

УДК 502/504:627.8

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-96-105

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Разработка расчетного модуля программно-аппаратного комплекса для обеспечения безопасности взаимовлияющих ГТС

О.Д. Рубин¹, А.С. Антонов^{1,4*}, Е.Н. Беллендир², Е.М. Кобочкина¹, О.Н. Котлов³

¹Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука»), Российская Федерация, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, 2

²АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука», Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 2

³АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», Российская Федерация, 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 21

⁴Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

*Antonov.An.S@yandex.ru

Поступила в редакцию: 01 февраля 2019 г.

Доработана: 18 марта 2019 г.

Принята к публикации: 26 марта 2019 г.

Ключевые слова:

гидротехнические сооружения;
ГТС;
основания;
мониторинг;
программно-аппаратный комплекс;
прогнозирование безопасности;
математические модели;
конечно-элементные модели;
информационно-диагностическая система;
расчетный модуль

Аннотация

Актуальность. В рамках реализации Федерального закона № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» необходимо осуществлять постоянный контроль состояния гидротехнических сооружений (ГТС) и взаимовлияющих сооружений посредством оснащения их контрольно-измерительной аппаратурой (КИА). Развитие современных вычислительных комплексов позволяет осуществлять и прогнозировать состояние сооружений, совмещая расчетные исследования и данные натурных наблюдений. Работа направлена на организацию комплексной оценки состояния ГТС и обеспечения безопасности существующих и проектируемых взаимовлияющих комплексов.

Цели. Повышение безопасности эксплуатируемого/строящегося комплекса взаимовлияющих ГТС. Оценка достаточности и качества специализированных инженерных и ремонтных работ, проводимых на ГТС. Разработка рекомендаций по повышению эффективности строительства новых и модернизации эксплуатируемых гидроэнергетических объектов. Создание единой платформы для проведения инженерных расчетов по взаимовлиянию ГТС на примере Загорских ГАЭС.

Методы. Представлена идеология взаимодействия различных программных комплексов математического моделирования. Использованы данные КИА для калибровки и верификации математических моделей.

Результаты. Актуализирована структура расчетного модуля программно-аппаратного комплекса (ПАК), проведена систематизация расчетных моделей, описано взаимодействие и передача исходных данных внутри расчетного модуля ПАК. Выполненные научные исследования направлены на повышение безопасности комплекса взаимовлияющих ГТС.

Введение

Данное исследование является новым этапом разработки программно-аппаратного комплек-

са (ПАК) для обеспечения безопасности взаимовлияющих ГТС (ГАЭС/ГАЭС) [1–3]. В связи с развитием информационных технологий и универсальных промышленных программно-вычислительных комплексов ABAQUS, ADINA, ANSYS, MARC, MSC/NASTRAN, COSMOS, LS-DYNA, MODFLOW появилась возможность оптимизировать алгоритм работы, предлагаемый на ранних этапах реализации ПАК, усовершенствовать методику передачи

© Рубин О.Д., Антонов А.С., Беллендир Е.Н., Кобочкина Е.М., Котлов О.Н., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

данных внутри ПАК при использовании механизма экспорта/импорта данных. Исходная информация для выполнения расчетных исследований передается из одного блока расчетного модуля в другой в автоматизированном режиме, что позволяет решать сложную многовариантную совместную задачу на каждом из этапов эксплуатации сооружения. Другой особенностью модернизации ПАК является возможность проведения комплексного анализа и получения экспертного заключения о состоянии ГТС (в перспективе любого энергетического объекта) при сравнении расчетных значений с данными натурных наблюдений и прогнозными расчетными зависимостями. Интеграция расчетного модуля, в который входит набор математических моделей, с информационно-диагностическими системами и экспертным модулем позволяет пользователю в онлайн-режиме определять состояние сооружений или его отдельных элементов. При дальнейшей реализации возможна интеграция с программными платформами, которые совместимы с концепцией управления жизненным циклом проекта (Project Lifecycle Management, PLM и др.), что предоставляет широкие возможности по развитию системы и постоянно действующих математических моделей, а также способствует повышению эффективности их использования [1–5].

1. Цели исследования

1. Повышение безопасности эксплуатируемого (строящегося) комплекса взаимовлияющих гидротехнических сооружений (ГТС).

2. Оценка достаточности и качества специализированных инженерных и ремонтных работ, проводимых на ГТС.

3. Разработка рекомендаций по повышению эффективности строительства новых и модернизации эксплуатируемых гидроэнергетических объектов.

4. Создание единой платформы для проведения инженерных расчетов по взаимовлиянию ГТС на примере Загорских ГАЭС.

В данной статье описывается принцип работы расчетного модуля (РМ) ПАК, при актуализированной и обновленной концепции в него входят общие и расчетные модели. Модели первого типа используются в качестве исходной информации для выполнения расчетных исследований:

- инженерно-геологическая модель (ИГМ);
- геометрическая модель сооружений (ГМ);
- геомеханическая модель (ГММ).

Второй тип – постоянно действующие математические модели, в основу которых заложены конечно-элементная аппроксимация, граничные условия, физико-механические характеристики и механизмы для решения системы дифференциальных уравнений численными методами:

- геофильтрационная модель (ГФМ);
- расчетная геомеханическая модель (РГММ);
- расчетная модель напряженно-деформированного состояния (МНДС).

Все модели совместно с многовариантными калибровочными и прогнозными расчетами хранятся в РМ в формате данных, который позволяет обращаться к ним в режиме реального времени. Общая схема работы модуля представлена на рис. 1.

Количество расчетных сценариев определяется для каждой математической модели на первоначальном этапе исходя из допущения о минимально необходимом количестве вариантов для корректной работы ПАК. По мере эксплуатации системы перечень сценариев дополняется по результатам натурных наблюдений либо по прогнозным значениям.

