

Цифровые двойники напряжённо-деформированного состояния для автоматизированного мониторинга гидротехнических сооружений

Симутин А. Н.¹, кандидат техн. наук, генеральный директор (ООО “Монитрон”),
Арсеньев И. Д., генеральный директор (АО “ГеоСпецСтрой”),
Хотеев Е. А., кандидат техн. наук, главный инженер,
Дейнеко А. В.², кандидат техн. наук, начальник отдела расчётных обоснований
(ООО “Сигма Тау”)

Магистральным направлением развития мониторинга (натурных наблюдений) гидротехнических сооружений (ГТС) является автоматизация с переходом к непрерывному контролю напряжённо-деформированного состояния (НДС) посредством автоматизированной телеметрической контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). В связи с этим становится возможной автоматизация оценки технического состояния ГТС с учётом изменения нагрузок и воздействий с помощью цифрового двойника НДС ГТС, который разрабатывается с использованием машинного обучения на основе данных автоматизированного мониторинга. Цифровой двойник представляет собой конечно-элементную модель ГТС, которая согласована с данными мониторинга. Для разработки цифровых двойников необходим автоматизированный мониторинг вертикальных перемещений. Рассмотрена методика разработки цифровых двойников с использованием отечественных цифровых датчиков гидростатического нивелира “Монитрон” и отечественной облачной информационно-диагностической системы мониторинга.

Ключевые слова: цифровой двойник, метод конечных элементов, автоматизированный мониторинг, гидростатическое нивелирование.

Digital twins of the stress-strain state for automated monitoring of hydraulic structures

Simutin A. N.¹, Candidate of Technical Sciences, CEO (“Monitron” LLC),
Arsen’ev I. D., CEO (“GeoSpecStroj” JSC),
Khoteev E. A., Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer (“Sigma Tau” LLC),
Deineko A. V.², Candidate of Technical Sciences,
Head of Computational Analysis Department (“Sigma Tau” LLC)

The main direction in the development of monitoring (field observations) of hydraulic structures is automation with the transition to continuous monitoring of the stress-strain state using automated telemetric instrumentation. In this regard, it becomes possible to automate the assessment of the technical condition of hydraulic structures, taking into account changes in loads and impacts using a digital twin of the stress-strain state of a hydraulic structure, which is developed using machine learning based on automated monitoring data. The digital twin is a finite element model of a hydraulic structure that is consistent with monitoring data. The development of digital twins requires automated settlements monitoring. A technique for developing digital twins using the Monitron domestic digital sensors of the hydrostatic level and a domestic cloud-based information and diagnostic monitoring system is considered.

Keywords: digital twin, finite element method, automated monitoring, hydrostatic leveling.

Основным направлением развития мониторинга (натурных наблюдений) гидротехнических сооружений (ГТС) [1] является автоматизация с переходом к непрерывному контролю напряженно-деформированного состояния (НДС) посредством автоматизированной телеметрической контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). При таком подходе мониторинг должен проводиться круглосу-

точно, в режиме реального времени, без постоянного участия человека.

Сложность представляет интеллектуализация автоматизированной оценки технического состояния ГТС. В настоящее время преобладает использование простого алгоритма сопоставления показаний КИА с фиксированными критериями безопасности (КБ). Такой подход не учитывает динамику изменения состояния фактических конструкций ГТС и не использует преимущества, связанные с

¹ simutin@sigma-tau.xyz
² deyneko@sigma-tau.xyz



Рис. 1. Структура системы мониторинга ГТС. Схема подключения цифрового двойника

наличием большого объёма данных результатов измерений (Big Data), генерируемых автоматизированной телеметрической КИА.

Совершенствование методики автоматизированной оценки технического состояния ГТС требует включение в состав системы мониторинга (рис. 1) цифрового двойника НДС ГТС (далее ЦД), который разрабатывается на основе данных мониторинга с использованием современных методов анализа данных (Data Science), в частности машинного обучения (Machine Learning).

Ниже рассматривается технология применения ЦД, разработанная совместно компаниями ООО “Мониторн” и ООО “Сигма Тау” на основе данных отечественных цифровых датчиков гидростатического нивелира с использованием отечественных облачных ИТ-решений, что обеспечивает работу ЦД в среде стандартного интернет-браузера в любой операционной системе (включая отечественные) без использования специализированных программ в области математического моделирования. Поставку, монтаж, обслуживание и 24-часовую техническую поддержку данной технологии обеспечивает компания АО “ГеоСпецСтрой”.

Что такое цифровой двойник? Это компьютерная модель, достаточно точно воспроизводящая реакцию реального ГТС на изменения фактических нагрузок, воздействий и условий эксплуатации (например, на перемену уровня воды в водохранилище, сезонные температурные колебания, открытие и закрытие затворов). ЦД основан на методе конечных элементов (МКЭ) и предназначен для расчёта осадок и других параметров НДС реального ГТС с учётом результатов мониторинга сооружения.

Стоит заметить, что понятие “цифровой двойник” носит межотраслевой характер и является частью концепции цифровизации и четвёртой промышленной революции. Цифровизация — это переход на принципиально новые методы работы на основе информационных технологий.

Одним из примеров цифровизации является переход на технологии информационного моделирования сооружений: BIM (Building Information

Modeling) или ТИМ — технологии информационного моделирования; PLM (Product Lifecycle Management) — управление жизненным циклом объекта. Внедряются модели классов 3D (трёхмерная информационная модель), 4D (трёхмерная информационная модель с учётом этапности строительства), 5D (с учётом логистических и финансовых потоков в период строительства), 6D (продолжающая действие на период эксплуатации). Одной из основных задач 6D моделей является поддержка мониторинга.

Внедрение ЦД, наряду с BIM-моделями, носит характер цифровизации проектирования, строительства и эксплуатации ГТС и направлено на создание новых профессиональных возможностей.

ЦД основан на общей научно-методической базе вместе с расчётными моделями НДС, которые разрабатываются на этапе проектирования. Различия определяются разными задачами.

Проектные расчётные модели воспроизводят предельные состояния сооружения при наихудших сочетаниях нагрузок и воздействий, причём часто допускаются погрешности “в запас”, позволяющие упростить расчёты и снизить соответствующие трудозатраты.

Задачи и возможности ЦД будут рассмотрены ниже.

