

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-6-465-471
УДК 502/504:627.8

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Программная часть, фундаментальная и организационная структура программно-аппаратного комплекса для обеспечения безопасности возводимых гидротехнических и гидроэнергетических сооружений

А.С. Антонов

Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука»), Российская Федерация, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, д. 2
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26
Antonov.An.S@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 2 сентября 2020 г.
Доработана: 20 ноября 2020 г.
Принята к публикации: 24 ноября 2020 г.

Аннотация

Актуальность. Для обеспечения безопасности гидротехнических и гидроэнергетических сооружений требуется организовать постоянный контроль за их состоянием, в том числе произвести установку дополнительной контрольно-измерительной аппаратуры. Также необходимо внедрить современные информационно-диагностические системы, позволяющие в режиме реального времени осуществлять оценку состояния как отдельных элементов сооружения, так и взаимовлияющих конструкций и комплексов сооружений. При этом результаты, представленные в статье направлены на описание фундаментальной структуры построения информационно-диагностической системы нового поколения, разрабатываемой в рамках программно-аппаратного комплекса. **Цели.** Основной целью предлагаемого программно-аппаратного комплекса является повышение уровня безопасности гидротехнических и гидроэнергетических сооружений, оказывающих влияние друг на друга в процессе строительства и эксплуатации. Решаются задачи создания единой платформы для оценки безопасного состояния гидротехнических и гидроэнергетических сооружений в процессе их строительства и эксплуатации, закладываются основы единой унифицированной информационно-диагностической системы на модульной основе, позволяющей проводить сравнение показаний контрольно-измерительной аппаратуры, статистических показателей и расчетных значений, полученных в рамках математического моделирования объектов. **Методы.** В работе представлена структура взаимодействия отдельных блоков, входящих в программно-аппаратный комплекс, его взаимодействие с пользователем для организации принятия решений при эксплуатации гидротехнических и гидроэнергетических сооружений. **Результаты.** Реализована модульная оболочка, состоящая из объединенной информационно-диагностической системы, экспертного и расчетного модулей, позволяющая комплексно подходить к вопросу безопасности взаимовлияющих гидротехнических и гидроэнергетических сооружений. Разработаны программные связи для оценки изменения параметров, которые могут привести к отклонениям/нарушениям в работе гидротехнических и гидроэнергетических сооружений.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, основания, программно-аппаратный комплекс, мониторинг, прогнозирование безопасности, математические модели, конечно-элементные модели, информационно-диагностическая система

Для цитирования

Антонов А.С. Программная часть, фундаментальная и организационная структура программно-аппаратного комплекса для обеспечения безопасности возводимых гидротехнических и гидроэнергетических сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 6. С. 465–471. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-465-471>

Антонов Антон Сергеевич, главный инженер по оборудованию и гидротехническим сооружениям, директор аналитического центра безопасности оборудования и ГТС НИИЭС (филиал АО «Институт Гидропроект»), старший преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ, кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 7374-6867, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8310-9604>

© Антонов А.С., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

The software part, the fundamental and organizational structure of the software and hardware complex to ensure the safety of hydraulic and hydropower structures under the construction

Anton S. Antonov

Research Institute of Energy Structures (branch of the JSC “Design, survey and research institute “Hydroproject” named after S.Ya. Zhuk”, 2 Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125080, Russian Federation

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation
Antonov.An.S@yandex.ru