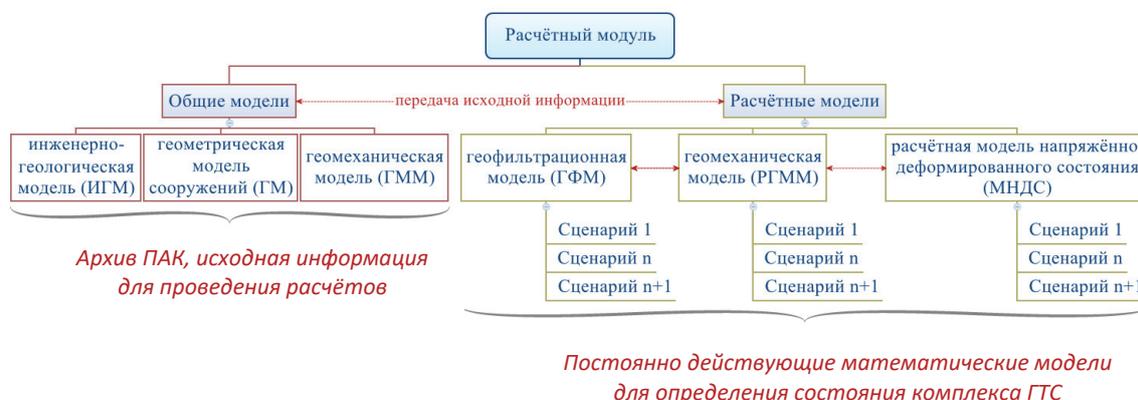


Рис. 1. Общая схема расчетного модуля программно-аппаратного комплекса (РМ ПАК)

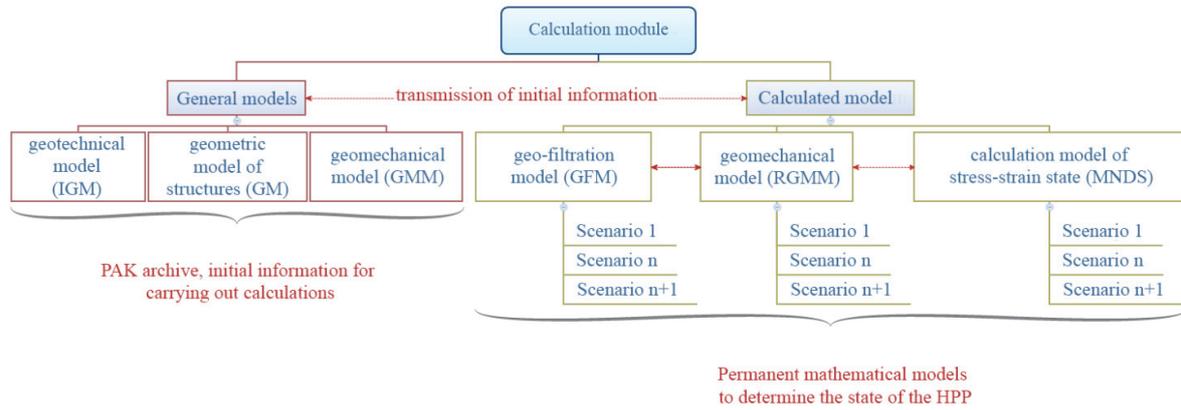


Figure 1. The general scheme of the calculation module of the software and hardware complex (RM PAK)

2. Инженерно-геологическая модель (ИГМ)

Представляет собой базу данных по инженерно-геологическим изысканиям в районе размещения ГЭС (ГЭС/ГАЭС) и используется в качестве исходных данных для последующего математи-

ческого моделирования поведения грунтов основания и НДС конструкций. ИГМ разбита на слои в соответствии с расчетными геологическими элементами, каждый из которых описывается отдельным слоем. Общий вид модели приведен на рис. 2.

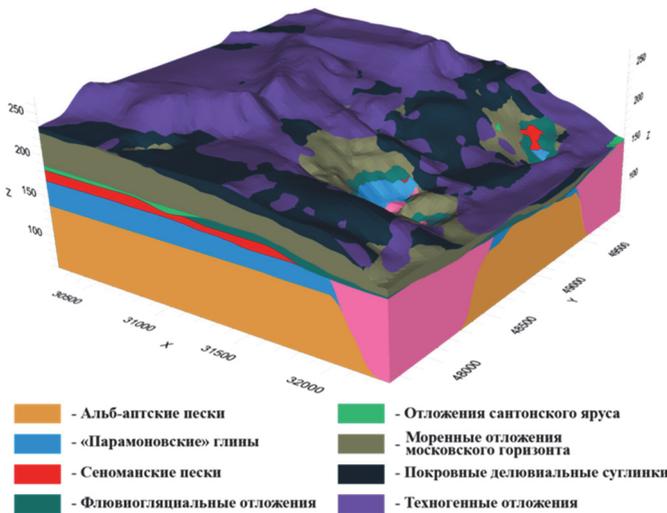


Рис. 2. Инженерно-геологическая модель ПАК (ИГМ ПАК)

Область построения модели – площадка расположения Загорских ГАЭС размером в плане 4,0 км², отметка основания – 50 м, максимальная глубина моделируемого грунтового массива – 200 м. ИГМ ПАК разрабатывалась по набору натурных исследований, выполненных в рамках реализации ПАК (инженерно-геологическое картирование, топографические съемки и др.), архивным и фондовым материалам, которые максимально полно описывают характеристики инженерно-геологических, структурно-тектонических и инженерно-геофизических условий площадки размещения Загорских ГАЭС. Классификация грунтов представляется