Очевидно, что ЦД должен воспроизводить фактическое состояние сооружения. Следовательно, необходимо учитывать: историю эксплуатации конкретного ГТС и его фактическое состояние с учётом дефектов, повреждений и фактических деформаций; реальные свойства строительных материалов и грунтов основания, которые отличаются от проектных, установленных по нормам проектирования с запасом на естественную изменчивость свойств материалов; фактические нагрузки и воздействия, которые регистрируются в ходе мониторинга реального сооружения, вместо искусственно составленных наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузок и воздействий, которые задаются при проектировании; нелинейную работу сооружения (сочетание генетической, конструктивной, физиче-

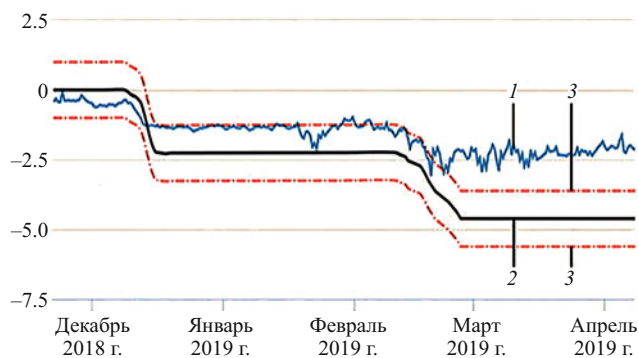


Рис. 2. Натурные (1) и расчётные (2) вертикальные перемещения, а также прогнозные значения (3) при проходке под шлюзом двух туннелей

ской и геометрической нелинейности); связность физических процессов работы сооружения (НДС, теплообмен, фильтрация).

Методика учёта тех или иных аспектов уточняется в зависимости от поставленных перед ЦД конкретных задач.

Из изложенного следует, что разработка ЦД требует учёта не только первоначальных данных проекта, но и последующих данных, накапливаемых по мере строительства и эксплуатации при мониторинге сооружения.

Задачи цифрового двойника. ЦД применяется в процессе мониторинга для своевременного оповещения о возникновении деструктивных процессов, что обеспечивает: предотвращение аварий; снижение затрат на устранение повреждений сооружения за счёт их раннего обнаружения; финансово-экономические преимущества, такие как уменьшение издержек на страхование благодаря снижению рисков, а также оптимизацию затрат на планово-предупредительные ремонты.

Типичное применение ЦД предполагает многократное моделирование фактического состояния сооружения путём добавления в модель новых расчётных этапов, учитывающих изменение нагрузок и воздействий со временем.

Показания КИА сопоставляются с результатами расчёта ЦД. Соответствие результатов означает, что реальное сооружение сохраняет соответствие модели, а значит характер работы сооружения не меняется, его техническое состояние стабильно.

Таким образом, ЦД выявляет деструктивные процессы по косвенным признакам благодаря их влиянию на параметры НДС, прежде всего на вертикальные перемещения и крены сооружения, которые поддаются автоматизированному контролю в режиме реального времени.

Это позволяет обнаружить множество деструктивных процессов, входящих в типовые сценарии аварий ГТС: суффозию основания, нарушение сплошности противофильтрационной завесы, трещинообразование бетона, раскрытие рабочих швов

бетонирования, коррозию арматуры подпорных стен и других конструкций.

ЦД позволяет индивидуально, для каждого прибора КИА, установить прогнозный коридор наблюдаемого параметра, т.е. расчётное значение параметра с поправкой на погрешность инженерных расчётов и натуральных измерений (рис. 2). В силу изменения нагрузок, воздействий и условий эксплуатации прогнозный коридор изменяется по ходу календарного времени.

Это позволяет обнаружить деструктивные процессы раньше, чем традиционные критерии безопасности (КБ), что увеличивает резерв времени для осуществления мер по предотвращению возможной аварии.

Недостатком системы КБ является то, что они не прогнозируют динамику изменения технического состояния сооружения. Пока КБ не нарушены, сооружение считается работоспособным, даже при тенденции к нарушению КБ в будущем.

Преимущество ЦД заключается в возможности анализа динамики изменений параметров НДС. Например, по данным мониторинга вертикальные перемещения уменьшаются (происходит подъём) [11, 12], а по данным цифрового двойника должны увеличиваться. Такой пример может указывать на прорыв противофильтрационной завесы и повышение противодавления.

Практическая ценность ЦД заключается в раннем обнаружении деструктивных процессов. Изменения действующих нагрузок и воздействий происходят постоянно (например, сезонные температурные колебания). Это создаёт помехи для обычных приёмов инженерного анализа, тогда как ЦД контролирует стабильность работы сооружения независимо от изменений нагрузок и воздействий, потому что эти изменения учитываются математической моделью. Таким образом, ЦД даёт ответ на вопрос: адекватны ли изменения параметров НДС, с одной стороны, изменениям нагрузок и воздействий, с другой стороны?

Результаты работы ЦД интерпретируются следующим образом:

если данные мониторинга укладываются в прогнозный коридор, значит реальное сооружение соответствует своей математической модели, техническое состояние сооружения стабильно, деструктивные процессы не развиваются;

если данные мониторинга вышли из прогнозного коридора, значит сооружение перестало соответствовать своей математической модели, возможно, что состояние сооружения в процессе изменения.

Математический аппарат цифровых двойников. Метод конечных элементов (МКЭ) [2 – 5] является наиболее распространённым методом мате-

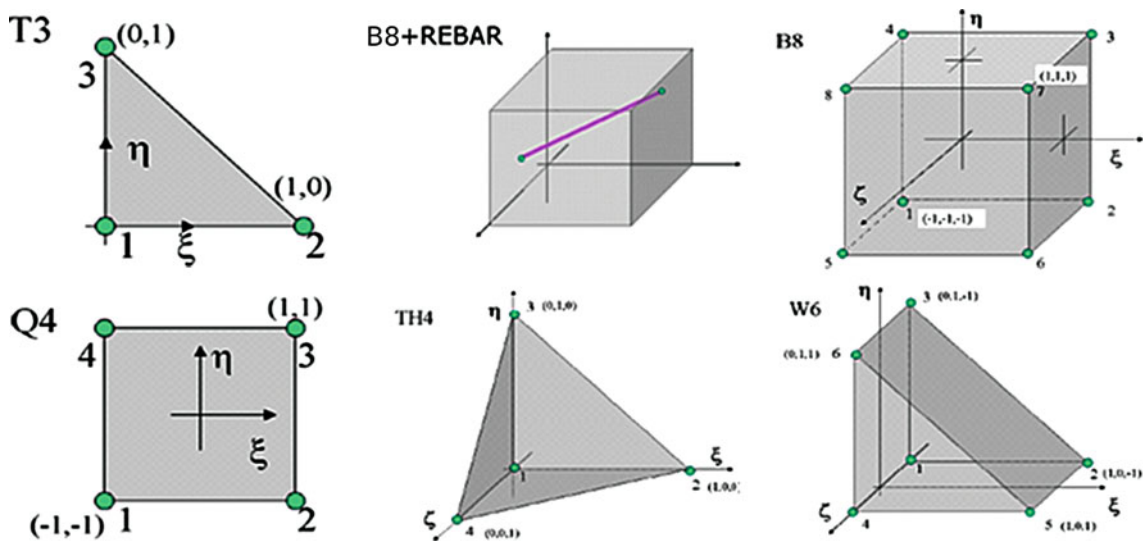


Рис. 3. КЭ первого порядка (перечисление против часовой стрелки): треугольный, четырёхугольный, четырёхугольный тетраэдр, шестиугольная призма, восьмиугольный гексаэдр, комбинированный КЭ из объёмного гексаэдра и трёхмерного стержня

матического моделирования гидротехнических и других строительных сооружений.

