

Колотовичев Юрий Александрович (Москва). Кандидат технических наук. Доцент кафедры «Строительная и теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26. НИУ МГСУ), директор по научной работе ООО «СОДИС ЛАБ» (121205, Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, 5). РИНЦ ID: 829386, SCOPUS: 57209541589, ORCID: 0000-0002-4030-2893, WoS Researcher ID: AAC-3892-2022. Эл. почта: ykol@sodislab.com.

Шахрамьян Андрей Михайлович (Москва). Кандидат технических наук. Генеральный директор ООО «СОДИС ЛАБ» (121205, Москва, территория Инновационного центра «Сколково», ул. Нобеля, 5). РИНЦ ID: 478927, SCOPUS: 57217098689. Эл. почта: info@sodislab.com.

Гаспарянц Рубен Саргисович (Москва). Доктор технических наук. Заместитель генерального директора АО «Институт Оргэнергострой» (115114, Москва, Дербенёвская набережная, д. 7, стр. 10). Эл. почта: gasparyants@ioes.ru.

Сокоушин Игорь Геннадьевич (Иваново). Директор по капитальному строительству ПАО «ЮНИПРО» (628406, Российская Федерация, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, город Сургут, ул. Энергостроителей, дом 23, соор. 34). Эл. почта: sokoushin_I@unipro.energy.

Yury A. Kolotovich (Moscow). Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics at Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU. 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation), R&D Director at SODIS LAB (5, Nobel street, Skolkovo Innovation center, Moscow 121205, Russia), ID RISC: 829386, SCOPUS: 57209541589, ORCID: 0000-0002-4030-2893, WoS Researcher ID: AAC-3892-2022. E-mail: ykol@sodislab.com.

Andrey M. Shakhramanyan (Moscow). Candidate of Technical Sciences, CEO at SODIS LAB (5, Nobel street, Skolkovo Innovation center, Moscow 121205, Russia). ID RISC: 478927, SCOPUS: 57217098689. E-mail: info@sodislab.com.

Ruben S. Gasparyants (Moscow). Doctor of Technical Sciences, Deputy Director General at JSC Institute «Orgenergostroy» (7, build 10, Derbenevskaya emb, Moscow 115114, Russia). E-mail: gasparyants@ioes.ru.

Igor G. Sokoushin (Ivanovo). Director for Construction at Unipro PJSC (628406, Russian Federation, Khanty-Mansiysk Autonomous region – Yugra, Surgut, Energostroyteley Street, Building 23, Unit 34). E-mail: sokoushin_I@unipro.energy.

© Колотовичев Ю.А., Шахрамьян А.М., Гаспарянц Р.С., Сокоушин И.Г., 2022.
Academia. Архитектура и строительство, № 2, стр. 99–110.

Автоматизированный мониторинг конструкций аварийного энергоблока Березовской ГРЭС

Берёзовская ГРЭС, расположенная в Шарыповском районе Красноярского края, является самой мощной тепловой электростанцией региона (три энергоблока по 800 МВт). Электростанция работает в составе объединённой энергетической системы (ОЭС) Сибири с 1987 года, вырабатывая 4,6% её установленной мощности.

1 февраля 2016 года в котельном отделении энергоблока № 3 произошел пожар, вызвавший масштабные разрушения несущих конструкций и технологического оборудования. Эксплуатация энергоблока была прервана для проведения уникальных по сложности ремонтно-восстановительных работ.

Впервые в России при разборке завалов и демонтаже повреждённых конструкций было решено организовать комплекс мероприятий по постоянному мониторингу напряжён-

но-деформированного состояния (НДС) несущих конструкций для обеспечения безопасности персонала, задействованного при проведении работ.

В статье приводится общая информация о проектных и организационных решениях по внедрению системы автоматизированного мониторинга НДС конструкций котельного отделения энергоблока №3 Берёзовской ГРЭС филиала ПАО «Юнипро». Даны подробные сведения об архитектуре системы, описаны применяемое оборудование, методика проведения измерений, программное обеспечение и регистрируемые с его помощью параметры состояния восстанавливаемого сооружения.

Особое внимание уделено опыту валидации конечно-элементной модели несущего каркаса энергоблока по результа-

там инструментального мониторинга. Предложена инженерная методика оценки горизонтального смещения консольных сооружений по данным инклинометрических наблюдений. Приведены некоторые результаты неразрушающего контроля металлоконструкций, которые помогли определить оптимальную схему проведения автоматизированных измерений.

Ключевые слова: Берёзовская ГРЭС, СМДС, СММК, система мониторинга конструкций, ремонт, ремонтно-восстановительные работы, авария, программное обеспечение, пожар, огневое воздействие.

Automated Structural Health Monitoring System of Beresovskaya GRES

Berezovskaya GRES (BGRES), located in the Sharypovsky district of the Krasnoyarsk Territory, is the most powerful coal-fired power station in the Krasnoyarsk Region (3 power units of 800 MW each). The power plant has been operating as part of the Unified Energy System of Siberia since 1987, generating 4.6% of its capacity.

On February 1, 2016, an accidental fire occurred in the boiler room of power unit No. 3, which caused the large-scale destruction of load-bearing structures and technological equipment. The operation of the power unit was interrupted for carrying out repair and restoration work of unique complexity.

For the first time in Russia, an extensive monitoring program was implemented for continuous structural stress and displacement observations to ensure the safety of the personnel involved in the debris removal and dismantlement of hazardous structural elements.

The paper provides general information on design and organizational solutions for implementing the Beresovskaya GRES automated structural health monitoring system. Detailed information on the system's hardware, software, principal architecture, and topology is given. The instrumentation and the monitoring technique are described.

The study focused on the numerical model's validation results based on real-world data. An engineering technique for estimating the horizontal displacement of cantilever structures based on in-place clinometric observations is proposed. Actual structural members' non-destructive testing results are presented, which helped determine the optimal scheme for automated measurements.

Keywords: Beresovskaya GRES, Structural Health Monitoring, Post-fire, SHM Software, Rehabilitation, Monitoring Program, SHM, Finite element model updating.

Введение

Берёзовская ГРЭС (БГРЭС) – тепловая электростанция установленной мощностью 2400 МВт (три энергоблока по 800 МВт), расположенная на берегу Берёзовского водохранилища в городе Шарыпово, в северо-западной части Красноярского края России (рис. 1), – является градообразующим предпри-

ятием, вырабатывает 15% электроэнергии региона, известна применением уникальных для энергетического строительства проектных и технологических решений.

БГРЭС работает на бурых углях, которые поступают на электростанцию непосредственно с Берёзовского месторождения Канско-Ачинского бассейна по двум 14-километровым открытым конвейерам.

Возведение первых двух энергоблоков БГРЭС проводилось в период с 1976 по 1991 год, затем финансирование проекта было прервано более чем на двадцать лет. Строительство третьего энергоблока стартовало в 2011 году под руководством нового собственника – ПАО «Юнипро» (до 2016 года – ОАО «Э.ОН Россия») и завершилось введением в эксплуатацию в третьем квартале 2015 года.

Главный корпус энергоблока № 3 (рис. 2) имеет рамно-связевой стальной каркас, основным элементом которого являются девять поперечных рам со сварными колоннами двутаврового сечения, расположенные с шагом 12 м. Высота сооружения – 122 м. В поперечном направлении здание состоит из семи пролётов общей шириной 171 м. Котёл высотой 120 м и весом более 25 тыс. тонн подвешен на хребтовых балках пролётом 33 м, выполненных в виде сварных двутавров переменной высоты – от 4,2 до 6,0 м.