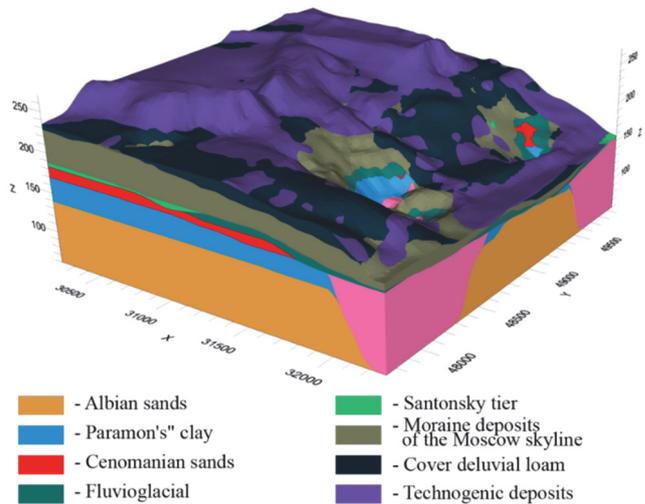


Figure 2. Engineering-geological model PAK (IGM PAK)

инженерно-геологическими элементами (ИГЭ), средой разработки модели являются AutoCAD, Ansys SpaceClaim, Visual MODFLOW Flex.

3. Геометрическая модель сооружений (ГМ)

В связи с глобальным развитием BIM технологий, их внедрением в работу проектных и научно-технических организаций необходима разработка пространственных математических моделей по требованиям заказчика. Сегодня пространственные модели используются не только для проектирования и расчетных исследований, но и для опреде-

ления точного расположения уже установленной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), положения вспомогательного и основного оборудования, определения геометрических параметров конструкций др. Поэтому требуется различная детализация предоставляемой информации в пространственных твердотельных математических моделях. В РМ ПАК реализована «плавающая» детализация, ориентированная на тип расчетных исследований, в которых применяется данная модель. К примеру, при расчетах НДС максимально точно предоставляются параметры железобетонных конструкций, при расчетах фильтрации либо грунтов основания модели упрощаются до массогабаритных макетов, позволяющих учесть осадку и смещения, но при этом не влияющих на продолжительность и качество исследований. Общий вид геометрической модели представлен на рис. 3.

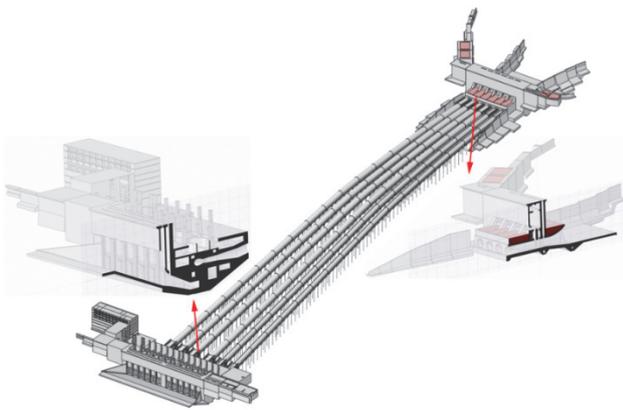


Рис. 3. Общий вид геометрической математической модели Загорской ГАЭС
[Figure 3. General view of the geometric mathematical model of the Zagorsk PSP]

Все ГМ имеют общие габаритные размеры и не расходятся между собой более чем на величину математической погрешности, воспринимаемой расчетными комплексами ПАК. Структура создания: простые формы получают из упрощения подробной геометрической модели. Обмен данных внутри расчетного модуля осуществляется в виде массива точек, трехмерной поверхности в формате Plaxis, AutoCad, SpaceClaim, Ansys либо набора геометрических примитивов.

4. Геомеханическая модель (ГММ)

Является связующим звеном между ИГМ, НДСМ и ГФМ, описывает упрощенную структуру расположения инженерно-геологических слоев в основании Загорских ГАЭС, которые передаются в расчетные блоки с необходимой детализацией.

Слои группируются по параметрам, необходимым для проведения расчетных исследований, таким как коэффициенты фильтрации, модуль деформации основания и др.

Область построения эквивалентна области ИГМ, импорт данных для дальнейших расчетов либо области построения для локальных расчетов может захватывать не всю зону Загорских ГАЭС, а только ее локальные части, такие как котлован здания станции, склон напорных водоводов, водоприемник и др. Общий вид локальной модели представлен на рис. 4. На рисунке приведена ГММ модель здания станции с котлованом, созданная при использовании «плавающей» детализации основных сооружений.

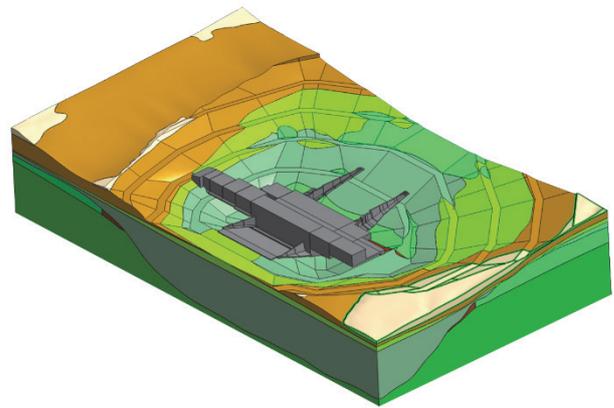


Рис. 4. Локальный фрагмент здания станции с котлованом – геомеханическая модель (ГММ ПАК)
[Figure 4. Local fragment of the station building with a pit – geomechanical model (GMM PAK)]

Данная модель и результаты могут быть экспортированы внутри расчетного модуля в любое используемое ПО (Visual MODFLOW Flex, Midas, Ansys, SpaceClaim, Plaxis и др.).