Конечно-элементная модель представляет собой геометрическую модель сооружения, аппроксимированную небольшими областями элементарной формы — конечными элементами (КЭ, рис. 3), которые соединяются между собой в узлах КЭ-сетки. На рёбрах КЭ могут добавляться дополнительные узлы, что позволяет получить КЭ второго порядка.

Размеры КЭ подбираются таким образом, чтобы аппроксимировать поля результатов (перемещения, деформации, напряжения). Поэтому размеры КЭ обычно изменяются в соответствии с ожидаемым изменением полей результатов (рис. 4) для уменьшения общего количества КЭ. Оптимизация КЭ-сетки важна для цифровых двойников, которые предназначены для многократных расчётов по мере изменения нагрузок и воздействий, что генерирует большой объём данных.

МКЭ позволяет воспроизводить сколько угодно сложные расчётные схемы в постановке “сооружение — основание” в любой отрасли строительства, а также на стыке областей (рис. 5, 6).

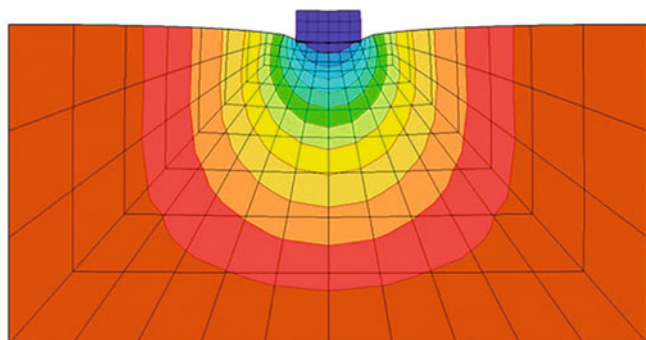


Рис. 4. Типичная топология сетки с переменным размером КЭ

Для создания ЦД необходим учёт различных аспектов работы ГТС и соответственно несколько видов МКЭ-моделирования [6, 7].

Прочностное МКЭ-моделирование определяет параметры НДС сооружения и основания. Исходными данными для прочностной КЭ-модели являются: физико-механические характеристики строительных материалов и грунтов, выделяются характеристики физические (плотность, коэффициент линейного расширения и т.п.), механические (модуль деформации, коэффициент Пуассона и т.п.), прочностные (предел прочности бетона, угол внутреннего трения грунта и т.п.); граничные условия (ГУ) первого рода — заданные перемещения и повороты узлов, которые могут быть нулевыми (опорные закрепления) или не нулевыми (кинематические ГУ); ГУ второго рода — заданные силы и мо-

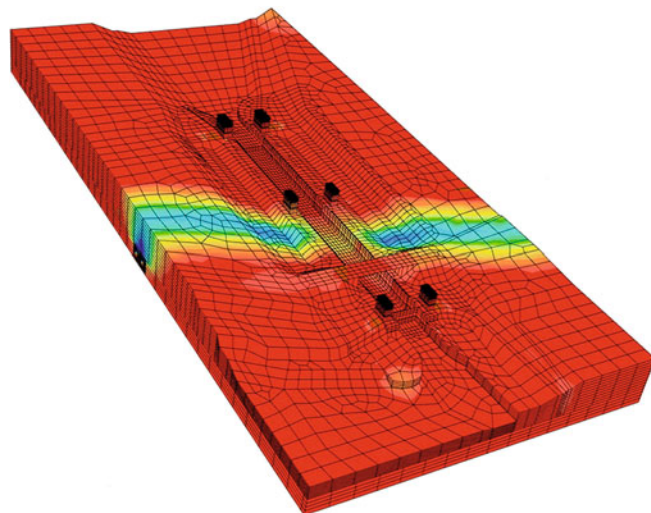


Рис. 5. МКЭ-модель цифрового двойника на стыке гидротехнического и транспортного строительства: проходка двух туннелей метро диаметром 6 м под Карамышевским шлюзом (Москва)

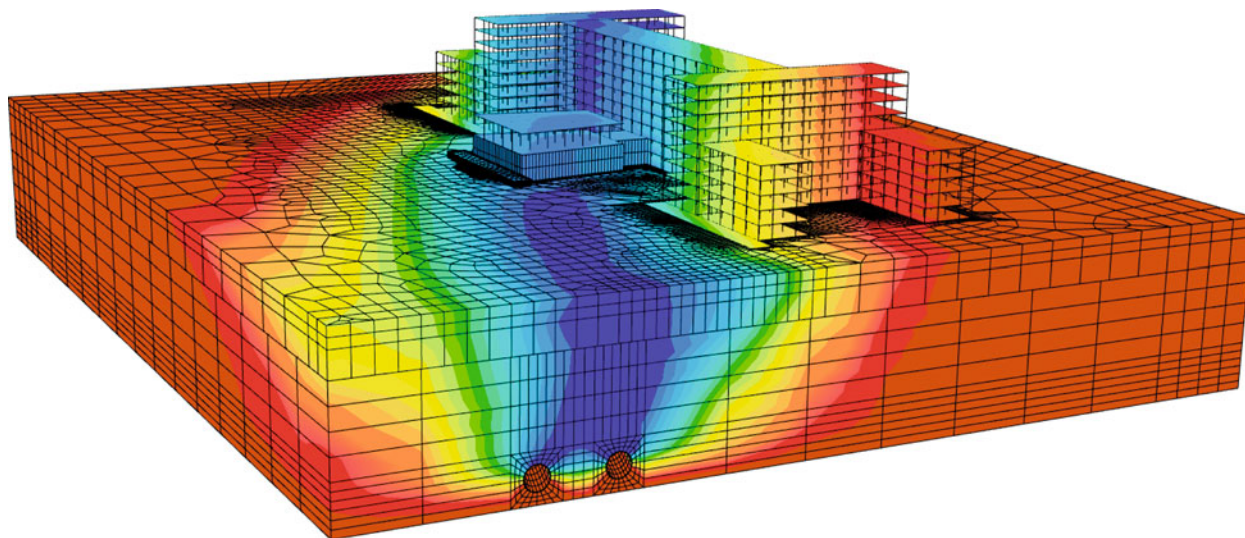


Рис. 6. МКЭ-модель цифрового двойника на стыке транспортного и гражданского строительства: проходка двух тоннелей метро диаметром 6 м под зданием РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина (Москва)

менты (сосредоточенные или распределённые нагрузки, сила тяжести и взвешивания в воде); ГУ третьего рода — взаимосвязь между перемещениями и силами (упругие опоры и т.п.); заданные деформации и напряжения (температурное расширение, усадка, компенсационное нагнетание, предварительное и последующее напряжение арматуры).

Компьютерный расчёт представляет собой решение основного уравнения МКЭ, которое выражается системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и записывается в матричной форме:

$$[K] \cdot \{u\} = \{p\}, \quad (1)$$

где $[K]$ — матрица жёсткости, которая является компьютерным представлением КЭ-сетки и свойств материалов; $\{u\}$ — вектор-столбец перемещений узлов; $\{p\}$ — вектор-столбец внешних сил, приложенных к узлам.