Первого февраля 2016 года в котельном отделении (КО) третьего энергоблока вспыхнул сильный пожар, распространившийся на площади 850 м². К тушению, продолжавшемуся шесть часов, привлекли 341 человека и 98 единиц техники [1]. В результате действий ликвидаторов возгорание было локализовано в пределах третьего энергоблока и не затронуло энергоблоки № 1 и № 2. Благодаря принятым эксплуатационными службами станции оперативным мерам при аварии никто не пострадал, но часть котельно-вспомогательного оборудования вместе с котлоагрегатом энергоблока № 3 оказались выведенными из строя [2].

Пожар уничтожил часть технологического оборудования и сильно повредил конструкции, вызвав обширные обрушения несущих и ограждающих элементов, фрагментов инженерных систем (рис. 3 а). В связи с повреждением хребтовых балок произошло неконтролируемое перемещение котла до контакта с колоннами поперечных рам. На нижних горизонтах КО скопилось большое количество обломков, заблокировавших доступ к наиболее пострадавшим пролётам (рис. 3 б).

Вскоре после инцидента было проведено детальное обследование, включающее контраварийные мероприятия, раскрепление и усиление повреждённых конструкций, неразрушающий контроль параметров элементов каркаса и фундаментов. Ключевым результатом этих мероприятий явилось понимание, что большинство несущих конструкций за пределами зоны обрушения может быть сохранено или отремонтировано. В сентябре 2016 года совет директоров ПАО «Юнипро» [3] утвердил инвестиционный проект по восстановлению третьего энергоблока.

Масштабы и характер разрушений КО, его конструктивная связь с эксплуатируемыми частями станции, массогабарит-

ные характеристики несущих конструкций и оборудования в совокупности потребовали безусловного применения дополнительных мер для обеспечения безопасного нахождения людей в зоне аварии при производстве ремонтно-восстановительных работ.

Демонтажные работы осложнились невозможностью определить фактическое напряжённо-деформированное состояние (НДС) каркаса КО до полного разбора завалов и проведения комплекса визуально-инструментальных обследований. Создалась опасная неопределённость в работе несущих



Рис. 1. Берёзовская ГРЭС. Внешний вид и расположение (источник: [4])

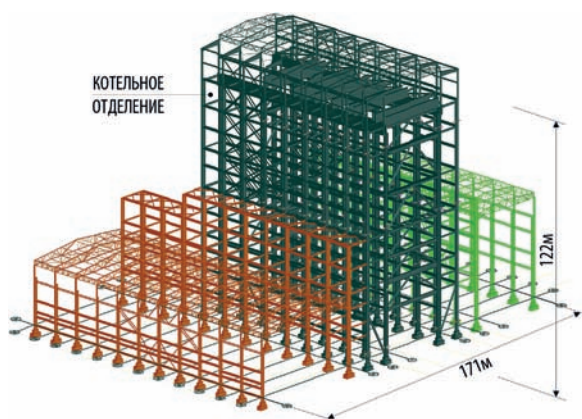
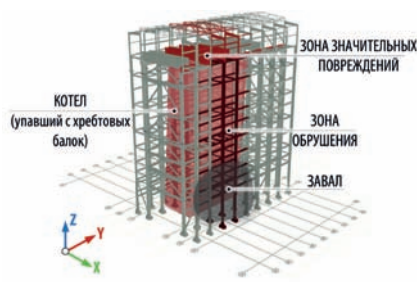


Рис. 2. Несущий каркас главного корпуса энергоблока № 3 (источник: [4])



а)



б)

Рис. 3. Разрушения в котельном отделении: а) фото с натуры авторов статьи. 2016 год; б) схема повреждений в результате пожара

конструкций, подвергаящая дополнительному риску всех, кто по долгу службы обязан был находиться в зоне обрушения.

По решению технического совета с участием специалистов ПАО «Юнипро» и АО «Институт «Оргэнергострой» для обеспечения безопасного производства ремонтных работ был организован комплекс мероприятий по определению фактического НДС каркаса КО, включающий отбор проб металла для лабораторного анализа механических свойств после огневого воздействия, устройство автоматизированной системы мониторинга напряжённо-деформированного состояния несущих конструкций (СМДС) и расчётное сопровождение (создание расчётной модели и её валидация с учётом данных лабораторных исследований и инструментального мониторинга) [4].

В реализации мероприятий по определению НДС каркаса принимали участие специалисты ООО «СОДИС ЛАБ», кафедры «Строительной и теоретической механики» и научно-исследовательской лаборатории «Надёжность и сейсмостойкость сооружений» НИУ МГСУ, ЗАО ЦНИИПСК им. Мельникова, ООО «Проектстальконструкция» (Екатеринбург), ООО «СибПСК» (Новокузнецк).

СМДС КО была передана в эксплуатацию подрядчику 14 апреля 2017 года. В течение последующих 18 месяцев во время активной фазы производства демонтажных работ производилась актуализация пространственной конечно-элементной (КЭ) модели здания в аварийном состоянии с учётом накопленных данных мониторинга для подтверждения безопасности выполнения ремонтно-восстановительных работ. В октябре 2018 года система мониторинга была перенастроена для использования оперативным персоналом электростанции во время монтажа технологического оборудования и дальнейшей нормальной эксплуатации энергоблока.

Процесс возрождения ГРЭС занял почти четыре года: в ноябре 2019 года были успешно проведены гидравлические испытания котла, а к концу мая 2021 года крупнейшая теплоэлектростанция в регионе вышла на свою полную проектную мощность.

Цель публикации данной статьи – раскрыть некоторые детали подхода к устранению неопределённостей в работе несущих конструкций с помощью современных технологий мониторинга и компьютерного моделирования.

Материалы и методы

Необходимым для разработки программы мониторинга, КЭ-моделей и компьютерной симуляции процесса разрушения являлось обследование фактического состояния несущих конструкций КО после пожара (в аварийном состоянии каркаса). Источниками неопределённостей, которые необходимо было устранить перед началом восстановительных работ, являлись физико-механические свойства сталей и накопленные деформации в основных конструктивных элементах [5; 6].

На первом шаге разработки программы мониторинга был выполнен анализ результатов неразрушающего контроля параметров конструкций (СибПСК, 2016), которые позволили

дать предварительную оценку напряжений и деформаций конструктивных элементов.

Напряжения в полках доступных колонн на нижних отметках (+2,000) определялись механическим методом освобождения [7], подразумевающим необходимость сверления цилиндрических глухих отверстий и измерения деформации тензорезисторами до и после сверления (рис. 4). Полученные (рис. 5) данным методом сжимающие напряжения оказались значительно ниже предела текучести, который по уточнённым данным (ЦНИИПСК, 2016) находился в диапазоне 346–516 МПа в зависимости от колонны.

Большим недостатком метода освобождения является невозможность определить источник возникновения измеренной деформации, которая может быть результатом действия внешних нагрузок или являться остаточной, вызванной технологией производства стали, сваркой или быстрым изменением температуры. Например, аномальные растягивающие напряжения (до 100 Мпа) были обнаружены в колонне Е-17. Близость к очагу возгорания позволяет предположить, что этот результат был следствием неравномерного остывания поверхности колонны после пожара.