5. Геофильтрационная модель (ГФМ)

Разработана в современном программном комплексе Visual MODFLOW Flex с учетом предложений и рекомендаций ведущих авторов в области расчетов фильтрационного режима [4–7].

ГФМ является исходной моделью для проведения расчетных исследований, на основе которой выполняется прогноз фильтрационного режима основания Загорских ГАЭС при различных сценариях эксплуатации в пространственной постановке. На начальном этапе определено 12 сценариев моделирования фильтрационного режима, максимально охватывающих эксплуатационное состояние комплекса сооружений и позволяющих оценить взаимное влияние объектов, а также

определен набор параметров для назначения предельных значений показаний КИА. Результаты ГФМ ПАК передаются в расчетную геомеханическую модель (РГММ) и расчетную модель напряженно-деформированного состояния (МНДС) в качестве граничных условий.

Для проведения расчетных исследований в самой ГФМ применены граничные условия первого рода на узлах верхнего и нижнего водохранилищ, граничное условие второго рода назнача-

лось на дренажи в основании водоприемников и станционных узлов, включая вертикальные и горизонтальные элементы и дренажные завесы на южном и северном склонах. На границах расчетной области ГФМ применен частный вид граничного условия второго рода, имитирующего водонепроницаемую поверхность.

Общее строение модели с граничными условиями представлено на рис. 5, результаты на рис. 6 приведены для основного расчетного сочетания.

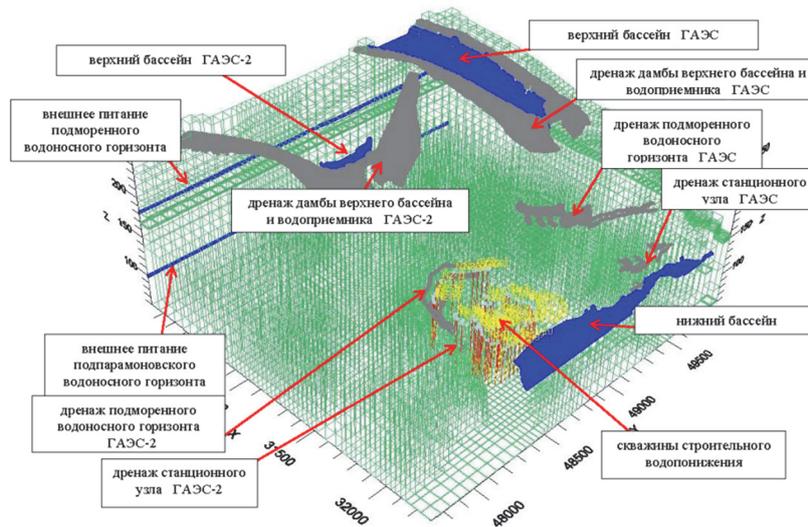


Рис. 5. Пространственная геофильтрационная модель (ГФМ ПАК) с граничными условиями для проведения расчетных исследований

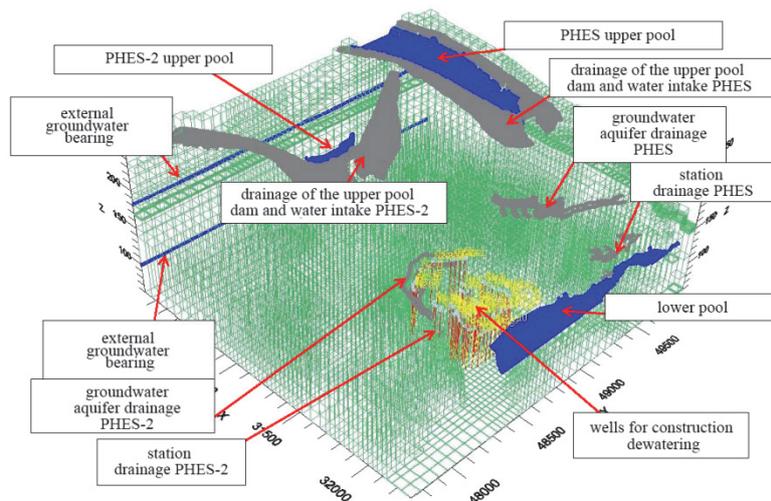


Figure 5. Spatial geofiltration model (GFM PAK) with boundary conditions for carrying out computational studies

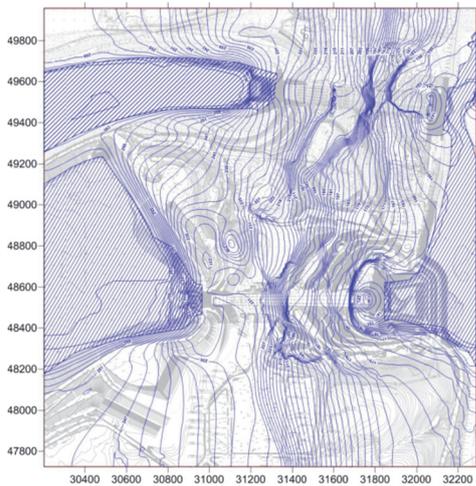


Рис. 6. Распределение напоров в техногенном водоносном горизонте при основном расчетном сочетании
 [Figure. 6. Distribution of head in a technogenic aquifer with the main design combination]

6. Расчетная геомеханическая модель основания комплекса сооружений (РГММ)

Основывается на верифицированной по данным натурных изысканий ГММ. Для определения деформационных параметров грунтов основания используются данные для каждого расчетного сценария ГФМ, обмен информации происходит внутри программных комплексов, после выполняется решение совместной задачи. В качестве граничных условий используются фильтрационные характеристики и пьезометрические поверхности при каждом из расчетных сценариев. В качестве выходных данных для моделей напряженно-деформированного состояния выступают:

- деформации и напряжения в грунтовом массиве;
- контактные напряжения в системе «сооружение – основание»;
- поровое давление;
- коэффициенты запаса устойчивости склонов;
- потенциальные поверхности смещения.