Размерность СЛАУ определяется количеством степеней свободы. При моделировании в трёхмерной постановке грунта и массивного бетона в каждом узле по три степени свободы (перемещения по осям координат X , Y и Z). При моделировании изгибаемых конструкций (балочных, плитных) в каждом узле по шесть степеней свободы (перемещения по каждой оси и повороты вокруг каждой оси).

K_{11}	K_{12}	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{16}	K_{17}	K_{18}	K_{19}	K_{110}	K_{111}	K_{112}	$u_{1(1x)}$	$p_{1(1x)}$	\times $=$ (2)
K_{21}	K_{22}	K_{23}	K_{24}	K_{25}	K_{26}	K_{27}	K_{28}	K_{29}	K_{210}	K_{211}	K_{212}	$u_{2(1y)}$	$p_{2(1y)}$	
K_{31}	K_{32}	K_{33}	K_{34}	K_{35}	K_{36}	K_{37}	K_{38}	K_{39}	K_{310}	K_{311}	K_{312}	$u_{3(1z)}$	$p_{3(1z)}$	
K_{41}	K_{42}	K_{43}	K_{44}	K_{45}	K_{46}	K_{47}	K_{48}	K_{49}	K_{410}	K_{411}	K_{412}	$u_{4(1rotx)}$	$p_{4(1rotx)}$	
K_{51}	K_{52}	K_{53}	K_{54}	K_{55}	K_{56}	K_{57}	K_{58}	K_{59}	K_{510}	K_{511}	K_{512}	$u_{5(1roty)}$	$p_{5(1roty)}$	
K_{61}	K_{62}	K_{63}	K_{64}	K_{65}	K_{66}	K_{67}	K_{68}	K_{69}	K_{610}	K_{611}	K_{612}	$u_{6(1rotz)}$	$p_{6(1rotz)}$	
K_{71}	K_{72}	K_{73}	K_{74}	K_{75}	K_{76}	K_{77}	K_{78}	K_{79}	K_{710}	K_{711}	K_{712}	$u_{7(2x)}$	$p_{7(2x)}$	
K_{81}	K_{82}	K_{83}	K_{84}	K_{85}	K_{86}	K_{87}	K_{88}	K_{89}	K_{810}	K_{811}	K_{812}	$u_{8(2y)}$	$p_{8(2y)}$	
K_{91}	K_{92}	K_{93}	K_{94}	K_{95}	K_{96}	K_{97}	K_{98}	K_{99}	K_{910}	K_{911}	K_{912}	$u_{9(2z)}$	$p_{9(2z)}$	
K_{101}	K_{102}	K_{103}	K_{104}	K_{105}	K_{106}	K_{107}	K_{108}	K_{109}	K_{1010}	K_{1011}	K_{1012}	$u_{10(2rotx)}$	$p_{10(2rotx)}$	
K_{111}	K_{112}	K_{113}	K_{114}	K_{115}	K_{116}	K_{117}	K_{118}	K_{119}	K_{1110}	K_{1111}	K_{1112}	$u_{11(2roty)}$	$p_{11(2roty)}$	
K_{121}	K_{122}	K_{123}	K_{124}	K_{125}	K_{126}	K_{127}	K_{128}	K_{129}	K_{1210}	K_{1211}	K_{1212}	$u_{12(2rotz)}$	$p_{12(2rotz)}$	

где K_{ij} — элементы матрицы жёсткости (i — индекс строк, j — индекс столбцов); u_i — перемещения узлов в направлении степени свободы под порядковым номером i ; p_i — внешние силы или опорные реакции, приложенные по степени свободы под порядковым номером i ; (1x) — в скобках даны соответствующие каждой степени свободы номера узлов от 1 до 3 и направления по осям X или Y .

Например, для балочного КЭ первого порядка (количество узлов 2, количество степеней свободы в каждом узле 6, количество степеней свободы $2 \cdot 6 = 12$, размерность матрицы жёсткости 12×12 (2)).

Элемент матрицы жёсткости K_{ij} численно равен реактивной силе, возникающей в i -ом направлении от единичного перемещения в j -ом направлении. Например, K_{47} равен моменту p_4 (момент в узле 1 вокруг оси X), вызываемому единичным перемещением u_7 (в узле 2 по направлению X).

Таким образом, все нагрузки и воздействия в ходе компьютерного моделирования преобразуются к сочетанию заданных внешних сил, приложенных к узлам, и заданных перемещений узлов (включая нулевые перемещения – опорные закрепления).

В ходе компьютерного расчёта первоначально определяются результаты, связанные с узлами сетки, т.е. перемещения и опорные реакции. Далее по алгоритмам метода конечных элементов вычисляются результаты, распределённые в объёме конечных-элементов: деформации, напряжения и другие необходимые параметры НДС.

Во временном отношении КЭ-модели рассматривают в стационарной и нестационарной постановке, что в рамках прочностного моделирования соответствует статике и динамике.

В статике скорость деформации модели полагается бесконечно малой, поэтому инерционная сила в узле эквивалентна силе тяжести и постоянна во времени. Шкала времени в поэтапном статическом расчёте обозначает последовательность этапов преобразования модели, продолжительность временных интервалов между этапами значения не имеет. Именно в статической постановке по формуле (1) проводится большинство прочностных расчётов и работает большинство ЦД в области гидротехнического строительства.

В динамике не только рассматриваются перемещения, но и учитывается время, за которое эти перемещения происходят. В уравнение (1) вводятся скорость и ускорение

$$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [C] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{p\}, \quad (3)$$

где $[M]$ — матрица масс; $\{\ddot{u}\}$ — вектор-столбец ускорений узлов; $[C]$ — матрица демпфирования; $\{\dot{u}\}$ — вектор-столбец скоростей узлов.

Шкала времени в динамическом расчёте соответствует физическому времени. В качестве начальных условий обычно принимается состояние покоя.

Динамика рассматривается в неявной и явной постановке.

В неявной динамике скорость распространения механического взаимодействия в объёме КЭ-модели полагается бесконечно большой. Сила, приложенная в определённый момент времени, начинает влиять на все узлы моментально. Поэтому выполняется условие равновесие: сумма всех сил и моментов в любой момент времени равна нулю. При этом перемещения, скорости и ускорения в каждом узле начинают изменяться во времени в зависимости от распределения жёсткостей, демпфирования и масс, например, в виде колебательного движения.

В постановке неявной динамики проводятся расчёты ГТС на сейсмические и вибрационные воздействия. Шаг по времени определяется характерными частотами собственных колебаний сооружения.

В явной динамике учитывается скорость распространения механического взаимодействия, равная скорости распространения упругих волн (скорости звука) в моделируемой среде (грунте, бетоне). Сила, приложенная в определённый момент времени, начинает влиять на другие узлы с задержкой на время прохождения упругой волны до рассматриваемой точки. Условие равновесия не применяется, потому что сумма всех сил и моментов в любой момент времени в этом случае не обязательно равна нулю.