В качестве неразрушающей альтернативы методу освобождения, действующие в стальных конструкциях напряжения были оценены методом магнитной коэрцитиметрии [8]. Эта методика использует модель Е.И. Кондорского [9], устанавливающую прямую взаимосвязь между коэрцитивной силой и амплитудой действующих напряжений в материале.

При обследовании магнитных характеристик было изучено 161 поперечное сечение различных типов конструктивных элементов в КО. В среднем для каждого сечения выполнялось 20 измерений коэрцитивной силы (пять точек, по четыре направления в каждой). Максимальное измеренное значение коэрцитивной силы $H_c^{\max}$ сравнивалось с критическими коэрцитивными силами H_c^y (соответствующими пределу текучести) и H_c^u (соответствующими пределу прочности).

Анализ полученных данных (рис. 6) показал, что коэрцитивные силы в двух колоннах Е-15 (отм. +92,500) и Е-16 (отм. +75,500 и +91,500) превышали H_c^y . Этот результат говорит о вероятности наличия пластических деформаций на указанных отметках. Тот же самый вывод можно было сделать в отношении колонны В-15 (отм. +55,000), где измеренная коэрцитивная сила оказалась всего на несколько процентов меньше, чем соответствующая пределу текучести.

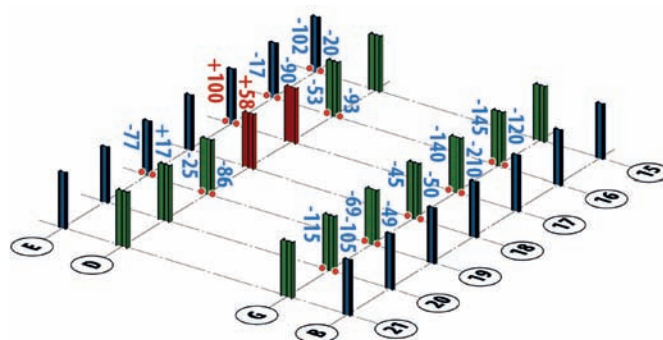
Главным ограничением магнитной коэрцитиметрии является неоднозначность изменений коэрцитивной силы в ферромагнитных сталях. Множество исследователей [10–12] указывают, что коэрцитивные свойства зависят от технологии производства стали, температурного воздействия, типа деформации и других факторов, непосредственно влияющих на микроструктуру сталей. Это ограничение в совокупности с недостатком экспериментальных данных о коэрцитивных параметрах сталей, применённых в проекте энергоблока, не позволило количественно оценить уровень напряжений в

конструкциях. Поэтому при разработке программы мониторинга мы рассматривали данные коэрцитиметрии только как индикатор вероятного наличия пластических деформаций.

Георадиолокационное сканирование скрытых конструкций показало, что последствия пожара не затронули столб-

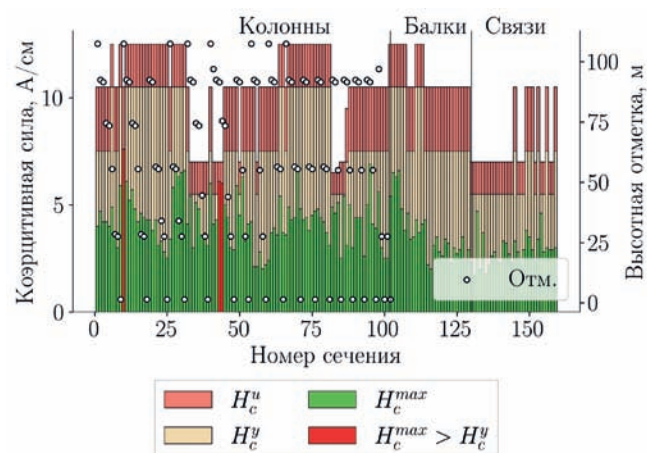


Рис. 4. Розетка тензорезисторов в глухом отверстии (источник: СибПСК)



Синим цветом показаны сжимающие напряжения, красным – растягивающие. Темно-красным цветом показаны колонны, обрушившиеся в ходе пожара

Рис. 5. Диаграмма распределения нормальных напряжений на отметке +2,000, полученных методом освобождения, МПа (данные для анализа: СибПСК)



Значения H_c^y и H_c^u получены из [8]. Для марок сталей, отсутствующих в указанной статье, взяты данные для сталей с похожей микроструктурой

Рис. 6. Результаты магнитной коэрцитиметрии (данные для анализа получены СибПСК)

чатые фундаменты колонн каркаса КО за пределами зоны обрушения, не было обнаружено нарушений целостности или изменений глубины заложения.

На следующем этапе работ в зоне огневого воздействия механически были отобраны 200 проб из потенциально неповреждённых конструкций для проведения лабораторных металлографических исследований, химического и дюрометрического анализа, а также для определения температуры хрупкого разрушения (ЦНИИПСК, 2016). Лабораторный анализ не обнаружил металлургических дефектов в структуре металла исследованных проб, но у 4% образцов, отобранных в верхних частях колонн на отм. +112,000, были выявлены изменения в микроструктуре, характерные для воздействия высоких температур. Последующие исследования показали, что обнаруженные изменения не привели к заметным уменьшениям прочностных характеристик. Подобный результат не является необычным в том случае, если материал подвергался воздействию температур ниже 600°C [13; 14]. Для определения минимального предела текучести были уточнены марки стали образцов (эквивалентны S325–S390 по EN 10025¹).

Совместная обработка данных неразрушающего контроля конструкций аварийного котельного отделения и лабораторных тестов позволила сделать следующие выводы:

– изучение образцов подтвердило, что огневое воздействие пренебрежимо мало повлияло на жёсткость и прочность механически не повреждённых частей каркаса.

Таблица 1. Результаты КЭ-анализа работы энергоблока в стадии нормальной эксплуатации на действие проектных вертикальных нагрузок. В скобках указаны перемещения от совместного действия вертикальных нагрузок и ветра²

Параметры	КЭМ 1 ³	КЭМ 2 ⁴	КЭМ 3 ⁵
Перемещения (максимальные), мм			
Вертикальное, Z ⁶	196 (197)	210 (193)	175
Горизонтальное, X	53 (168)	55 (188)	70
Горизонтальное, Y	126 (224)	142 (215)	110
Продольные силы (максимальные), тс			
Колонны В, Е	2900	3230	2713
Колонны Г, Д	5279	5160	5263
Изгибающие моменты (максимальные) M _y , тс·м			
Колонны В, Е	760	676	444
Колонны Г, Д	890	1040	985

¹ EN 10025 : 2004 – Европейский стандарт на изделия горячекатаные из конструкционных сталей (https://emk24.ru/wiki/euronorm_en/en_10025_3496129/; <https://inkomet.ru/spravochnik/en-10025-konstrukcionnyie-stali>).

² Данные для сопоставления получены НИУ МГСУ и СибПСК, модифицированы.

³ Создана с помощью ПО SCAD Office.

⁴ Создана с помощью ПО ЛИРА 9.6.

⁵ Создана с помощью ПО ANSYS LS-DYNA.

⁶ Система координат показана на рисунке 3 б.