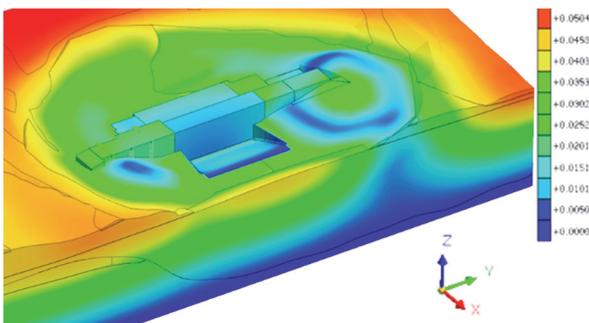


Рис. 7. Суммарные смещения здания станции при расчетном сочетании «Заполнение нижнего бассейна», м
 [Figure. 7. Total displacements of the station building with the calculated combination “Filling the lower basin”, m]

Результаты расчетных исследований, полученные при сценарии наполнения нижнего бассейна, представлены на рис. 7.

7. Модель напряженно-деформированного состояния сооружений (НДСМ)

Является основной моделью для оценки состояния основных конструкций комплекса взаимовлияющих ГТС. Модель разработана в универсальном промышленном программном комплексе ANSYS Mechanical, который в настоящее время широко применяется при решении подобных задач [8–20]. В случае разработки ПАК применение подобного ПО позволяет учитывать различные сочетания нагрузок, в том числе при учете граничных условий, передаваемых из моделей ГФМ и РГММ. Дополнительно возможно для расчетных исследований использовать локальные области модели, для получения локальных результатов перспективно использование особых сочетаний нагрузок, описывающих непроектную работу конструктивных элементов. Дополнительно на данной модели возможно рассмотрение мероприятий по ремонту и реконструкции ГТС. В модели НДСМ включены следующие сооружения:

- дамбы верхнего водохранилища – 2 ед.;
- водоприемные узлы – 2 ед.;
- сооружения станционных узлов – 2 ед.;
- напорные водоводы – 10 ед.;
- реверсивные каналы – 2 ед.;
- временная отсекающая перемычка реверсивного канала Загорской ГАЭС-2 – 1 ед.

Исходными данными для выполнения расчетных исследований являются результаты, получаемые из:

- ИГМ – физико-механические свойства материалов;
- РГММ – расположения РГЭ в сооружениях и перемещения грунтового массива;
- ГФМ – пьезометрические уровни в основании, основные и особые сочетания нагрузок.

В качестве результатов в экспертный модуль ПАК поступают:

- перемещения конструкций (по узлам КЭ-сетки);
- напряжения в основных конструктивных элементах;
- раскрытие швов (межблочных и межсекционных).

Фрагмент конечно-элементной аппроксимации математической модели в зоне водоприемного узла Загорской ГАЭС и результаты по осадкам водоприемника и тела дамб приведены на рис. 8. Результаты, получаемые на моделях ПАК, хорошо коррелируются с данными натурных наблюдений, поступающих с автоматизированной КИА.

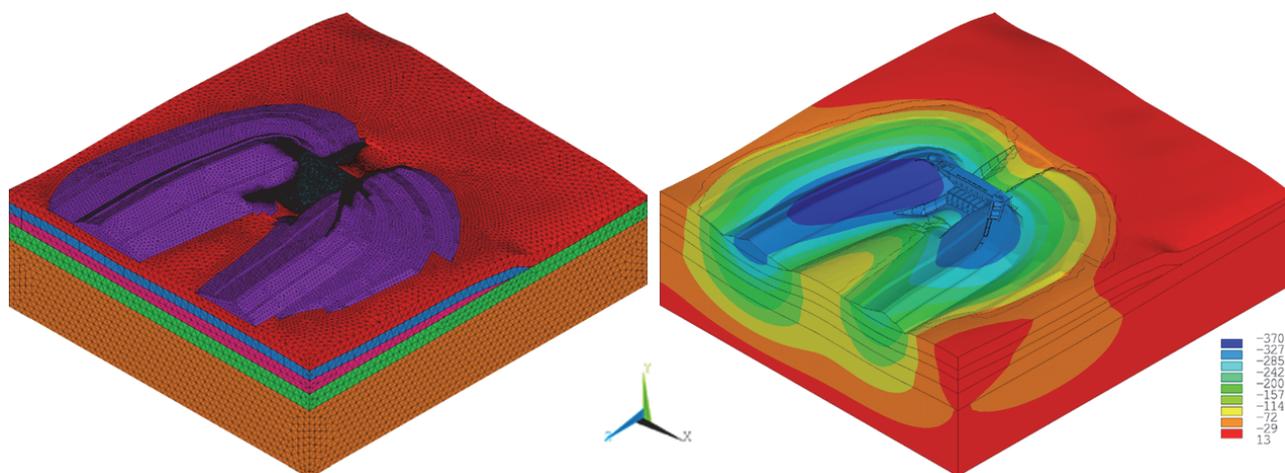


Рис. 8. Локальная математическая модель водоприемного узла Загорской ГАЭС, вертикальные перемещения, м
[Figure. 8. Local mathematical model of the water intake unit of the Zagorskaya PSP, vertical displacements, m]

Выводы

Результатами исследования являются актуализация структуры расчетного модуля ПАК, систематизация расчетных моделей, описание взаимодействия и передачи исходных данных внутри РМ ПАК, а также принципов решения сложных междисциплинарных задач.