В постановке явной динамики проводятся расчёты ГТС на быстропротекающие воздействия ударного характера, например на столкновение с самолётом. Шаг по времени определяется временем прохождения упругой волны через КЭ.

Моделирование теплообмена воспроизводит температурное поле в сооружении и основании. Исходными данными для МКЭ-модели теплообмена являются:

физические характеристики материалов (теплопроводность, плотность, удельная теплоёмкость);

ГУ первого рода — заданные температуры;

ГУ второго рода — тепловые потоки (например, количество теплоты, выделяемое при экзотермической реакции твердения бетона);

ГУ третьего рода — тепловые потоки, зависящие от температуры (например, условия конвекции или лучистого нагрева на поверхности сооружения, контактирующей с воздухом).

Компьютерный расчёт выполняется по формуле (1) с тем отличием, что вместо $\{u\}$ рассматриваются температуры, а вместо $\{p\}$ — тепловые потоки. Расчёт может проводиться в стационарной и нестационарной постановке.

Стационарная постановка предполагает определение установившегося (постоянного во времени) температурного поля, например для расчёта теплопотерь через ограждающие конструкции при расчётном температурном перепаде.

Нестационарная постановка воспроизводит изменение температурного поля во времени, например в массивном бетоне плотины при сезонном температурном воздействии.

Сезонный температурный режим изменяется постоянно, что не позволяет задать начальные условия с помощью стационарного расчёта. Поэтому нестационарный расчёт начинают со среднегодовой температуры, и далее ведётся расчёт за период в несколько лет до тех пор, пока не сформируется температурный режим, совпадающий с данными мониторинга.

Типичным затруднением для моделирования фактического теплообмена является недостаточное оснащение системы мониторинга: часто измеряется температура воздуха, но не измеряется солнечная радиация (актинометрические наблюдения), также оказывающая воздействие на температурный режим ГТС.

Расчёт теплообмена обычно необходим для определения температурного поля в бетонных сооружениях для учёта температурного расширения бетона.

Фильтрационное моделирование определяет параметры насыщения водой и движения воды в сооружении и основании. Исходными данными для фильтрационной МКЭ-модели являются: фильтрационные характеристики материалов (коэффициент фильтрации, пористость, коэффициент остаточной водонасыщенности); ГУ первого рода — напоры воды, например напор на дно водоёма; ГУ второго рода — фильтрационные расходы, например водопонижение с фиксированным расходом откачки; ГУ третьего рода — расходы, зависящие от напора, например поверхность высачивания.

Компьютерный расчёт выполняется по формуле (1) с тем отличием, что вместо $\{u\}$ рассматриваются напоры, а вместо $\{p\}$ — фильтрационные расходы. Аналогично рассматриваются стационарная и нестационарная постановки фильтрационных расчётов.

Стационарная постановка предполагает определение установившегося (постоянного во времени) фильтрационного режима, например фильтрация под плотинной при постоянном уровне верхнего и нижнего бьефов.

Нестационарная постановка учитывает скорость изменения фильтрационного режима во времени, например как скоро опустится депрессионная поверхность после запуска водопонижения.

Для нестационарного расчёта требуется определение начальных условий, в качестве которых обычно используются результаты стационарного расчёта для фильтрационного режима, наблюдавшегося в течение долгого периода времени.

Фильтрационный расчёт позволяет получить следующие типы результатов:

расчёт противодействия на подошву плотины и давления обводнённых грунтов на подпорные сооружения;

определение положения депрессионной поверхности (расчёт повышения уровня грунтовых вод от барражного эффекта, недопущение высачивания на низовой грани плотины);

проверка фильтрационной устойчивости оснований и грунтовых сооружений (скорость фильтрации должна быть ниже допустимой);

расчёт дренажных расходов.

Связное (мультифизическое) моделирование — это совместное применение нескольких видов моделирования для решения общей задачи. В этом случае результаты одного вида моделирования используются в качестве исходных данных для другого вида моделирования. Например, охлаждение бетона зимой на низовой грани плотины по результатам расчёта теплообмена вызывает уменьшение объёма бетона в прочностной задаче. Если свободное деформирование бетона ограничено (случай статически неопределимой задачи), это вызовет увеличение растягивающих напряжений и может привести к трещинообразованию и раскрытию швов.

Связная МКЭ-модель может иметь как одну сетку конечных элементов, которая используется для всех видов моделирования, так и несколько сеток, предназначенных для разных видов моделирования. Использование нескольких сеток целесообразно в случае противоречий между видами моделирования по требованиям к густоте конечно-элементной сетки в разных областях модели.

Некоторые типы связных расчётов имеют специальные названия:

двухфазный расчёт — это связный расчёт прочности и фильтрации;

расчёт термонапряжённого состояния или расчёт термоупругости — это связный расчёт прочности и теплообмена;

расчёт тепломассопереноса — это связный расчёт фильтрации и теплообмена.

Например, для разработки ЦД секции высокой бетонной плотины обычно требуется связная модель: прочности в статической нелинейной постановке, нестационарного теплообмена и нестационарной фильтрации.

Нелинейность — это явление, при котором реакция сооружения (перемещения, деформации, напряжения) не прямо пропорциональна нагрузкам и воздействиям. Это означает, что свойства сооружения непостоянны и, в свою очередь, зависят от нагрузок и воздействий. Учёт этого оказывает опреде-

ляющее влияние на точность компьютерного моделирования.

Различают следующие виды нелинейности: генетическую — моделирование этапности возведения сооружения и приложения нагрузок и воздействий; конструктивную — моделирование взаимодействия частей сооружения между собой, например раскрытие и сдвиг по контакту сооружения с основанием; физическую — изменение прочностных и деформационных свойств материалов в зависимости от напряжённого состояния; геометрическую — влияние деформаций сооружения на расчёт НДС.

В рамках компьютерного моделирования возникает понятие инженерной нелинейности — это приёмы косвенного моделирования нелинейности. Например, понижение модуля деформации железобетона для моделирования трещинообразования.

Учёт различных видов нелинейности значительно повышает достоверность компьютерного моделирования, поэтому имеет большое значение для разработки ЦД.

Машинное обучение цифрового двойника. Цифровой двойник разрабатывается с использованием следующих принципов:

реалистичного моделирования, предполагающего моделирование фактического ГТС вместо его идеализированного проекта, и фактических условий эксплуатации вместо предусмотренных проектом расчётных сочетаний нагрузок и воздействий;

машинного обучения математической модели по данным мониторинга реального сооружения.

Машинное обучение — это обобщённое название методов, характерной чертой которых является уточнение математической модели на основе её применения к исходным данным, для которых априорно известен результат моделирования. Такой постановке задачи точно соответствует монито-

ринг: известно, при каком состоянии сооружения какие наблюдаются показания КИА в настоящий момент и в прошлом.

Параметры КЭ-модели имеют строгий физический смысл и ясные пределы возможных значений, но действительные значения многих параметров, таких как модули деформации, коэффициенты фильтрации или противодействие на подошву плотины, известны неточно. В этом случае проводится калибровка математической модели. Из инженерных соображений определяется, какие параметры могут быть уточнены и в каких пределах возможно их варьирование. Далее путём многовариантных расчётов подбираются такие значения варьируемых параметров, при которых результаты расчёта КЭ-модели совпадают с данными мониторинга.