Лабораторный анализ позволил актуализировать необходимый набор характеристик материалов для последующего КЭ-моделирования и конфигурирования программного обеспечения СМДС, включая модуль упругости, пределы текучести и прочности;

– результаты неразрушающего контроля (см. рис. 5, 6) показали, что полная деформация неповреждённых элементов металлоконструкций осталась упругой даже после пожара, за исключением ограниченного числа локальных зон, где были возможны проявления пластических эффектов. Этот вывод позволил рассматривать линейные КЭ-модели для изучения работы под нагрузкой сохраняемых и заменяемых конструкций;

– так как георадиолокационное сканирование не подтвердило наличие повреждений фундаментов колонн каркаса или изменений в подстилающем грунте, то при последующем численном моделировании игнорировались эффекты взаимодействия металлоконструкций с основанием;

– некоторые существенные результаты применения методов неразрушающего контроля оказались противоречивы, а их физические ограничения не позволили выделить ту долю накопленной в конструкциях деформации, которая вызвана действием только внешних нагрузок. Поэтому полученную информацию невозможно было использовать для целей мониторинга напряжений и внутренних усилий в процессе производства ремонтно-восстановительных работ.

Хотя детальное обследование позволило уменьшить ряд неопределённостей в фактическом состоянии КО после пожара, внутренние усилия, действующие в основных конструктивных элементах повреждённого каркаса, в основном, остались неизвестными. Единственным реальным инструментом, способным дать количественную оценку этих параметров НДС, необходимых для разработки программы мониторинга и обеспечения безопасности демонтажа, являлся конечно-элементный анализ.

Разработка КЭ-модели КО в повреждённом состоянии, которая бы адекватно отражала реальность, оказалась сложной многоэтапной задачей из-за невозможности с достаточной точностью определить действующие нагрузки и жёсткости отдельных наиболее разрушенных участков.

На первом этапе две независимые группы инженеров НИУ МГСУ и СибПСК выполнили линейный статический и модальный анализы конструктивной схемы энергоблока под действием хорошо известных проектных нагрузок, соответствующих режиму нормальной эксплуатации (до пожара). Изучение работы неповреждённого каркаса позволило оценить сходи-

мость результатов расчёта двух независимых моделей КЭМ 1 и КЭМ 2. Полученные данные показали хорошее совпадение значений перемещений и внутренних усилий (табл. 1), но обнаружили серьёзное различие в спектре частот собственных колебаний (рис. 7) при схожих формах. Динамической неэквивалентностью моделей посчитали возможным пренебречь, так как основной целью моделирования было установление фактического НДС основных металлоконструкций в статическом состоянии после аварии. Тем не менее базовые параметры моделей были уточнены, чтобы исключить появление значительных ошибок при более сложных расчётах.

На втором этапе работ коллективом специалистов НИУ МГСУ была разработана физически и геометрически нелинейная КЭ-модель (КЭМ 3) энергоблока в состоянии, соответствующем моделям, разработанным на первом этапе. Анализ НДС металлоконструкций с помощью КЭМ 3 выполнялся прямым динамическим методом. Внешние нагрузки прикладывались путём изменения амплитуд от нуля до своего конечного значения за 1,5 секунды (в два-три раза короче периода основного тона, что эквивалентно их статическому приложению). Полученные после затухания колебательного процесса перемещения и внутренние усилия показали удовлетворительное совпадение с линейными моделями КЭМ 1 и КЭМ 2 (см. табл. 1), что позволило использовать КЭМ 3 в качестве основы для дальнейшего моделирования (КЭМ 4) аварийных воздействий на сооружение и проведения расчётного обоснования ремонтно-восстановительных работ.

Моделирование разрушения конструкций каркаса выполнялось с учётом контактного взаимодействия между элементами модели с помощью явных схем прямого интегрирования уравнений движения. Учитывались статические нагрузки и огневое воздействие (включая изменение физикомеханических свойств с ростом температуры). Выключение из работы стальных элементов производилось по критерию достижения ими предельных пластических деформаций. Внутренние усилия N_{or} , M_{y0} и M_{z0} в основных колоннах КО, полученные в результате расчёта после затухания всех переходных процессов, были приняты в качестве начальных для системы мониторинга деформаций в составе СМДС, так как тензометрический метод не позволяет получить значения внутренних усилий в существующих конструкциях прямыми измерениями (неизвестными оказываются деформации, накопленные к моменту установки датчиков).

Результаты

Собранная в ходе проведения инструментальных и визуальных обследований, полевых и лабораторных тестов информация вместе с результатами численного моделирования стала фундаментом программы мониторинга КО в ходе выполнения ремонтно-восстановительных работ.

Для повышения безопасности демонтажа конструкций в программе мониторинга были предусмотрены мероприятия для измерения усилий и напряжений в колоннах поперечных

рам КО (оси В-Е на рисунке 8 а), а также для наблюдения за изменением пространственного положения упомянутых колонн в реальном времени для экстренного реагирования на нештатные ситуации и для своевременной эвакуации персонала из опасной зоны

Измерительное оборудование сосредоточили на четырёх отметках (монтажных горизонтах) в пределах котельного отделения (рис. 8 а), чтобы добиться компромисса между удобством обслуживания системы и качеством получаемых данных.

Для мониторинга нагрузки на колонны был выбран тензометрический метод с использованием струнных датчиков деформации. Датчики объединили в измерительные группы (створы) для расчёта внутренних усилий и напряжений в любой точке контролируемого сечения. Подтверждённое отсутствие пластических деформаций в большинстве наблюдаемых сечений позволило ограничиться двумя тензометрами в каждом створе, установленными в осевом (вертикальном) направлении (рис. 8 б).

Датчики деформации установили на полки колонн с помощью сварки и накрыли стальным уголком для защиты от механических повреждений в процессе проведения ремонтных работ (рис. 9 а). Полость между колонной и уголком заполнили монтажной пеной, чтобы исключить случайное попадание на датчик раскалённых частиц при огневых работах.

Для мониторинга перемещений колонн на верхних горизонтах смонтировали двухосевые микроэлектромеханические наклонометры. Совместность перемещений наклонометров и конструкций в условиях строгих запретов на сверление обеспечили приваркой к стенкам колонн монтажных пластин с резьбовыми отверстиями для крепления приборов и защитных шкафов-укрытий. Шкафы не имеют прямого контакта с наклонометрами для исключения смещений чувствительных элементов при механическом воздействии на укрытие (рис. 9 б).

Показания со всех датчиков, входящих в состав системы мониторинга, снимаются автоматически с помощью распределённой по котельному отделению системы сбора данных (рис. 10), состоящей из программируемых контроллеров с внутренней памятью (даталоггеров) и электромеханических релейных блоков (мультиплексоров). Даталоггеры передают результаты измерений и диагностическую информацию на сервер системы мониторинга, размещённый в безопасной зоне блочного щита управления (БЩУ), заблокированного с аварийным энергоблоком.

На время реализации проекта с помощью программного обеспечения (ПО) SODIS Building M4 была создана единая информационная среда [4] для сопровождения ремонтно-восстановительных работ, которая автоматизировала все основные операции и обеспечила оперативной информацией заинтересованные стороны в режиме онлайн (рис. 11, 12).

Доступ к данным мониторинга осуществляется с помощью клиентской части ПО, развёрнутого на локальных и удалённых автоматизированных рабочих местах (АРМ) операторов (рис. 13 а). Рабочее место диспетчера разместили в центральной диспетчерской БЩУ (рис. 13 б).