Основой расчетного модуля являлись инженерно-геологическая, геометрическая, геомеханическая, геофильтрационная модели основания ГТС и модель напряженно-деформированного состояния сооружений. Применялись современные расчетные комплексы – ANSYS, Midas, Modflow и др.

Полученные в ходе исследования данные могут использоваться для повышения безопасности комплекса взаимовлияющих ГТС.

Список литературы

1. Лунаци 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–.
2. Рубин О.Д., Соболев В.Ю. Техническая реализация программного-аппаратного комплекса для мониторинга состояния и прогнозирования безопасности гидротехнических сооружений и их оснований // Природообустройство. 2017. № 1. С. 41–46.
3. Соболев В.Ю. Создание системы прогнозирования безопасности и надежности гидротехнических сооружений ГЭС и ГАЭС // Природообустройство. 2017. № 2. С. 6–11.
4. Анискин Н.А., Антонов А.С., Мгалобелов Ю.Б., Дейнеко А.В. Исследование фильтрационного режима

оснований высоких плотин на математических моделях // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 114–131.

5. Aniskin N., Antonov A. Spatial seepage mathematical model of earth-fill dam in complicated topographic and engineering-geological conditions // Materials Science and Engineering. 2018. No. 365. Pp. 1–7.

6. Rak G., Bombac M. Hydraulic analysis of the construction pit of HPP Brežice (Slovenia) and its effect on the runoff regime // Conference: HYDRO 2015.

7. Babar Muhammad Munir. Finite Element Analysis of Seepage through an Earthen Dam by using Geo-Slope (SEEP /W) software // International Journal of Research (IJR). September 2014. Vol. 1. Issue 8. Pp. 619–634.

8. Gaohui Wang, Yongxiang Wang, Wenbo Lu, Mao Yu, Chao Wang. Deterministic 3D seismic damage analysis of Guandi concrete gravity dam: a case study // Engineering Structures. 2017. Vol. 148. Pp. 263–276.

9. Kai Zhu, Chongshi Gu, Jianchun Qiu, Wanxin Liu, Chunhui Fang, Bo Li. Determining the Optimal Placement of Sensors on a Concrete Arch Dam Using a Quantum Genetic Algorithm // Journal of Sensors. Vol. 2016. Article ID 2567305.

10. Fang C.-H., Chen J., Duan Y.-H., Xiao K. A new method to quantify breach sizes for the flood risk management of concrete arch dams // Journal of Flood Risk Management. 2016. 10(4).

11. Волынчиков А.Н., Мгалобелов Ю.Б., Баклыков И.В. Сопряжение бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2014. № 10. С. 2–9.

12. Jiahong Zhang. Safety Assessment Technology of Concrete Arch Dam // International Conference on Civil and Hydraulic Engineering 2018.

13. 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.

14. 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.

15. Calcina S.V., Eltrudis L., Piroddi L., Ranieri G. Ambient Vibration Tests of an Arch Dam with Different Reservoir Water Levels: Experimental Results and Comparison with Finite Element Modelling // *The Scientific World Journal*. 2014. Article ID 692709.

16. Buffa 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 // *X International Conference on Structural Dynamics, EURODYN*, 2017.

17. Abdulrazeg A.A., Noorzaei J., Jaafar M.S., Khanzadeh P., Mohamed T.A. Thermal and structural analysis of RCC double-curvature arch dam // *Journal of civil engineering and management*. 2014. Vol. 20(3). Pp. 434–445.

18. Suarez B., Miquel J., Gonzalez J.M., Gratiela L., Buil J.M., Rio J.F., Batlle M.T. The behavior of Baserca and Llauset dams in the new energetic scenarios // *9th ICOLD European Club Symposium: Sharing Experience for Safe and Sustainable Water Storage (Venice, Italy)*. 2014. P. 144.

19. 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. Pp. 1–14.

20. Amina Tahar Berrabah, Mohamed Belharizi, André Laulusa, Abdelmalek Bekkouche. Three-Dimensional Modal Analysis of Brezina Concrete Arch Dam, Algeria // *Earth Science Research*. 2012. Vol. 1. No. 2.

Об авторах

Рубин Олег Дмитриевич – доктор технических наук, директор, Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” имени С.Я. Жука»). eLIBRARY SPIN-код: 2720-6627. *Область научных интересов:* расчетные исследования напряженно-деформированного состояния сооружений, расчетные исследования гидротехнических сооружений, исследования применения композитных материалов, усиление железобетонных конструкций, определение параметров армирования. *Контактная информация:* e-mail – o.rubin@hydroproject.ru

Антонов Антон Сергеевич – кандидат технических наук, директор аналитического центра безопасности оборудования и ГТС, Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” имени С.Я. Жука»); старший

преподаватель кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ). eLIBRARY SPIN-код: 7374-6867. ORCID iD: 0000-0002-8310-9604. *Область научных интересов:* расчеты напряженно-деформированного состояния и устойчивости гидротехнических сооружений (ГТС), исследование термического режима и термонапряженного состояния ГТС, моделирование аварийных ситуаций на ГТС, геофильтрационный режим ГТС, совместный температурно-фильтрационный режим ГТС и их оснований, информационно-диагностические системы. *Контактная информация:* e-mail – Antonov.An.S@yandex.ru

Беллендир Евгений Николаевич – доктор технических наук, генеральный директор, АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” имени С.Я. Жука». *Область научных интересов:* расчетные исследования напряженно-деформированного состояния сооружений, расчетные исследования гуртовых оснований, термонапряженное состояние гидротехнических сооружений (ГТС). eLIBRARY SPIN-код: 7975-2841. *Контактная информация:* e-mail – e.bellendir@hydroproject.ru