Article history

Received: September 2, 2020

Revised: November 20, 2020

Accepted: November 24, 2020

Abstract

Relevance. To ensure the safety of hydraulic and hydropower facilities, to organize constant monitoring of their condition, including the installation of additional control and measuring equipment is required. It is also necessary to introduce modern information and diagnostic systems that allow in real time to assess the state of both individual elements of the structure, as well as mutually influencing structures and complexes of structures. At the same time, the results presented in the article are aimed for describing the fundamental structure a new generation of information and diagnostic system building, developed within the framework of a software and hardware complex. **The aims of the work.** The main purpose of the proposed system is to increase the level of monitoring to ensure the safety of hydraulic structures, which have a possible impact on each other during operation and construction. The tasks of creating a unified platform for assessing the safe state of hydraulic structures during the construction and operation of hydraulic structures (hydroelectric and pumped-storage power plants) are being solved, the foundations of a unified information-diagnostic system on a modular basis are laid, which allows comparing monitoring and measuring equipment readings, statistical samples and calculated values obtained within the mathematical modeling objects. **Methods.** The paper presents the structure of the interaction of individual blocks included in the information-diagnostic system, the interaction of the information-diagnostic system with the user for decision-making during the operation of the hydraulic structures. **Results.** A modular shell has been implemented, consisting of a combined information-diagnostic system, expert and calculation modules, which allows a comprehensive approach to the issue of safety of mutually affecting hydraulic structures. Software links have been developed to assess the change in parameters that can lead to deviations/irregularities in the operation of the hydraulic structures.

Keywords: hydraulic structures, foundations, hardware-software complex, information-diagnostic system, monitoring, safety forecasting, mathematical models, finite element models, information and diagnostic system

For citation

Antonov A.S. The software part, the fundamental and organizational structure of the software and hardware complex to ensure the safety of hydraulic and hydropower structures under the construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(6):465–471. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-465-471>

1. Введение

В настоящее время повышенное внимание уделяется обеспечению безопасности гидротехнических сооружений (ГТС), в том числе в рамках требований Федерального закона № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений». В этих целях осуществляется постоянный контроль за состоянием гидротехнических сооружений, в первую очередь на основе контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Для получения и обработки результатов измерений контролируемых величин с помощью установленной в сооружениях КИА внедряются различные информационно-диагностические системы. Данная работа является продолжением исследований, представленных в [1–4], и описывает построение программной части программно-аппаратного комплекса (ПАК) на примере Загорских ГАЭС [5; 6].

2. Методы

Разработка программной части программно-аппаратного комплекса проводится на основе методов программирования. В рамках расчетного модуля, входящего в ПАК, разрабатываются пространственные конечно-элементные модели, на основе которых определяется напряженно-деформированное состояние

Anton S. Antonov, chief engineer for equipment and hydraulic structures, director of the Analytical Center of Equipment and Hydraulic Structures Safety of RIES (branch of JSC “Hydroproject”), senior lecturer of the Department of Hydraulics and Hydrotechnical Engineering of NRU MGSU, Candidate of Technical Sciences; eLIBRARY SPIN-code: 7374-6867, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8310-9604>

ГТС (ГЭС/ГАЭС) и их оснований. В указанных конечно-элементных моделях воспроизводятся конструктивные особенности ГТС, включая межблочные строительные швы, присущие гидротехническому железобетону; основание сооружений и грунтовые засыпки за стенами сооружений. Также в конечно-элементных моделях воспроизводится этапность возведения сооружений, укладки грунтов в обратные засыпки за стенами ГТС.

Данные обследований состояния ГТС, передаваемые в информационно-диагностическую систему, получены на основе визуальных и инструментальных методов.

3. Результаты

ПАК представляет собой модульную оболочку, состоящую в базовом режиме работы из трех компонентов: объединенной информационно-диагностической системы (ИДС), расчетного (РМ) и экспертного (ЭМ) модулей.

Объединенная ИДС осуществляет мониторинг и диагностику состояния ГТС. Для наблюдений действующей законодательной базы на ГТС установлены диагностические информационные системы, функционирующие независимо друг от друга. При этом изменение режима эксплуатации одной из станций оказывает существенное влияние на другую, в связи с этим возникла необходимость разработки единой системы, позволяющей проводить комплексный анализ состояния Загорской ГАЭС и Загорской ГАЭС – 2 с учетом их взаимного влияния.