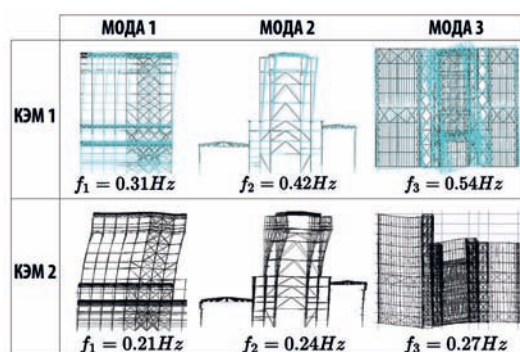
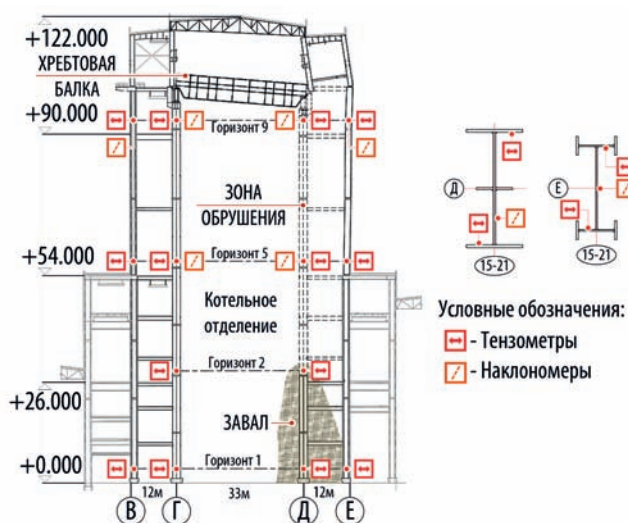


Рис. 7. Результаты модального анализа энергоблока в стадии нормальной эксплуатации (до повреждений). Схемы получены НИУ МГСУ и СибПСК



а) б)

Рис. 8. Расположение контрольно-измерительной аппаратуры: а) на поперечных рамах каркаса КО; б) в сечениях колонн каркаса КО. Схемы авторов статьи



а) б)

Рис. 9. примеры установки датчиков: а) тензометр в проектом положении; б) наклономер в проектом положении

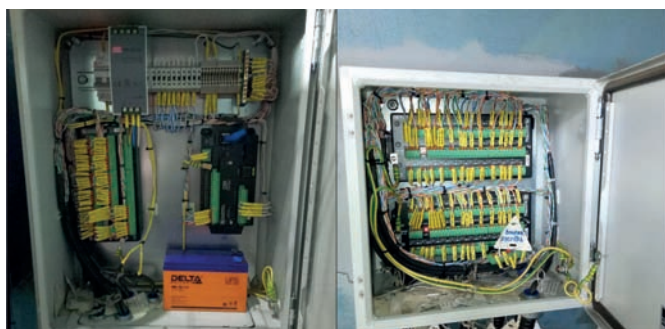


Рис. 10. Компоненты системы сбора данных

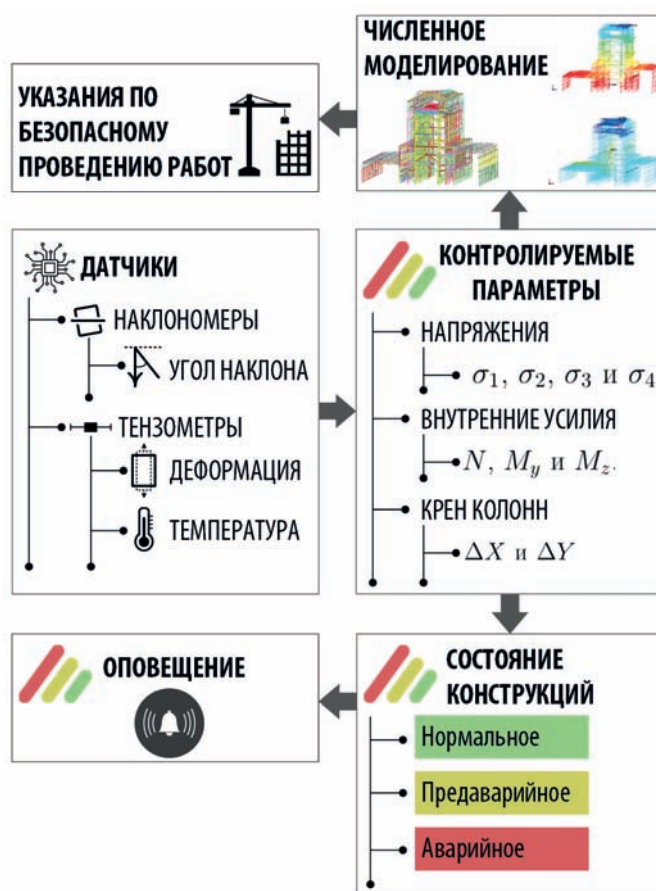


Рис. 11. Схема информационных потоков системы мониторинга



Рис. 12. SODIS Building M4: пользовательский интерфейс оператора

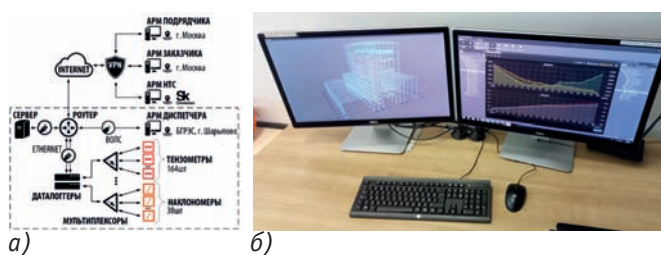


Рис. 13. Система мониторинга: а) структурная схема; б) рабочее место диспетчера в БЩУ

Ввод системы мониторинга в эксплуатацию выполнялся последовательно в две очереди. До окончания ремонтно-восстановительных работ в ячейке третьего энергоблока установили 120 датчиков деформации и 30 наклономеров. После окончания ремонта энергоблока систему дополнили 44-мя датчиками деформации и 8-ю наклономерами, которые смонтировали на восстановленных элементах конструкций.

Для контролируемых параметров КО установили допустимые интервалы изменения (уставки), чтобы успеть оповестить оперативный персонал станции о нештатных ситуациях, которые могли возникнуть в ходе ремонтно-восстановительных работ (рис. 14).

Расчёт действующих в колоннах КО внутренних усилий N , M_y и M_z и экстремальных значений нормальных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 и σ_4 в угловых точках сечений (рис. 15) автоматизирован с помощью ПО системы мониторинга и выполняется по схеме, приведённой в [4], в предположении о линейно упругой работе материала колонн (подтверждено результатами обследования). Эти четыре напряжения были выбраны в качестве основного критерия для определения технического состояния каркаса.

ПО сконфигурировали таким образом, чтобы переход колонн в предаварийное или аварийное состояние происходил, если напряжения в любой точке контролируемых сечений достигали величины большей (по модулю), чем соответствующая уставка.

Аварийная (красная) уставка получена делением предела текучести материала колонны на коэффициент надёжности по материалу равный 1,05. Предаварийная (жёлтая) уставка получена делением «красной» уставки на коэффициент надёжности по ответственности – 1,1. Значения предела текучести получены на основе лабораторного исследования проб, выполненного коллективом ЦНИИПСК, а в тех местах, где образцы материала не отбирались, по данным нормативных документов.

Величины внутренних усилий сохранялись в базе данных СМДС для последующего инженерного анализа. Вследствие возможного появления одинаковых напряжений в сечении при различных комбинациях внутренних усилий, отдельные уставки на усилия не задавались.