Например, при уточнении трёх модулей деформации имеем

$$E_1 = [e_{1\min} \dots e_{1\max}],$$

$$E_2 = [e_{2\min} \dots e_{2\max}],$$

$$E_3 = [e_{3\min} \dots e_{3\max}],$$

где E — неизвестные искомые модули деформации; e — значения модулей деформации из интервала варьирования.

Подбор комбинации модулей E_1, E_2, E_3 , при котором будут совпадать расчётные и натурные данные, чрезвычайно ресурсоёмок. Если рассмотреть по пять вариантов каждого модуля, необходимо выполнить $5^3 = 125$ расчётов КЭ модели, при десяти вариантах необходимо $10^3 = 1000$ расчётов.

Для ускорения применяется математическая теория планирования эксперимента (ТПЭ). Вместо перебора всего множества возможных комбинаций e_1, e_2, e_3 выбирается минимальное количество комбинаций, достаточных для построения функции отклика предварительно заданного вида, которая связывает варьируемые параметры с результатом расчёта:

$$F(e_1, e_2, e_3) = R,$$

где $F(e_1, e_2, e_3)$ — функция отклика; R — результат расчёта, выражающий невязку расчётных и натуральных осадок.

Суть функции отклика в том, что для получения результата R при некотором сочетании варьируемых модулей (e_1, e_2, e_3) достаточно произвести вычисление по функции отклика вместо расчёта КЭ-модели.

Таблица 1

Комбинирование параметров для построения квадратичной функции отклика

Число параметров	Количество комбинаций параметров		
	план Бокса — Бенкена	план Бокса — Вильсона	всево возможных комбинаций
2	—	9	9
3	13	15	27
4	25	25	81
5	41	43	243
6	61	77	729
7	85	143	2187

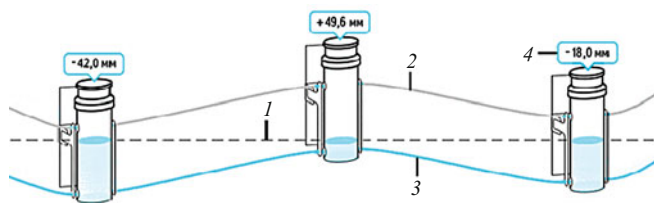


Рис. 7. Принцип работы системы гидростатического нивелирования:

1 — уровень рабочей жидкости в гидравлической системе; 2 — шланг воздушной трассы; 3 — шланг гидравлической трассы; 4 — изменение высотного положения измерительного сосуда от первоначального

В качестве функции отклика используется линейный или квадратичный полином, который при трёх варьируемых параметрах принимает вид

$$F^{(1)}(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1e_1 + b_2e_2 + b_3e_3 + b_4e_1e_2 + b_5e_1e_3 + b_6e_2e_3,$$

$$F^{(2)}(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1e_1 + b_2e_2 + b_3e_3 + b_4e_1e_2 + b_5e_1e_3 + b_6e_2e_3 + b_7e_1^2 + b_8e_2^2 + b_9e_3^2,$$

где b — коэффициенты регрессии, вычисляемые методом наименьших квадратов.

Необходимое количество комбинаций варьируемых параметров для построения функции отклика определяется планом эксперимента (табл. 1).

Далее методами математического анализа функции отклика находится сочетание варьируемых параметров, при котором будут совпадать расчётные и натурные данные:

$$(E_1, E_2, E_3) = \arg \min F(e_1, e_2, e_3).$$

Аналогичный подход применяется к любым параметрам КЭ-модели, таким как характеристики материалов, конфигурации трещин, напластование инженерно-геологических элементов и т.п.

Разработка цифрового двойника на основе данных автоматизированного мониторинга осадок. КИА контролирует ограниченное количество параметров НДС в ограниченном количестве точек сооружения, поэтому задачей проекта мониторинга является выбор оптимального сочетания состава приборов (табл. 2) и количества измерительных точек.

В соответствии с принципом Сен-Венана неравномерность распределения напряжений и деформаций быстро уменьшается с удалением от локальных источников неравномерности. Этот принцип особенно актуален для гидротехнического бетона, отличающегося большой толщиной и массивностью, который в силу трещинообразования имеет выраженную локальную неоднородность и анизотропию.

Поэтому для разработки ЦД наиболее информативны те параметры, которые характеризуют работу сооружения в целом, по сравнению с параметрами, характеризующими работу сооружения локально в точке измерения. В соответствии с табл. 2, работу всего сооружения характеризуют измерения перемещений, а локальную работу в точках измерения характеризуют показатели напряжений и относительных деформаций.

Для плотин, в силу характера НДС, нагрузок и воздействий, основным видом перемещений для оценки состояния сооружения являются осадки (вертикальные перемещения).

Осадки хорошо поддаются автоматизированному измерению в режиме реального времени по тех-

Т а б л и ц а 2

Основные виды инструментальных измерений параметров НДС ГТС

Измеряемый параметр	Способ измерения	Масштаб влияния параметра*	Количество точек наблюдения*	Возможность автоматизации
Осадки (вертикальные перемещения)	Нивелирование	Всё сооружение	+++	+
Плановые перемещения	Прямые и обратные отвесы	Всё сооружение	+	±
Раскрытие швов и подвижки по ним	Щелемеры	Всё сооружение	++	±
Относительные перемещения на базе	Экстензометры, деформометры	База измерения	+	±
Относительные деформации и напряжения в бетоне	Тензометры	Точка измерения	++	±
Усилия в арматуре	Арматурные динамометры	Конструктивный элемент	++	±

* Количество обозначено условно, от “+” до “+++”, с учётом потенциальной возможности проектировать оптимальное количество точек наблюдения в соответствии с задачами проекта мониторинга.

