

МОНИТОРИНГ ИНЖЕНЕРНОЙ КОНСТРУКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЕЁ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЫ *

В.В. Епин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Г.Н. Гусев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.В. Цветков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.П. Шестаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

И.Н. Шардаков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Для цитирования:

Епин В.В., Гусев Г.Н., Цветков Р.В., Шестаков А.П., Шардаков И.Н. Мониторинг инженерной конструкции в процессе её эксплуатации в условиях коррозионно-активной среды // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 4. – С. 6–15. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.4.1>

Эксплуатация инженерных конструкций, выполняющих ответственные технологические операции, невозможна без контроля его деформационного состояния. Фундаментальной инженерной проблемой данного исследования является разработка автоматизированной системы мониторинга деформационных процессов для конструкции, подверженной сильному коррозионному воздействию, а также адаптация данной системы к агрессивному воздействию внешней среды (воздействие соляных рассолов и аэрозолей, работа в условиях низких температур). Инженерное сооружение представляет собой крупномасштабную металлическую конструкцию для подъёма и выгрузки калийной руды из шахтного ствола. Для нее создана математическая модель с учетом основных массогабаритных и жёсткостных характеристик. На основании численных экспериментов определены места установки и параметры датчиков. Разработаны системы датчиков, адаптированных к условиям коррозионно-активной среды, для контроля квазистатических, вибрационных и динамических процессов на разных временных масштабах. Приведены примеры показаний различных типов датчиков, иллюстрирующих отклик конструкции на природные, техногенные и технологические процессы.

Ключевые слова: деформационный мониторинг, математическая модель, гидронивелирование, тензометрия, вибродатчики.

В современном мире эксплуатация ответственных инженерных конструкций и сооружений, участвующих в процессе важных технологических операций, не возможна без организации контроля за их деформационным состоянием [1]. Разрыв технологической цепочки, вызванный поломкой даже не самого сложного оборуду-

* Работа выполнена в рамках государственного задания (номер темы АААА-А19-19012290100-8).

дования, ведет к простоям и остановке всего процесса и, как следствие, к убыткам. Проблемы могут многократно усугубиться, если внезапно сломается уникальная конструкция или механизм, а тем более, если произойдет ее катастрофическое разрушение. Поэтому мониторинг её целостности жизненно необходим. Вообще говоря, под этим термином понимается цикл мероприятий, включающий не только контроль деформационных параметров, но и проведение регулярных осмотров с выявлением видимых дефектов, измерением размеров повреждений и т. д.

Как правило, все конструкции изготавливаются с достаточным коэффициентом запаса, чтобы обеспечить долгую и бесперебойную эксплуатацию. Например, многим окружающим нас зданиям десятки, сотни и более лет. Но отчего тогда производственные конструкции находятся в зоне риска? Сам технологический процесс оказывает негативное влияние на них значительно сильнее, чем окружающая среда (колебания температуры, влажности и т.п.). По сути производственная конструкция — это уникальный инструмент, созданный для специфической работы, поэтому подвергается повышенному износу. Также в процессе эксплуатации существует вероятность превышения нормативных нагрузок, что негативно влияет на ее безопасность.

При подземной добыче калийной руды и ее транспортировке на обогатительную фабрику используется цепочка механизмов и конструкций, подвергающихся негативным воздействиям, таким как шахтный ствол, надшахтное строение с копром, многокилометровые транспортные галереи и др., в связи с чем их деформационное состояние нужно контролировать. Соляные растворы, ускоряющие коррозию стальных элементов, регулярные вибрации от работающих механизмов [2], влияние окружающей среды, а также оседания грунта, вызванные горными выработками и разморозкой грунтов, — основные негативные факторы, влияющие на их деформацию, а значит, и безопасность. Влияние

указанных факторов будет изменять напряженно-деформированное состояние элементов конструкции, а также их вибрационный отклик.

Равномерно увеличивающаяся коррозия металла (ржавчина) фактически приводит к утонению элементов, вследствие чего их жесткость уменьшается. Это снижает общую жесткость конструкции и увеличивает перемещения при приложении той же нагрузки. Визуально можно видеть растущие прогибы балок, увеличивающиеся по амплитуде колебания, а также снижение значений собственных частот. Такие параметры и необходимо контролировать в процессе мониторинга. Однако коррозия может протекать неравномерно в разных элементах конструкции вследствие неоднородности покраски, а также конструктивных особенностей, например, в сварных соединениях, стыках. Одно такое соединение можно держать под контролем, но когда их на конструкции тысячи, то практически невозможно установить датчик в каждом из них. В таком случае также возможна интегральная оценка изменения перечисленных параметров, поскольку ослабление одного узла не приведет к разрушению всей конструкции. С помощью математической модели можно оценить, как ослабление или даже разрушение тех или иных связей влияет на статические и динамические параметры системы. Другими словами, как и в каком месте конструкция отреагирует на появление повреждения, соответственно, где и как организовать измерения.

В статье рассматривается проблематика мониторинга инженерной конструкции на примере надшахтного строения скипового ствола с копром, расположенного в г. Петриков (Республика Беларусь) рис 1.