В апреле 2017 года система мониторинга деформаций помогла выявить и предотвратить аварийную ситуацию [4], которая могла возникнуть на отм. +93,000 в колонне Д-16, когда напряжение в одной из точек контролируемого сечения скачкообразно достигло опасных значений, не спрогнозированных в ходе расчётного сопровождения демонтажных работ (рис. 16). В результате, колонна была дополнительно раскреплена и включена в программу геодезического мониторинга.

Задача по определению пространственного перемещения колонн каркаса с помощью двухосевых наклономеров имеет такую же особенность, как и описанный тензометрический метод измерения деформаций, – необходима фиксация начального (нулевого) состояния. За нулевое было принято состояние каркаса на 1 мая 2017 года (окончание пуско-наладочных работ по системе мониторинга кренов). Далее в процессе мониторинга отслеживались изменения углового

перемещения колонн по отношению к начальному состоянию (рис. 17). Карты траекторий [4] предоставляли возможность определить характер и направление смещения колонн (рис. 18) в каждый момент времени.

По просьбе заказчика, для повышения информативности результатов мониторинга пространственного положения колонн была разработана и применена упрощённая методика расчёта горизонтальных перемещений в точках установки наклономеров:

- принимается, что колонны каркаса длиной L работают как консольные балки с изгибной жесткостью EJ , нагруженные в горизонтальном направлении равномерно распределённой по длине нагрузкой интенсивностью q_{equiv} (рис. 19);
- в качестве физической модели деформирования ствола колонны принимается уравнение технической теории изгиба Эйлера-Бернулли:

$$M(x) = EJ \frac{d^2 y}{dx^2}; \quad (1)$$

- интегрируя уравнение (1) с учётом граничных условий и внешней нагрузки, получаем выражения для определения угловых деформаций $\varphi(x)$ и горизонтальных перемещений $y(x)$ в любой точке x колонны:

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \int \frac{M(x)}{EJ} dx = \\ &= \frac{q_{equiv}}{2EJ} \cdot \left(L^2 \cdot x - L \cdot x^2 + \frac{x^3}{3} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y(x) &= \int dx \int \frac{M(x)}{EJ} dx = \\ &= \frac{q_{equiv}}{24EJ} \cdot (x^4 - 4L \cdot x^3 + 6L^2 \cdot x^2), \end{aligned} \quad (3)$$

- эквивалентная нагрузка q_{equiv} определяется из (2) на основании показаний ϕ наклономера:

$$q_{equiv} = \frac{\phi \cdot 2EJ}{L^2 \cdot h_{tilt} - L \cdot h_{tilt}^2 + \frac{h_{tilt}^3}{3}}, \quad (4)$$

где h_{tilt} – высотная отметка установки наклономера;

- подставив (4) в (3), определим горизонтальное перемещение Y колонны в точке установки наклономера:

$$Y = \frac{\phi}{12} \cdot \frac{h_{tilt}^4 - 4L \cdot h_{tilt}^3 + 6L^2 \cdot h_{tilt}^2}{L^2 \cdot h_{tilt} - L \cdot h_{tilt}^2 + \frac{h_{tilt}^3}{3}}. \quad (5)$$

Приведённая методика расчёта горизонтальных перемещений построена на основе сильно упрощённого представления о характере изгиба колонн и не учитывает наличие горизонтальных связей между конструктивными элементами каркаса. Поэтому результаты расчёта горизонтальных перемещений на основе показаний наклономеров следует трактовать как некую оценочную характеристику деформированного состояния колонн. Долговременное наблюдение за колон-

нами каркаса КО показало, что реальные горизонтальные перемещения в точках установки наклономеров ожидаемо меньше, чем рассчитанные по указанной методике. Тем не менее формула (5) очень удобна для экспресс-оценки «сверху» горизонтальных перемещений стержневых консоль-

ных конструкций постоянного сечения, так как не содержит жесткостных параметров.

В течение полутора лет, во время активной фазы ремонтных работ, сотрудниками НИУ МГСУ выполнялась ежемесячная актуализация расчётной модели КЭМ 4, которая учитывала

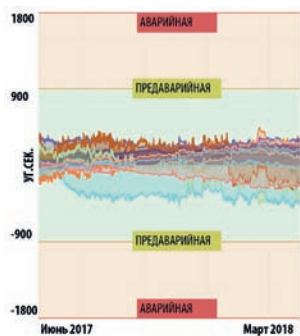


Рис. 14. Угловые перемещения колонн из плоскости поперечных рам (в угловых секундах) на отм. +90,000

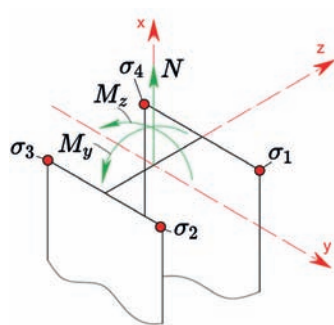


Рис. 15. Контролируемые усилия и напряжения в колоннах

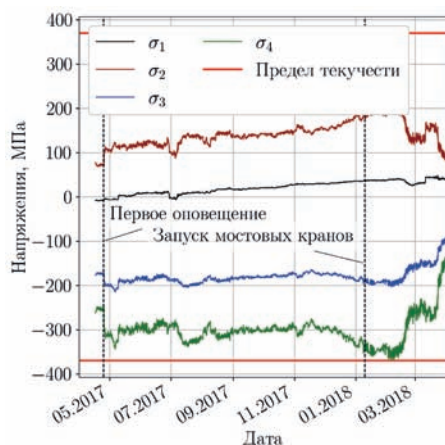


Рис. 16. Результаты мониторинга напряжений в колонне Д-16 на отм. +93,000 (источник: [4])

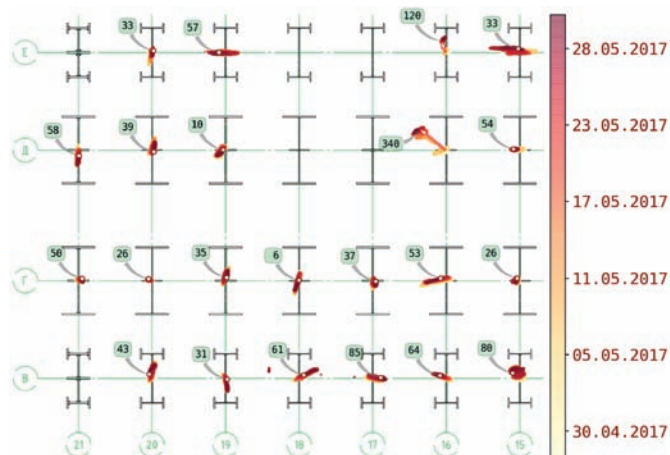


Рис. 17. Карта траекторий угловых перемещений колонн (в угловых секундах) на отм. +90,000 уг.сек. (сечения колонн не в масштабе). Схема авторов статьи