Разработанная система базируется на web-сервере, интегрирующем информацию по двум станциям. Информация по показаниям КИА представляется в виде WebUI с возможностью скачивания в текстовых и табличных форматах, при этом возможна отправка push-уведомлений о происшествиях.

ИДС выполняет следующие функции: сбор и обработку данных мониторинга, представление данных пользователям, передача контролируемых показателей и факторов экспертному модулю.

Расчетный модуль состоит из единых и локальных пространственных математических моделей: геотриационной (ГФМ), геомеханической (ГММ) и НДС. Все модели, совместно с многовариантными калибровочными и прогнозными расчетами, хранятся в РМ в формате данных, который позволяет обращаться к ним в режиме реального времени; описание элементов расчетного модуля подробно разбиралось в [1]. Для работы с математическими моделями широко применяются современные вычислительные комплексы, такие как Modflow, Midas GTS, Ansys, примеры использования которых приведены в [7–12]. При разработке конечно-элементных моделей сооружений Загорских ГАЭС учитывался опыт моделирования ГТС [13–16].

При необходимости доработки моделей или при проведении дополнительных расчетных исследований изменения в расчетных моделях проводятся интерактивно в среде разработки каждой из них. В связи с разной конечно-элементной аппроксимацией, подбираемой исходя из баланса скорости расчетов и необходимой точности, математические модели не связаны между собой единой сеткой конечных элементов, обмен информацией происходит при помощи скриптов управления, передающих полученные решения из ГФМ в ГММ, а из ГММ в модель НДС в виде граничных условий.

Расчетные сценарии моделирования выполнялись поэтапно, после каждого цикла расчетов результаты направлялись в следующий как граничные условия, кроме того, предавались в архив ПАК и экспертный модуль, что позволяет получить набор исходной информации для автоматизированного определения возможных опасностей.

Экспертный модуль – блок, осуществляющий оценку состояния ГТС на основании сравнения натуральных данных, поступающих в ИДС, и результатов, полученных по расчетным сценариям на математических моделях. При этом экспертный модуль может быть полностью интегрирован в расчетный модуль для оптимизации исходного кода и ускорения процессов оценки состояния ГТС.

ЭМ при функционировании отдельным блоком ПАК в автоматизированном режиме выполняет следующие задачи: получение данных от объединенной ИДС, ведение баз знаний по сценариям/расчетным случаям и опасностям, оценку отклонений контролируемых показателей от расчетных значений, идентификацию возможных опасностей, заложенных экспертным путем, оповещение пользователей ПАК о выявленных опасностях путем рассылки push-уведомлений;

Кроме базовых блоков используется *модуль «Архив»*, основной целью которого является сбор исходной информации по выполненным исследованиям. Результаты научно исследовательских, изыскательских и ремонтных работ системно оцениваются и интегрируются в общую базу данных системы ПАК. Данный подход позволяет учитывать в разрабатываемых сценариях моделирования фактическое состояние сооружений и сравнивать показания объединенных ИДС с актуальными данными, полученными из проводимых исследований.

Описание взаимодействия ПАК с другими системами. Отличительной чертой ПАК является гибкая структура интеграции с ИДС объектов, взаимодействие с которыми происходит по протоколам асинхронной репликации баз данных и файловых хранилищ, по заданному расписанию. Репликация распространяется в направлении от стационарной ИДС к ПАК.

Часть инструментария, обеспечивающего обмен информацией, представлена следующими средствами:

- 1) применение универсального http-протокола;
- 2) использование открытых форматов данных (txt, csv, xls, xlsx, xml) для передачи информации от удаленных систем;
- 3) применение скриптовых механизмов обработки и передачи данных в ПАК и между ПАК и внешней средой.

Модульная архитектура ПАК представлена на рисунке. Она позволяет разделить функционал каждого элемента и организовать эффективное управление системой. Модернизация ПАК осуществляется подключением дополнительных модулей без переработки программы, что позволяет комплектовать систему не только предлагаемыми блоками, но и вносить разрабатываемые элементы, необходимые конкретному объекту.