Кобочкина Екатерина Михайловна – заместитель директора аналитического центра безопасности оборудования и ГТС, Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт “Гидропроект” имени С.Я. Жука»). *Область научных интересов:* геофильтрационный режим ГТС, информационно-диагностические системы, анализ показаний контрольно-измерительной аппаратуры, прогноз состояния ГТС. *Контактная информация:* e-mail – e.kobochkina@hydroproject.ru

Котлов Олег Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела «Основания, грунтовые и подземные сооружения», АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева». eLIBRARY SPIN-код: 7057-9274. *Область научных интересов:* геофильтрационный режим ГТС, анализ показаний контрольно-измерительной аппаратуры, прогноз состояния ГТС. *Контактная информация:* e-mail – kotlovon@vniig.ru

Для цитирования

Рубин О.Д., Антонов А.С., Беллендир Е.Н., Кобочкина Е.М., Котлов О.Н. Разработка расчетного модуля программно-аппаратного комплекса для обеспечения безопасности взаимодействующих ГТС // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. Т. 15. № 2. С. 96–105. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-96-105

Development of the design module of the software and hardware complex to ensure the safety of mutually influencing HPS

Oleg D. Rubin¹, Anton S. Antonov^{1,4*}, Evgeny N. Bellendir², Ekaterina M. Kobochkina¹, Oleg N. Kotlov³

¹Research Institute of Energy Structures (branch of JSC “Design, Survey and Research Institute ‘Hydroproject’ named after S.Y. Zhuk”), 2 Volokolamskoye Highway, Moscow, 125080, Russian Federation

²JSC “Design, Survey and Research Institute ‘Hydroproject’ named after S.Y. Zhuk”, 2 Volokolamskoye Highway, Moscow, 125080, Russian Federation

³JSC “All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedenev”, 21 Gzhatskaya St., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation

⁴Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

*Antonov.An.S@yandex.ru

Received: February 01, 2019

Revised: March 18, 2019

Accepted: March 26, 2019

Keywords:

hydraulic structures; foundations; software and hardware complex; monitoring; safety prediction; mathematical models; finite element models; information and diagnostic system; a calculation module

Abstract

Relevance. As part of the implementation of the Federal Law No. 117-FZ “On the Safety of Hydraulic Structures”, it is necessary to continuously monitor the state of hydraulic structures and related facilities by equipping with control and measuring instruments. The development of modern computer complexes allows us to carry out and predict the state of objects by combining computational research and field observations. The work is aimed at organizing a comprehensive assessment of the state of the HPS and ensuring the safety of existing and projected mutually influential complexes.

Aims of research. Improving the safety of the operated (under construction) complex of interfering hydraulic structures. Assessment of sufficient and high-quality engineering and repair work carried out on the HPS. Development of recommendations for improving the efficiency of construction of new and modernization of operated hydropower facilities. HPS on the example of the Zagorsk HPS.

Methods. Representation of the interaction ideology of various software systems of mathematical modeling, using control and measuring instruments data for calibration and verification of mathematical models.

Results. The structure of the HSC calculation module was updated, systematization of the calculation models was carried out, interaction and transfer of the initial data to the calculation module of the software and hardware complex was revealed. The implementation of scientific research is aimed at improving the safety of the complex hydraulic structures.

References

1. Lunaci M.Eh., Shpolyanskij Yu.B., Sobolev V.Yu., Bellendir E.N., Belostockij A.M., Lisichkin S.E., Bershov A.V. (2016). Koncepciya postroeniya arhitektury programmno-apparatnogo kompleksa dlya monitoringa sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij [The concept of building architecture of software and hardware complex for monitoring the state of hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*, (5), 2–6. (In Russ.)

2. Rubin O.D., Sobolev V.Yu. (2017). Tekhnicheskaya realizaciya programmno-apparatnogo kompleksa dlya monitoringa sostoyaniya i prognozirovaniya bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenij i ih osnovanij [Technical implementation of software hardware for monitoring the status and prediction of the safety of hydraulic structures and their bases]. *Prirodobustrojstvo*, (1), 41–46. (In Russ.)

3. Sobolev V.Yu. (2017). Sozdanie sistemy prognozirovaniya bezopasnosti i nadyozhnosti gidrotekhnicheskikh so-

oruzhenij GES i GAES [Creating a system for predicting the safety and reliability of hydraulic structures GEHS and GAEHS]. *Prirodobustrojstvo*, (2), 6–11. (In Russ.)

4. Aniskin N.A., Antonov A.S., Mgalobelov Yu.B., Dejneko A.V. (2014). Issledovanie fil'tracionnogo rezhima osnovanij vysokih plotin na matematicheskikh modelyah [Investigation of the filtration regime of high dam bases on mathematical models]. *Vestnik MGSU*, (10), 114–131. (In Russ.)

5. Aniskin N., Antonov A. (2018). Spatial seepage mathematical model of earth-fill dam in complicated topographic and engineering-geological conditions. *Materials Science and Engineering*, (365), 1–7.

6. Rak G., Bombac M. (2015). Hydraulic analysis of the construction pit of HPP Brežice (Slovenia) and its effect on the runoff regime. *Conference: HYDRO 2015*.

7. Babar Muhammad Munir. (2014). Finite Element Analysis of Seepage through an Earthen Dam by using GeoSlope (SEEP/W) software. *International Journal of Research (IJR)*, 1(8), 619–634.

8. Gaohui Wang, Yongxiang Wang, Wenbo Lu, Mao Yu, Chao Wang. (2017). Deterministic 3D seismic damage analysis of Guandi concrete gravity dam: a case study. *Engineering Structures*, 148, 263–276.