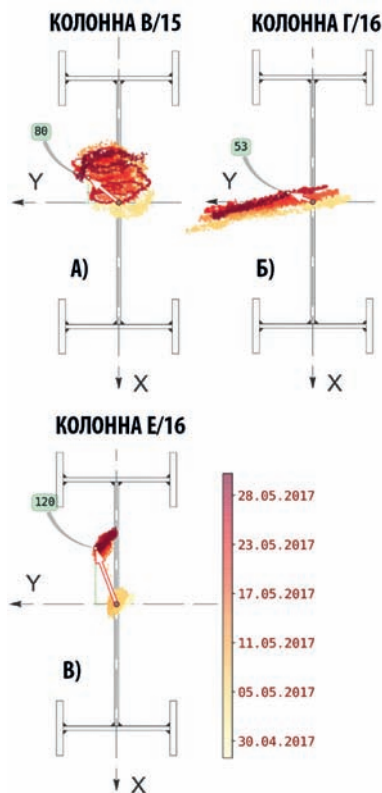


Рис. 18. Карты траекторий угловых перемещений колонн (в угловых секундах) на отм. +90,000 уг.сек. (сечения колонн не в масштабе): а) перемещения без выраженного направления; б) ярко выраженные линейные перемещения; в) скачкообразное изменение положения. Схемы авторов статьи

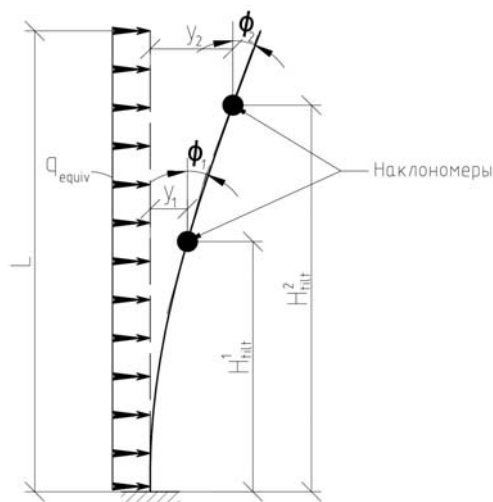


Рис. 19. Схема приближённого определения линейных перемещений колонн. Схема авторов статьи

Актуализированная расчётная модель валидировалась с помощью данных мониторинга: в результате компьютерного анализа определялись минимальные и максимальные значения напряжений и внутренних усилий в колоннах КО при всех возможных сочетаниях нагрузок (собственный вес, технологические, крановые, ветер, температура), которые сравнивались с измеренными [полученными на основе показаний датчиков деформации (рис. 20 а, б)].

По одной из гипотез причины различий между данными расчёта и мониторинга заключались в недостаточно достоверном определении начальных внутренних усилий, которые вычислялись в аварийном состоянии с неопределёнными действующими нагрузками. В середине июля 2018 года действующие усилия в колоннах были пересчитаны, так как состояние каркаса к этому времени было гораздо более детерминировано, чем за полтора года до этого. Система мониторинга была перенастроена, и вплоть до окончания расчётного сопровождения качество валидации компьютерной модели значительно возросло.

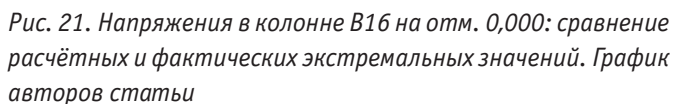
Второй вероятной причиной несовпадения данных расчёта и мониторинга является неустранимое несоответствие прикладываемых нагрузок в расчётной модели фактическим нагрузкам. В частности, специалисты ООО «Проектстальконструкция», подключившиеся к работе над расчётным сопровождением восстановительных работ на поздних этапах мониторинга, справедливо указывали на невозможность учёта:

- постоянного перемещения оборудования по перекрытиям, установки в предпроектное положение металлоконструкций с закреплением через вспомогательные устройства в непроектных узлах;
- временного локального складирования материалов;
- установки в проектное положение конструкций с поддомкрачиванием или оттяжкой существующих конструкций;
- воздействия ветра и температуры на каркас здания при частичном отсутствии ограждающих конструкций – стеновых и кровельных панелей.

Третьей причиной нестыковок КЭ-модели с данными мониторинга являются возможные локальные пластические деформации в зонах установки тензометров. Так как методика расчёта внутренних усилий и напряжений построена в



Рис. 20. Диаграмма внутренних усилий в колоннах КО: а) диаграмма продольных усилий; б) диаграмма напряжений. Схемы авторов статьи



предположении об упругой работе материала и использует показания только двух датчиков в сечении, то пластические эффекты могут значительно исказить результаты.

Выводы

- Разработанная и реализованная программа мониторинга котельного отделения Берёзовской ГРЭС – результат симбиоза полевых и лабораторных исследований, математического моделирования, современных измерительных и информационных технологий – помогла значительно повысить уровень безопасности энергоблока станции при ликвидации последствий аварийной ситуации.
- Технические решения, применённые при внедрении СМДС БГРЭС, показали свою эффективность в неблагоприятных эксплуатационных условиях и могут быть рекомендованы к применению на подобных объектах.
- Валидация КЭ-модели постоянно изменяющейся конструктивной схемы аварийного энергоблока БГРЭС на основе данных инструментального мониторинга на практике оказалась чрезвычайно осложнена большим количеством неопределённостей в фактически действующих нагрузках.
- Методы освобождения (сверления глухих отверстий) и магнитной коэрцитиметрии не позволили выполнить достоверную количественную оценку действующих внутренних усилий в аварийных металлоконструкциях, но явились хорошим индикатором отсутствия пластических деформаций.
- Двухточечная измерительная схема (состоящая из двух тензометров в контролируемых сечениях) крайне чувствительна к локальным пластическим деформациям, которые могут значительно исказить результаты мониторинга внутренних усилий в стержневых металлоконструкциях. Рекомендуется применение избыточных измерительных схем, состоящих из трёх-четырёх тензометров, которые позволяют нивелировать возможные нелинейности.
- Предложена инженерная методика оценки горизонтальных перемещений стержневых консольных конструкций постоянного сечения на основе показаний наклономеров.
- Автоматизированная система мониторинга – инструмент, позволяющий в режиме реального времени увидеть и «пощупать», как сложные металлоконструкции реагируют на внешние воздействия: монтаж усиления, разбор завалов, срезка повреждённых деталей котла и т.п. Система мониторинга даёт инженеру уровень обратной связи, не сравнимый с компьютерным моделированием, которое значительно упрощает реальность.