Рис. Модульная структура ПАК со схемой реализации процессов

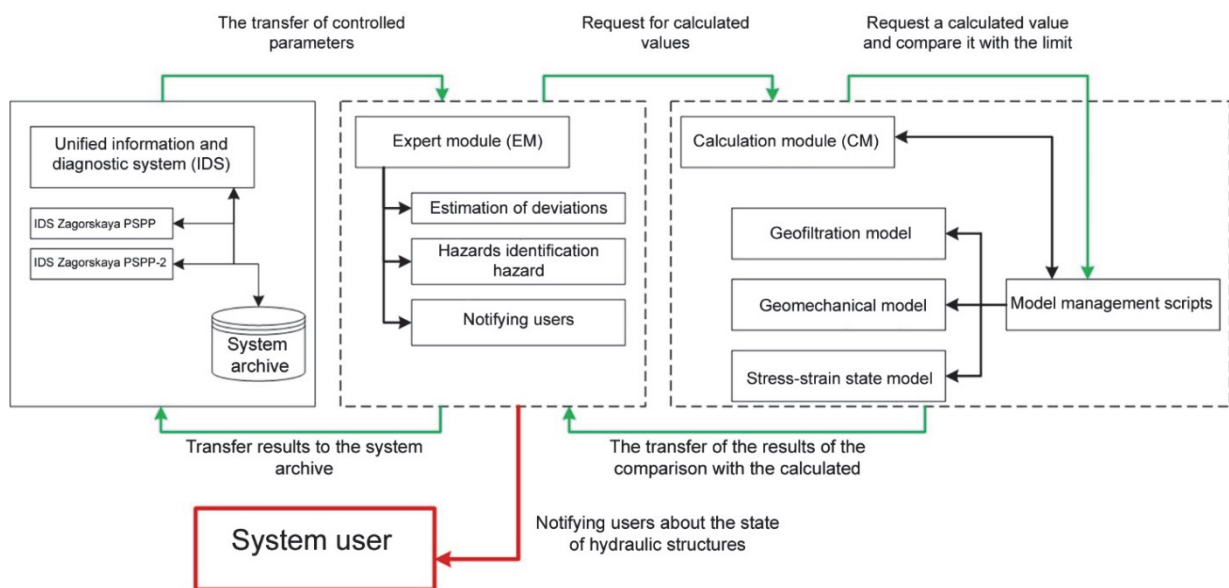


Figure. Modular structure of a hardware and software complex with a process implementation scheme

Обмен информацией между модулями осуществляется с помощью интеграционного программного обеспечения ПАК и скриптов управления. По желанию пользователей реализованы два алгоритма передачи информации:

1) внутренний – взаимосвязь пользователей и модулей осуществляется по внутренним каналам внутри сервера ПАК без выхода в интернет;

2) внешний – взаимосвязь проходит по защищенному соединению через глобальную сеть.

Клиентский запуск ПАК для авторизованных пользователей возможен через web-протокол с любого рабочего ПК. Требования к ПК зависят от глубины визуализации предоставления результатов расчетного модуля.

Укрупненно алгоритм функционирования ПАК можно представить следующим образом:

1) работа с данными ИДС – в автоматизированном режиме или по желанию пользователя происходит репликация данных мониторинга ИДС в архив ПАК;

2) импорт данных из архива ПАК в экспертный модуль – скриптовая передача необходимой и структурированной информации из архива ПАК в экспертный модуль;

3) запрос экспертным модулем расчетных значений РМ и их сравнение с текущими показаниями ИДС;

4) инициация расчетным модулем скриптовых подпрограмм для поиска оптимального совпадения, формирование пула данных по расчетным сценариям;

5) направление пула данных в экспертный модуль для предварительной идентификации факторов, которые могут привести к изменению параметров;

6) определение «коридора» допустимого изменения значений для контролируемых параметров;

7) оценка величин выхода значений из допустимого коридора;

8) выдача оператору аналитической информации в случае нахождения в «коридоре», экстренное оповещение пользователей ПАК в случае выхода контролируемых параметров из допустимых значений (при этом в состав оповещения входит краткое описание опасности и ссылка на соответствующий набор выходных документов);

9) передача данных в архив ПАК для дальнейшего использования при оценке состояния ГТС.

