн Г. Л. Водосбросные сооружения Саяно-Шушенской ГЭС. Изд. ОАО ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева, 2008, 509 с.
20. Напряженно-деформированное состояние плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом последовательности возведения, омоноличивания швов при ее возведении и поэтапном наполнении водохранилища / Антонов С. С., Вульфович Н. А., Зайцев В. Н., Леонтьев Б. Н., Сулопаров В. А., Фрид С. А. // Решение проблем Саяно-Шушенского гидроэнергетического комплекса. Материалы научно-технической конференции. Л.: Энергоатомиздат, 1987. С.102-110.
21. Александровская Э. К., Урахчин В. П. Анализ горизонтальных перемещений гребня Красноярской плотины по данным натурных наблюдений. Известия ВНИИГ, 1972. С. 270-279.

22. Dantzig G. B., Infanger G. Intelligent control and optimization under uncertainty with application to hydro power // European journal of operational research. 1997. Vol. 97. No. 2. Pp. 396-407.
23. Bardsley W. E., Choudhry S. An approach to estimating hydro power system income gain from computerized water scheduling // Natural resources research. 2000. Vol. 9. No. 3. Pp. 215-222.

## References

1. SNiP II-54-77. *Plotiny betonnye i zhelezobetonnye*. (rus)
2. *Posobie po metodike obrabotki dannykh naturnykh issledovaniy betonnykh gidrosooruzhenij*. L.: «Energija», 1975, 149 s. (rus)
3. Fanelli V., Giuseppetti G., Riccioni R. Experience gained during control of static behavior of some large Italian dams // 13-th Congr. on large dams. New Delhi, 1998. № 9. 24 p.
4. *Theory on Arch Dams* // Pergamon Press. 1965. 558p.
5. *Treatise on Dams* // Chapter 10. Arch Dams. US Dept. Interior / Bureau of Reclamation. Denver Col. 1948. 557 p.
6. *Bulletin on Dam Safety Management*. Dam Safety Committee. International Commission on Large Dams (ICOLD). 2010. Pp. 1-9.
7. Шахмаева Е. Ю. База данных для задач контроля и диагностики крупных ГТС. – Гидротехническое строительство, 1998. № 9. С. 48-51. (rus)
8. F1.22. *Federal'nyj zakon «O bezopasnosti gidrotexnicheskix sooruzhenij*. – *Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federacii*. 1997. №30. St.3589. (rus)
9. *Fradkin B. V. Issledovaniya sovmestnoj staticheskoy raboty arochno-gravitacionnoj plotiny i osnovaniya* // *E'nergeticheskoe stroitel'stvo*, 1977. №6. S.127-133. (rus)
10. *Metodika opredeleniya kriteriev bezopasnosti gidrotexnicheskix sooruzhenij*. RD 153-34.2-21.342-00. (rus)
11. *Zenkevich O. Metod konechnyx e'lementov v tekhnike*. M., «Mir», 1975. 571 s. (rus)
12. *Zagryadskij I. I. Gidrotexnicheskie sooruzheniya. Kontrol' i obrabotka nablyudenij*. S-Pb.: SPbGTU, 1999. 62 s. (rus)
13. *Aleksandrov Yu. N. Razrabotka matematicheskoy modeli dlya ocenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gidrotexnicheskix sooruzhenij SShGE'S* // *Vestnik Krasnoyarskoj arhitekturno-stroitel'noj akademii. Krasnoyarsk: KrasGASA, 2003. №6. S. 16-27*. (rus)
14. *Aleksandrov Yu. N. Raschetnye issledovaniya povedeniya plotiny Sayano-Shushenskoj GE'S v godovom cikle izmeneniya nagruzok* // *Power technology and engineering*. 2006. No. 6. Pp. 9-12. (rus)
15. *Aleksandrov Yu. N. Ispol'zovanie raschetnoj modeli plotiny Sayano-Shushenskoj GE'S dlya ocenki i prognozirovaniya ee sostoyaniya* // *Power technology and engineering*. 2008. No. 11. Pp. 64 – 69. (rus)
16. *Gordon L. A., Frenkel' A. S. Diagnostika betonnykh plotin po dannykh naturnykh izmerenij otnositel'nykh osadok* // *Izvestiya VNIIG im. B.E.Vedeneeva*. 1989. № 214. S. 44-49. (rus)
17. *Novozhilov V. V. Teoriya uprugosti*. L.: Sudpromgiz, 1958. 370 s. (rus)
18. *Durcheva V. N., Puchkova S. M., Zagryadskij I. I. Uchet sezonnykh izmenenij sxemy raboty betonnykh plotin pri analize dannykh naturnykh izmerenij* // *Izvestiya VNIIG im. B.E.Vedeneeva*. 2000. №237. S. 45-53. (rus)
19. *Efimenko A. I., Rubinshtejn G. L. Vodobrosnye sooruzheniya Sayano-Shushenskoj GE'S*. Izd. OAO VNIIG im.B.E.Vedeneeva, 2008. 509 s. (rus)
20. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie plotiny Sayano-Shushenskoj GE'S s uchetom posledovatel'nosti vozvedeniya, omonolichivaniya shvov pri ee vozvedenii i poe'tapnom napolnenii vodoxranilishha* / *Antonov S. S., Vul'fovich N. A., Zajcev V. N., Leont'ev B. N., Susloparov V. A., Frid S. A. // Reshenie problem Sayano-Shushenskogo gidroe'nergeticheskogo kompleksa. Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. L.: E'nergoatomizdat, 1987. S.102-110. (rus)
21. *Aleksandrovskaya E. K., Uraxchin V. P. Analiz gorizontal'nykh peremeshhenij grebnya Krasnoyarskoj plotiny po dannykh naturnykh nablyudenij*. *Izvestiya VNIIG*, 1972. S. 270-279. (rus)
22. Dantzig G. B., Infanger G. Intelligent control and optimization under uncertainty with application to hydro power // European journal of operational research. 1997. Vol. 97. No. 2. Pp. 396-407.
23. Bardsley W. E., Choudhry S. An approach to estimating hydro power system income gain from computerized water scheduling // Natural resources research. 2000. Vol. 9. No. 3. Pp. 215-222.