Библиографический список

1. Ликвидация пожара на Берёзовской ГРЭС [Электронный ресурс] // МЧС России. Главное управление по Красноярскому краю. Официальный сайт. – Режим доступа: <https://24.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya/operativnye-sobytiya/2031728> (дата обращения 13.09.2021).
2. Энергоблок № 3 Берёзовской ГРЭС выведен во внеплавный ремонт [Электронный ресурс] // ЮниПРО. Официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.unipro.energy/pressroom/news/4814166/> (дата обращения 13.06.2021).
3. Берёзовская ГРЭС. Общая информация [Электронный ресурс] // ЮниПРО. Официальный сайт. – Режим доступа: <https://www.unipro.energy/about/structure/affiliate/berezovskaya/details/> (дата обращения 26.09.2021).
4. Kolotovich, Y. Rehabilitation of Berezovskaya GRES: Improving The Post-fire Safety With Automated Monitoring Data / Y. Kolotovich, A. Shakhramanyan; Preprint. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/360370505_Rehabilitation_of_Berezovskaya_GRES_Improving_The_Post-fire_Safety_With_Automated_Monitoring_Data (дата обращения 11.04.2022).
5. Molkens, T. Post-fire mechanical properties of carbon steel and safety factors for the reinstatement of steel structures [Электронный ресурс] / T. Molkens, K.A. Cashell, B. Rossi / Engineering Structures (Elsevier). – 2021. – Vol. 234. – P. 111975. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621001255> (дата обращения 04.03.2022).
6. Experimental Behavior of Cold-Formed Stainless Steel Screwed Beam–Column Connections at Post-Fire Condition [Электронный ресурс] / B. K. Cipcici, S. N. Orhan, M. Kilic [et al.] // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2021. Sep. Vol. 45, no. 3. P. 1593–1609. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00489-4> (дата обращения 16.02.2022).
7. Rendler, N.J. Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses [Электронный ресурс] / N.J. Rendler, I. Vigness // Experimental Mechanics. – 1966, Dec. – Vol. 6. – № 12. – P. 577–586. Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/BF02326825> (дата обращения 16.03.2021).
8. The method of magnetic coercimetry and its application to assess the residual life of lifting equipment [Электронный ресурс] / B. Popov, S. Evdokimov, O. Leonova [et al.] // XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019) // E3S Web Conferences. – 2019. – Vol. 97. – P. 06016. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706016> (дата обращения 21.02.2022).
9. Gorkunov, E.S. Correlation of residual stresses with magnetic properties of Armco iron [Электронный ресурс] / E.S. Gorkunov, S.M. Zadvorkin, L.S. Goruleva // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053. – № 1. – P. 030022. – Режим доступа: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5084383> (дата обращения 16.03.2022).
10. Correlation between the stress-strain state parameters and magnetic characteristics of carbon steels [Электронный ресурс] / E.S. Gorkunov, S.M. Zadvorkin, S.V. Smirnov [et al.] // The Physics of Metals and Metallography. – 2007, Mar. – Vol. 103. – № 3. – P. 311–316. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1134/S0031918X07030131> (дата обращения 5.03.2021).
11. Jiles, D.C. The effect of compressive plastic deformation on the magnetic properties of AISI 4130 steels with various microstructures [Электронный ресурс] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1988, jul. – Vol. 21. – № 7. – P. 1196–

1204. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/7/023> (дата обращения 10.03.2022).

12. Mushnikov, A. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipeline steels of different classes [Электронный ресурс] / A. Mushnikov, S. Mitropolskaya // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures (DREAM)*. – 2016. – Iss. 4. – P. 57–70. – Режим доступа: <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2016.4.057-070> (дата обращения 9.03.2022). DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.057-070.

13. Maraveas, C. Post-fire mechanical properties of structural steel [Электронный ресурс] / C. Maraveas, Z. Fasoulakis // *Materials of 8th National Steel Structures Conference*. Tripoli, Greece, January, 2014. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/264545278_POST-FIRE_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_STRUCTURAL_STEEL (дата обращения 6.02.2022).

14. Outinen, J. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down [Электронный ресурс] / J. Outinen, P. Mäkeläinen // *Fire and Materials*. – 2004. – Vol. 28. – № 2-4. – P. 237–251. – Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.849> (дата обращения 7.03.2022).

References

1. Likvidatsiya pozhara na Berezovskoi GRES [Fire suppression at Berezovskaya GRES]. In: *MChS Rossii. Glavnoe upravlenie po Krasnoyarskomu krayu [EMERCOM of Russia. Main Directorate for the Krasnoyarsk Territory. Official site]*. Access mode: <https://24.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informatsiya/operativnye-sobytiya/2031728> (Accessed 09/13/2021) (In Russ.)

2. Energoblok №3 Berezovskoi GRES vyveden vo vneplanovyi remont [Power unit No. 3 of Berezovskaya GRES was put into unscheduled repair]. In: *YuniPRO. Ofitsial'nyi sait [UniPRO. Official site]*. Access mode: <https://www.unipro.energy/pressroom/news/4814166/> (Accessed 06/13/2021) (In Russ.)

3. Berezovskaya GRES. Obshchaya informatsiya [Berezovskaya GRES. General information]. In: *YuniPRO. Ofitsial'nyi sait [UniPRO. Official site]*. Access mode: <https://www.unipro.energy/about/structure/affiliate/berezovskaya/details> (Accessed 09/26/2021). (In Russ.)

4. Kolotovichev Y., Shakhramyan A. Rehabilitation of Berezovskaya GRES: Improving The Post-fire Safety With Automated Monitoring Data. Preprint. Access mode: https://www.researchgate.net/publication/360370505_Rehabilitation_of_Berezovskaya_GRES_Improving_The_Post-fire_Safety_With_Automated_Monitoring_Data (Accessed 04/11/2022). (In Engl.)

5. Molken T., Cashell K.A., Rossi B. Post-fire mechanical properties of carbon steel and safety factors for the reinstatement of steel structures. In: *Engineering Structures (Elsevier)*, 2021, Vol. 234, pp. 111975. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029621001255> (Accessed 03/04/2022). (In Engl.)

6. Cirpici B.K., Orhan S.N., Kilic M. [et al.]. Experimental Behavior of Cold-Formed Stainless Steel Screwed Beam–Column Connections at Post-Fire Condition. In: *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2021, Sep., Vol. 45, no. 3, pp. 1593–1609. Access mode: <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00489-4> (Accessed 02/16/2022). (In Engl.)

7. Rendler N.J., Vigness I. Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses. In: *Experimental Mechanics*, 1966, Dec, Vol. 6, no. 12, pp. 577–586. Access mode: <https://doi.org/10.1007/BF02326825> (Accessed 03/16/2021). (In Engl.)

8. Popov B., Evdokimov S., Leonova O. [et al.] The method of magnetic coercimetry and its application to assess the residual life of lifting equipment. In: *Proceedings of XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019)*, in: E3S Web Conferences, 2019, Vol. 97, pp. 06016. Access mode: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199706016> (Accessed 02/21/2022). (In Engl.)

9. Gorkunov E. S., Zadvorkin S. M., Goruleva L.S. Correlation of residual stresses with magnetic properties of Armco iron. In: *AIP Conference Proceedings*, 2018, Vol. 2053, no. 1, pp. 030022. Access mode: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5084383> (Accessed 03/16/2022). (In Engl.)

10. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Smirnov S.V. [et al.] Correlation between the stress-strain state parameters and magnetic characteristics of carbon steels. In: *The Physics of Metals and Metallography*, 2007, Mar., Vol. 103, no. 3, pp. 311–316. Access mode: <https://doi.org/10.1134/S0031918X07030131> (Accessed 03/05/2021). (In Engl.)

11. Jiles D.C. The effect of compressive plastic deformation on the magnetic properties of AISI 4130 steels with various microstructures. In: *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1988, jul., Vol. 21, no. 7, pp. 1196–1204. Access mode: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/7/023> (Accessed 03/10/2022). (In Engl.)

12. Mushnikov A., Mitropolskaya S. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipeline steels of different classes. In: *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures (DREAM)*, 2016, Iss. 4, pp. 57–70. Access mode: <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2016.4.057-070> (Accessed 03/09/2022). DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.057-070 (In Engl.)

13. Maraveas C., Fasoulakis Z. Post-fire mechanical properties of structural steel. In: *Materials of 8th National Steel Structures Conference*. Tripoli, Greece, January, 2014. Access mode: https://www.researchgate.net/publication/264545278_POST-FIRE_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_STRUCTURAL_STEEL (Accessed 02/06/2022) (In Engl.)

14. Outinen J., Mäkeläinen P. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down. In: *Fire and Materials*, 2004, Vol. 28, no. 2-4, pp. 237–251. Access mode: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.849> (Accessed 03/07/2022). (In Engl.)