В общем виде информационные связи взаимодействия ПАК можно описать как:

1) получение данных мониторинга от объединенной ИДС – результаты мониторинга накапливаются в архиве ПАК; ЭМ получает их в автоматическом режиме не реже одного раза в сутки через WebUI, используя интегрированное в ПАК программное обеспечение;

2) вывод информации из РМ для формирования базы данных результатов расчетов – осуществляется при проведении расчетных исследований на этапе разработки системы, для обмена информацией используется WebUI, результаты сохраняются в архиве ПАК и передаются в ЭМ;

3) представление информации через WebUI в виде документов и информации – web-сервер ПАК предоставляет пользователю для просмотра и анализа:

– технические документы о сценариях/расчетных случаях;

– отклонения контролируемых показателей от расчетных значений;

– экспертные заключения о выявленных опасностях;

– ретроспективные натурные данные из объединенной ИДС.

4) оповещение пользователей о выявленных опасностях – в случае выявления опасной ситуации всем пользователям направляются уведомления в виде e-mail сообщений, в которых находятся ссылки на описание предполагаемого сценария развития событий и натурные данные из объединенной ИДС;

5) при штатном режиме работы пользователям не менее одного раза в неделю направляется e-mail сообщение, подтверждающее нормальную эксплуатацию объекта.

При возникновении ситуации под названием «инцидент» проводятся следующие операции:

– фиксация ПАК нештатной ситуации – отклонений/нарушений в работе ГТС, превышение по диагностическим показателям критериальных значений;

– формирование в ПАК первичного отчета о состоянии ГТС и его передача в адрес заказчика и экспертных организаций, которыми могут являться аналитический центр, генеральный проектировщик, экспертные центры и др.;

– обработка экспертами полученных данных, разработка рекомендаций по выявлению и устранению обнаруженного инцидента;

– принятие решения владельцем ГТС о необходимости и составе воздействий на основании данных ПАК и экспертного заключения.

4. Заключение

В результате работ над ПАК реализована модульная оболочка, состоящая из объединенной ИДС, экспертного и расчетного модулей, позволяющая комплексно подходить к вопросу безопасности взаимовлияющих ГТС.

Разработана структура внутренних взаимосвязей модулей и алгоритмы принятия решений при различных натуральных показаниях контрольно-измерительной аппаратуры. Заложены программные связи, позволяющие оценить изменение параметров, которые могут привести к отклонениям/нарушениям в работе ГТС.

Описана и разработана схема принятия решений при возникновении инцидентов, которая позволяет при помощи ПАК оперативно планировать и реализовывать воздействия для обеспечения надежности ГТС.