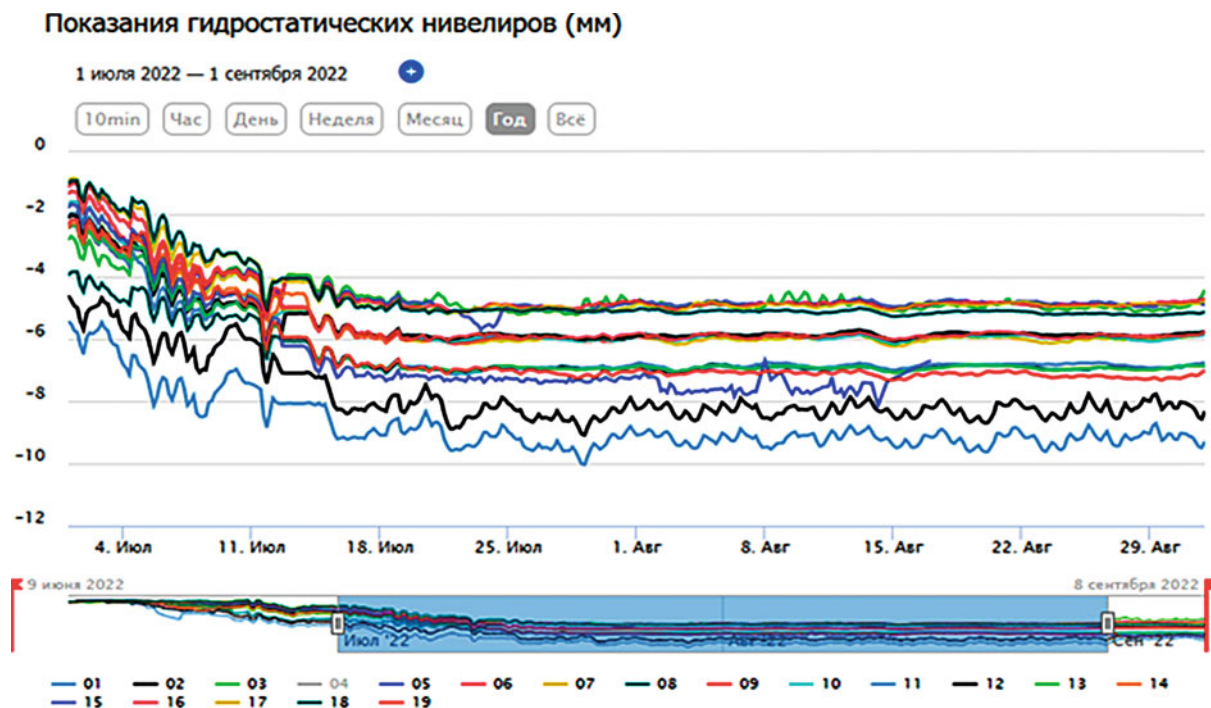


Рис. 8. Представление показаний цифровых гидроstaticических нивелиров в интерактивном графическом интерфейсе через стандартный браузер

нологии гидроstaticического нивелирования, основанной на создании системы сообщающихся сосудов, внутри которых уровень рабочей жидкости занимает равную высотную отметку (рис. 7).

Принятие в международной практике технические характеристики систем автоматизированного гидроstaticического нивелирования строительного назначения полностью соблюдены при разработке новейших отечественных цифровых датчиков гидроstaticического нивелира “Монитрон” [8]. Ключевой инновацией стала разработка отечественной оптико-электронной системы детекции уровня жидкости внутри измерительного сосуда. Это обеспечило значительное уменьшение (до 10 раз) стоимости измерительной аппаратуры по сравнению с зарубежными аналогами, в которых применяются разработанные в прошлом веке дорогостоящие прецизионные струнные преобразователи или винтовые электромеханические датчики уровня жидкости.

Отечественные датчики гидроstaticического нивелира цифровые ДГЦ-19 имеют точность снятия показаний $\pm 0,05$ мм при диапазоне измерений 100 мм с цикличностью 1 раз в минуту. Датчики выпускаются в универсальном исполнении с расширенным температурным диапазоном эксплуатации от минус 65 до плюс 50 °С, с высокой степенью защиты IP 66 (пыленепроницаем, защищён от сильного воздействия струи воды) при базовом сроке службы 15 лет. Датчики обладают современным дизайном и могут быть закамуфлированы под приборы архитектурной подсветки.

Датчик ДГЦ-19 включён в Государственный реестр средств измерений (Госреестр СИ) [9]. Имеются расценки МРР-3.10-20 на применение датчиков в целях автоматизированного геотехнического мониторинга [10].

На стадии испытаний находится модель ДГЦ-22 с дополнительной функцией инклинометра (измерение углов поворота к горизонту).

В силу физического принципа измерений процесс нивелирования не зависит от погодных-климатических условий, нет необходимости в прямой видимости между датчиками. Это в сочетании с высокой цикличностью измерений обеспечивает наивысшую надежность и непрерывность мониторинга осадок на протяжении жизненного цикла сооружения.

Начиная с 2014 г. накоплен опыт применения датчиков “Монитрон” на десятках объектов в России и за рубежом [11 – 16], в частности, в гидротехническом строительстве и при строительстве московского метро в стеснённых условиях городской застройки.

Гидростатические нивелиры интегрируются в существующие АСДК (см. рис. 1) с помощью асинхронного интерфейса физического уровня по стандарту RS-485 и открытого коммуникационного протокола Modbus. Датчики постоянно подключены к компьютерной сети, показания снимаются 1 раз в минуту и передаются на сервер, где результаты измерений в режиме реального времени сопоставляются с критериями оценки.

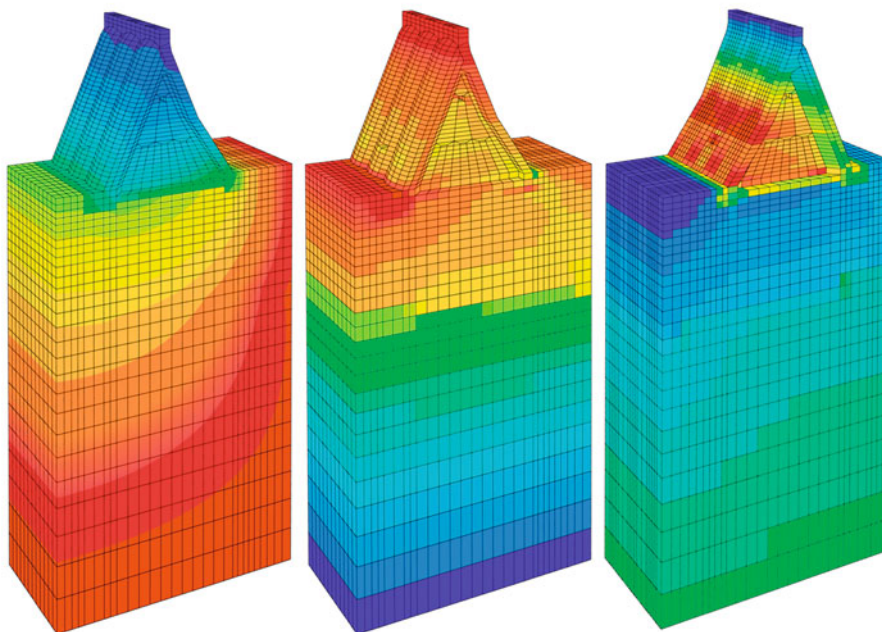


Рис. 9. Прототип цифрового двойника контрфорсной плотины (изополю основных результатов, перечисление слева направо): вертикальные перемещения, горизонтальные напряжения, коэффициент запаса по прочности (вид сзади)

Дальнейшим развитием стала разработка отечественной АИДС “Монитрон” (см. рис. 1). Система представляет собой защищённое облачное программное обеспечение на портале <https://monitron.ru>, работающее в круглосуточном режиме и доступное через стандартный интернет-браузер (из любой операционной системы без установки дополнительного программного обеспечения). Для всех зарегистрированных пользователей обеспечивается онлайн-доступ через интернет к результатам измерения осадок в режиме реального времени. Предусмотрено гибко настраиваемое графическое представление показаний цифровых гидростатических нивелиров (рис. 8). Доступен мощный инструмент для оперативного инженерного анализа осадок и построения графиков. Имеется функционал для настройки регулярных отчетов.