9. Kai Zhu, Chongshi Gu, Jianchun Qiu, Wanxin Liu, Chunhui Fang, Bo Li. (2016). Determining the Optimal Placement of Sensors on a Concrete Arch Dam Using a Quantum Genetic Algorithm. *Journal of Sensors*. Article ID 2567305.

10. Fang C.-H., Chen J., Duan Y.-H., Xiao K. A new method to quantify breach sizes for the flood risk management of concrete arch dams. *Journal of Flood Risk Management*, 10(4).

11. Volynchikov A.N., Mgalobellov Yu.B., Baklykov I.V. (2014). Sopryazhenie betonnoj i kamenno-nabrosnoj plotin Boguchanskoj GES [Conjugation of the concrete and stone dam of the Boguchanskaya GEGS]. *Gidrotekhnicheskoe Stroitelstvo*, (10), 2–9. (In Russ.)

12. Jiahong Zhang. (2018). Safety Assessment Technology of Concrete Arch Dam. *International Conference on Civil and Hydraulic Engineering 2018*.

13. Rakić D., Živković M., Vulović S., Divac D., Slavković R., Milivojević N. (2013). Embankment dam stability analysis using FEM. *3rd South-East European Conference on Computational Mechanics – an ECCOMAS and IACM Special Interest Conference*, 1–12.

14. Hao Gu, Zhongru Wu, Xiaofei Huang, Jintao Song. (2015). Zoning Modulus Inversion Method for Concrete Dams Based on Chaos Genetic Optimization Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 1–9.

15. Calcina S.V., Eltrudis L., Piroddi L., Ranieri G. (2014). Ambient Vibration Tests of an Arch Dam with Different Reservoir Water Levels: Experimental Results and Comparison with Finite Element Modelling. *The Scientific World Journal*. Article ID 692709.

16. Buffia G., Manciola P., De Lorenzis L., Cavalagli N., Comodini F. (2017). Calibration of finite element models of concrete arch-gravity dams using dynamical measures: the case of Ridracoli. X International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN.

17. Abdulrazeg A.A., Noorzaei J., Jaafar M.S., Khanehzaei P., Mohamed T.A. (2014). Thermal and structural analysis of RCC double-curvature arch dam. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(3), 434–445.

18. Suarez B., Miquel J., Gonzalez J.M., Gratiela L., Buil J.M., Rio J.F., Batlle M.T. (2014). The behavior of Baserca and Llauset dams in the new energetic scenarios. *9th ICOLD European Club Symposium: Sharing experience for safe and sustainable water storage (Venice, Italy)*, 144.

19. Zeinizadeh A., Mirzabozorg H., Noorzad A., Amirpoura A. (2018). Hydrodynamic pressures in contraction joints including waterstops on seismic response of high arch dams. *Structures*, 14, 1–14;

20. Amina Tahar Berrabah, Mohamed Belharizi, André Laulusa, Abdelmalek Bekkouche. (2012). Three-Dimensional Modal Analysis of Brezina Concrete Arch Dam, Algeria. *Earth Science Research*, 1(2).

About the authors

Oleg D. Rubin – DSc in Technical Sciences, Director, Research Institute of Energy Structures (branch of JSC “Design, Survey and Research Institute ‘Hydroproject’ named after S.Y. Zhuk”). eLIBRARY SPIN-code: 2720-6627. *Research interests*: design studies of stress-strain state of structures, design studies of hydraulic structures, studies of the use of composite materials, reinforced concrete structures, determining the parameters of reinforcement. *Contacts*: e-mail – o.rubin@hydroproject.ru

Anton S. Antonov – PhD in Technical Sciences, Director of the Analytical Center for Equipment Safety and Hydraulic Structures, Research Institute of Energy Structures (branch of JSC “Design, Survey and Research Institute ‘Hydroproject’ named after S.Y. Zhuk”); Senior Lecturer, Institute of Hydraulic Engineering and Energy Sector Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU). eLIBRARY SPIN-code: 7374-6867. ORCID iD: 0000-0002-8310-9604. *Research interests*: calculations of the stress-strain state and stability of hydraulic structures, the study of the thermal regime and the heat-stressed state of hydraulic structures, modeling of emergency situations on hydraulic structures, geofiltration mode of hydraulic structures, joint temperature-filtration mode of structures and their bases, information and diagnostic system. *Contacts*: e-mail – Antonov.An.S@yandex.ru

Evgeny N. Bellendir – Doctor of Technical Sciences, General Director, JSC “Design, Survey and Research Institute ‘Hydroproject’ named after S.Y. Zhuk”. eLIBRARY SPIN-код: 7975-2841. *Research interests*: design studies of stress-strain state of structures, design studies of soil bases, thermal stress state of hydraulic structures hydraulic structures. *Contacts*: e-mail – e.bellendir@hydroproject.ru

Ekaterina M. Kobochkina – Deputy Director of the Analytical Center for Equipment Safety and hydraulic Structures, Research Institute of Energy Structures (branch of JSC “Design, Survey and Research Institute ‘Hydroproject’ named after S.Y. Zhuk”). *Research interests*: geofiltration mode of hydraulic structures, information and diagnostic systems, analysis of control and measuring equipment, the forecast state of hydraulic structures. *Contacts*: e-mail – e.kobochkina@hydroproject.ru

Oleg N. Kotlov – PhD in Geological and Mineralogical Sciences, Head of the Foundation, Ground and Underground Structures Department, All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedenev. eLIBRARY SPIN-code: 7057-9274. *Research interests*: geofiltration mode of the hydraulic structures, analysis of readings of the instrumentation, the prognosis for the hydraulic structures. *Contacts*: e-mail – kotlovon@vniig.ru

For citation

Rubin O.D., Antonov A.S., Bellendir E.N., Kobochkina E.M., Kotlov O.N. (2019). 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*, 15(2), 96–105. DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-2-96-105