Список литературы

1. Рубин О.Д., Антонов А.С., Беллендир Е.Н., Кобочкина Е.М., Котлов О.Н. Разработка расчетного модуля программно-аппаратного комплекса для обеспечения безопасности взаимовлияющих ГТС // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 2. С. 96–105. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-96-105>
2. Луначи М.Э., Шполянский Ю.Б., Соболев В.Ю., Беллендир Е.Н., Белостоцкий А.М., Лисичкин С.Е., Бершов А.В. Концепция построения архитектуры программно-аппаратного комплекса для мониторинга состояния гидротехнических сооружений // *Гидротехническое строительство*. 2016. № 5. С. 2–6.
3. Рубин О.Д., Соболев В.Ю. Техническая реализация программно-аппаратного комплекса для мониторинга состояния и прогнозирования безопасности гидротехнических сооружений и их оснований // *Природообустройство*. 2017. № 1. С. 41–46.
4. Aniskin N., Antonov A. Spatial seepage mathematical model of earth-fill dam in complicated topographic and engineering-geological conditions // *Materials Science and Engineering*. 2018. № 365. Pp. 1–7.
5. Серебрянников Н.И., Родионов В.Г., Кулешов А.П., Магрук В.И., Иванущенко В.С. Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС. М.: НЦ ЭНАС, 2000. 355 с.
6. Синюгин В.Ю., Магрук В.И., Родионов В.Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике. М.: НЦ ЭНАС, 2008. 352 с.
7. Rak G., Bombac M. Hydraulic analysis of the construction pit of HPP Brežice (Slovenia) and its effect on the run-off regime // *HYDRO (Bordeaux, France)*. 2015. Corpus ID: 140110869.
8. Wang G., Wang Y., Lu W., Yu M., Wang C. Deterministic 3D seismic damage analysis of Guandi concrete gravity dam: a case study // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 148. Pp. 263–276.
9. Rakić D., Živković M., Vulović S., Divac D., Slavković R., Milivojević N. Embankment dam stability analysis using FEM // 3rd South-East European Conference on Computational Mechanics: an ECCOMAS and IACM Special Interest Conference. 2013. Pp. 1–12.
10. Hao Gu, Zhongru Wu, Xiaofei Huang, Jintao Song. Zoning Modulus Inversion Method for Concrete Dams Based on Chaos Genetic Optimization Algorithm // *Mathematical Problems in Engineering*. 2015. Pp. 1–9.
11. Buffia G., Manciola P., De Lorenzis L., Cavalagli N., Comodini F. Calibration of finite element models of concrete arch-gravity dams using dynamical measures: the case of Ridracoli // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 199. Pp. 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.169>
12. Zeinizadeh A., Mirzabozorg H., Noorzad A., Amirpoura A. Hydrodynamic pressures in contraction joints including waterstops on seismic response of high arch dams // *Structures*. 2018. Vol. 14. Pp. 1–14.
13. Рубин О.Д., Ильин Ю.А., Лисичкин С.Е., Нефедов А.В., Розанова Н.В., Черненко В.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности железобетонных конструкций компенсационных секций напорных водоводов Загорской ГАЭС // *Гидротехническое строительство*. 2001. № 9. С. 16–19.
14. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Нефедов А.В., Серая О.З., Чуприна Я.Н. Разработка «Схема рационального армирования фундаментной плиты водоприемника Загорской ГАЭС – 2» // *Гидротехническое строительство*. 2008. № 4. С. 12–16.
15. Рубин О.Д., Пономарев Д.И., Мельникова Н.И. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // *Природообустройство*. 2011. № 5. С. 51–55.
16. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Атабиев И.Ж., Мельникова Н.И. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // *Природообустройство*. 2012. № 2. С. 44–48.

References

1. Rubin O.D., Antonov A.S., Bellendir E.N., Kobochkina E.M., Kotlov O.N. Development of the design module of the software and hardware complex to ensure the safety of mutually influencing HPS. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(2):96–105. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-2-96-105>