Интернет-браузер может быть запущен на мобильных операционных системах пользовательских устройств (смартфоны на базе iOS и Android), что позволяет эффективно работать с датчиками гидростатического нивелира в полевых условиях.

Облачный сервер постоянно подключён к интернету и сотовой связи. Рассылка уведомлений о нарушении установленных критериев оценки настраивается по различным каналам связи: общедоступным (электронная почта, SMS-оповещения, мессенджер Telegram) и корпоративным (корпоративные мессенджеры типа Slack, Битрикс, Пачка и т.п.).

При необходимости, АИДС “Монитрон” может быть развёрнута на локальном сервере, отключённом от глобальной сети Интернет.

К ноу-хау АИДС “Монитрон” относится возможность интеграции ЦД, что предусматривает автоматизированное сопоставление результатов измерения осадок с обновляемыми критериями оценки согласно проектному коридору. Также реализована возможность обращения к результатам расчётов НДС через АИДС “Монитрон” прямо из интернет-браузера без установки специализированных расчётных программ. Для демонстрации возможностей рассмотренной технологии при внедрении на ГТС разработан прототип ЦД контрфорсной плотины на основе данных цифровых датчиков гидростатического нивелира “Монитрон” (рис. 9).

Благодаря связи с системой мониторинга ЦД постоянно валидируется и находится в актуальном состоянии, согласованном с результатами измерений в точках установки КИА. Таким образом, ЦД воспроизводит НДС всего сооружения с максимальной точностью, опираясь на показания имеющейся КИА.

Выводы

1. Магистральным направлением развития мониторинга (натурных наблюдений) ГТС является автоматизация и цифровизация с переходом к непрерывному контролю НДС с использованием современной автоматизированной телеметрической КИА.

2. Применение автоматизированной телеметрической КИА сопряжено с генерацией большого объёма данных, в связи с чем целесообразно как автоматизировать процесс оценки технического состояния ГТС, так и интеллектуализировать его с помо-

щью цифровых двойников НДС ГТС, разрабатываемых на основе данных мониторинга с использованием современных методов анализа данных (Data Science), в частности машинного обучения (Machine Learning).

3. Цифровой двойник НДС ГТС разрабатывается на основе математического моделирования методом конечных элементов в связанной постановке (при совместном моделировании прочности, теплообмена, фильтрации). Учитываются фактические характеристики материалов и грунтов основания, фактические нагрузки, воздействия и их изменение во времени, в частности уровень бьёфов, динамика температуры воздуха и солнечной радиации, фильтрационный режим. Это необходимо для воспроизведения в математической модели реального сооружения, а не его идеализированного проекта, чтобы достаточно точно прогнозировать изменение НДС по мере изменения нагрузок и воздействий в ходе эксплуатации.

4. Для разработки цифровых двойников НДС ГТС наиболее востребовано автоматизированное измерение вертикальных перемещений характерных точек ГТС, в связи с чем технология цифровых двойников впервые в мировой практике интегрирована в автоматизированную информационно-диагностическую систему мониторинга на основе цифровых датчиков гидростатического нивелира “Монитрон”.

5. Все компоненты системы Монитрон имеют отечественное происхождение, включая цифровые датчики гидростатического нивелира, встроенное программное обеспечение датчиков и облачное программное обеспечение информационно-диагностической системы. Доступ к результатам нивелирования осуществляется с помощью стандартного интернет-браузера на настольных и мобильных устройствах, в любой операционной системе (включая отечественные), без использования стороннего программного обеспечения.

6. В числе задач применения современных автоматизированных систем мониторинга совместно с цифровыми двойниками следует отметить достижение финансового результата, связанного со снижением издержек на страхование (благодаря управлению рисками) и с оптимизацией распределения затрат на планово-предупредительные ремонты.

Список литературы

1. *Федеральный закон “О безопасности гидротехнических сооружений”*.
2. *Commend S., Kivell S., Obrzud R., Podleś K., Truty A. and Zimmermann Th. Computational Geomechanics. Getting Started with ZSoil. PC. 2018.*
3. *Хечумов Р., Кеннлер Х., Прокопьев В. Применение метода конечных элементов к расчёту конструкций. — М.: АСВ, 1994.*
4. *Bate K., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов: Пер. с англ. А. С. Алексеева и др. / Под ред. А. Ф. Смирнова. — М.: Стройиздат, 1982.*
5. *Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / Под ред. Б. Е. Победри. — М.: Мир, 1975.*
6. *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.*
7. *Рубин О. Д., Антонов А. С., Беллендир Е. Н., Кобочкина Е. М., Котлов О. Н. Разработка расчётного модуля программно-аппаратного комплекса для обеспечения безопасности взаимовлияющих ГТС // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. № 2. Т. 15. С. 96 – 105.*
8. *Патент РФ RU 2 748 721 C1. Датчик гидростатического нивелира с расширенным диапазоном работы.*
9. *Датчики гидростатического нивелира цифровые ДГЦ-19. Регистрационный № 82892-21.*
10. *Московские региональные рекомендации. Глава 3. Изыскательские работы: Сборник 3.10 Автоматизированный геотехнический мониторинг. МРР-3.10-20.*
11. *Александров А. В., Беллендир Е. Н., Вавер П. А., Симутин А. Н. Опытное обоснование выравнивания здания Загорской ГАЭС-2 // Гидротехническое строительство. 2018. № 8. С. 7 – 16.*
12. *Зерцалов М. Г., Симутин А. Н., Александров А. В. Расчётное обоснование управляемого компенсационного нагнетания при подъёме модели фундаментной плиты Загорской ГАЭС-2 // Гидротехническое строительство. 2018. № 8. С. 2 – 6.*
13. *Меркин В. Е., Пичугин А. А., Медведев Г. М., Мильчевский П. С., Симутин А. Н., Хотеев Е. А. Система комплексного автоматизированного геотехнического мониторинга и опыт её применения при строительстве подземных сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2021. № 3. С. 17 – 21.*
14. *Симутин А. Н., Дейнеко А. В., Зерцалов М. Г. Опыт использования отечественной автоматизированной системы гидростатического нивелирования “Монитрон” при мониторинге гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2021. № 5. С. 14 – 19.*
15. *Симутин А. Н., Дейнеко А. В., Медведев Г. М. Отечественная автоматизированная система гидростатического нивелирования “Монитрон” для мониторинга ГТС (на примере мониторинга шлюза № 9 канала им. Москвы) // Гидротехника. 2021. № 3. С. 4 – 8.*
16. *Симутин А. Н., Медведев Г. М., Хотеев Е. А., Дейнеко А. В. Опыт применения российских автоматизированных датчиков гидростатического нивелира при мониторинге вертикальных перемещений // Фундаменты. 2022. № 2. С. 21 – 24.*