2. Lunaci M.Eh., Shpolyanskij Yu.B., Sobolev V.Yu., Bellendir E.N., Belostockij A.M., Lisichkin S.E., Bershov A.V. Koncepciya postroeniya arhitektury programmno-apparatnogo kompleksa dlya monitoringa sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [The concept of building the architecture of a software and hardware complex for the state of hydraulic structures monitoring]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction]. 2016;(5):2–6. (In Russ.)
3. Rubin O.D., Sobolev V.Yu. Tekhnicheskaya realizaciya programmno-apparatnogo kompleksa dlya monitoringa sostoyaniya i prognozirovaniya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij i ih osnovanij. *Prirodoobustrojstvo*. 2017;(1): 41–46. (In Russ.)
4. Aniskin N., Antonov A. Spatial seepage mathematical model of earth-fill dam in complicated topographic and engineering-geological conditions. *Materials Science and Engineering*. 2018;(365):1–7.
5. Serebryannikov N.I., Rodionov V.G., Kuleshov A.P., Magruk V.I., Ivanushchenko V.S. *Gidroakkumuliruyushchiye elektrostantsii. Stroitel'stvo i ekspluatatsiya Zagorskoy GAES* [Pumped-storage power plants. Construction and operation of the Zagorskaya PSPP]. Moscow: NTS ENAS Publ.; 2000. (In Russ.)
6. Sinyugin V.Yu., Magruk V.I., Rodionov V.G. *Gidroakkumuliruyushchiye elektrostantsii v sovremennoy elektroenergetike* [Pumped-storage power plants in the modern electric power industry]. Moscow: NTS ENAS Publ.; 2008. (In Russ.)
7. Rak G., Bombac M. Hydraulic analysis of the construction pit of HPP Brežice (Slovenia) and its effect on the run-off regime. *HYDRO (Bordeaux, France)*. 2015. Corpus ID: 140110869.
8. Wang G., Wang Y., Lu W., Yu M., Wang C. Deterministic 3D seismic damage analysis of Guandi concrete gravity dam: a case study. *Engineering Structures*. 2017;148:263–276.
9. Rakić D., Živković M., Vulović S., Divac D., Slavković R., Milivojević N. Embankment dam stability analysis using FEM. *3rd South-East European Conference on Computational Mechanics: an ECCOMAS and IACM Special Interest Conference*. 2013:1–12.
10. Hao Gu, Zhongru Wu, Xiaofei Huang, Jintao Song. Zoning Modulus Inversion Method for Concrete Dams Based on Chaos Genetic Optimization Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*. 2015:1–9.
11. Buffia G., Manciola P., De Lorenzis L., Cavalagli N., Comodini F. Calibration of finite element models of concrete arch-gravity dams using dynamical measures: the case of Ridracoli. *Procedia Engineering*. 2017;199:110–115. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.169>
12. Zeinizadeh A., Mirzabozorg H., Noorzad A., Amirpoura A. Hydrodynamic pressures in contraction joints including waterstops on seismic response of high arch dams. *Structures*. 2018;14:1–14.
13. Rubin O.D., Ilin Yu.A., Lisichkin S.Ye., Nefedov A.V., Rozanova N.V., Chernenko V.N. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti zhelezobetonnykh konstruksiy kompensatsionnykh sektsiy napornykh vodovodov Zagorskoy GAES [Assessment of the stress-strain state and strength of reinforced concrete structures of compensating sections of pressure water conduits of the Zagorskaya PSPP]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction]. 2001;(9):16–19. (In Russ.)
14. Rubin O.D., Lisichkin S.Ye., Nefedov A.V., Seraya O.Z., Chuprina Ya.N. Razrabotka “Skhema ratsional'nogo armirovaniya fundamentnoy plity vodopriyemnika Zagorskoy GAES – 2” [Development of “Scheme of rational reinforcement of the foundation slab of the water intake of the Zagorskaya PSPP – 2”]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo* [Hydrotechnical construction]. 2008;(4):12–16. (In Russ.)
15. Rubin O.D., Ponomarev D.I., Melnikova N.I. Raschetnyye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya podpornykh sten pervogo yarusa vodopriyemnika Zagorskoy GAES [Computational studies of the stress-strain state of the retaining walls of the first tier of the water intake of the Zagorskaya PSPP]. *Prirodoobustrojstvo*. 2011;(5): 51–55. (In Russ.)
16. Rubin O.D., Lisichkin S.Ye., Atabiyev I.Zh., Melnikova N.I. Raschetnyye issledovaniya ustoychivosti i prochnosti podpornykh sten pervogo yarusa vodopriyemnika Zagorskoy GAES [Computational studies of the stability and strength of the retaining walls of the first tier of the water intake of the Zagorskaya PSPP]. *Prirodoobustrojstvo*. 2012;(2):44–48. (In Russ.)