Конструкция представляет собой сборно-сварную стержневую систему высотой свыше 64 м, элементы которой изготовлены из металлопроката различного профиля и марок сталей. К несущим элементам конструкции относятся стальные колонны каркаса, объединенные вертикальными и горизонтальными связями в



Рис. 1. Внешний вид конструкции

рамную систему, которые в свою очередь опираются частично на свайный фундамент и частично на верхнюю часть железобетонной конструкции скипового ствола. При такой схеме крепления фундамента потенциально возможно развитие деформаций в элементах, вызванное разницей в вертикальной подвижке свайного фундамента относительно скипового ствола. Подвижка грунтов может иметь место вследствие их усадки после завершения строительных работ, нахождения конструкции на подрабатываемой территории, а также вследствие разморозки грунтов вокруг шахтного ствола. Кроме того, данное строение испытывает регулярную вибрационную нагрузку из-за работы различных механизмов, ударную нагрузку, возникающую при высыпании породы, а также ветровую нагрузку. Эти процессы происходят на фоне постепенного ослабления жесткости конструкции из-за коррозии ее элементов, находящихся в постоянном контакте с добываемой солью и ее аэрозолями.

Реализация автоматизированной системы деформационного мониторинга конструкции надшахтного строения была начата с создания ее математической модели с учетом основных массогабаритных и жесткостных характеристик. Конечно-элементная модель силовых элементов конструкции представлена на рис. 2. С помощью данной модели можно оценивать напряженно-деформированное со-



Рис. 2. Конечно-элементная модель конструкции

стояние (НДС) в её элементах от действия нагрузок на разных частотно-временных масштабах: от статических и квазистатических до ударно-вибрационных. К первым из них можно отнести проектные квазистатические эксплуатационные нагрузки (собственный вес и вес извлекаемой руды), вертикальные перемещения несущих колонн, а также влияние неоднородного температурного поля. Под воздействием каждой из квазистатических нагрузок происходят изменения в НДС конструкции, проявляющиеся в изменении деформации ее элементов.

Моделирование показало, что важнейшим фактором, определяющим квазистатическое деформационное состояние ее элементов, является деформационное взаимодействие части несущих колонн со свайными фундаментами и деформационное взаимодействие остальной части колонн с железобетонным оголовком скипового ствола. Это взаимодействие в значительной степени определяется вертикальными смещениями нижних оснований колонн, которое проявляется также в изменении деформации несущих колонн и наклоне всей конструкции. Эти параметры и необходимо контролировать в процессе мониторинга. При деформировании конст-

рукции возможно развитие разных сценариев, которые могут привести как к ограничениям работы подъемных устройств, так и к разрушению конструкции.

Моделирование динамического поведения конструкции проводилось на основе модального анализа, позволяющего оценивать собственные частоты и формы колебаний, а также на основе анализа переходных процессов, возникающих вследствие ударной нагрузки. Модальный анализ показал, что низшие собственные частоты конструкции начинаются с 1,5 Гц. В процессе колебаний, соответствующих этим формам, участвует практически вся конструкция, что удобно для выбора местоположения регистрирующей аппаратуры. Однако для лучшей регистрации разных форм колебаний нужно учитывать их геометрию, чтобы не производить измерения в узловых точках. Известно, что для высотных строений контроль за нижней собственной частотой эффективнее производить в ее верхней части, где амплитуды колебаний имеют наибольшее значение.

Анализ переходных процессов показывает, что отклик конструкции на ударное воздействие (частота выше 1 кГц) будет довольно быстро затухать по мере удаления от источника, во-первых, из-за ее размеров и большого числа соединенных элементов, которое приведет к тому, что волна будет расплзаться, а во-вторых, из-за присутствия постоянного механического шума от эксплуатации различных механизмов. Кроме этого, неизбежно присутствие сопутствующих электромагнитных шумов, которые также оказывают влияние при обработке слабых сигналов с датчиков. Поэтому целесообразно производить контроль вибраций в относительной близости от мест воздействия, таких как зона высыпания руды или зона работы подъемных механизмов.

Основой системы мониторинга деформационных процессов являются системы первичных датчиков, регистрирующих физические параметры, характеризующие описанные выше квазистатические и динамические деформационные процессы в

металлических элементах конструкции. Эти процессы имеют характерные времена, на масштабе которых и необходимо осуществлять контроль. Так, например, технологические и природные процессы могут провоцировать деформационные реакции в элементах конструкции с характерными временами от долей миллисекунды (удар) до нескольких минут (цикл подъема руды) и часов (неравномерный нагрев от солнечной энергии). Сезонные изменения температур, деформационное взаимодействие с грунтом, а также коррозионная деградация металла могут определять длительность квазистатических деформационных процессов с характерными временами длительностью в дни, месяцы и даже годы. Необходимость сбора деформационных параметров с рассматриваемыми характерными временами в значительной степени определяет структуру систем датчиков, которую можно условно представить в виде двух блоков, контролирующих «медленные» и «быстрые» процессы.

Первый блок состоит из датчиков четырех видов, осуществляющих регистрацию «медленных» процессов:

- 1) неравномерных осадок (вертикальных смещений) несущих колонн (15 датчиков – гидростатического нивелирования);
- 2) осевых деформаций несущих колонн (20 датчиков тензометрического типа);
- 3) температуры поверхности несущих колонн (7 датчиков температуры – термосопротивлений);
- 4) углов наклона конструкции относительно двух взаимно перпендикулярных осей, лежащих в горизонтальной плоскости (8 датчиков инклинометров).

Регистрация указанных деформационных параметров осуществляется с частотой 1 раз в 10 минут, возможно увеличение скорости опроса ряда датчиков до 1 измерения в секунду. Таких скоростей опроса достаточно для отслеживания квазистатических процессов деформирования.

Второй блок состоит из датчиков двух видов, осуществляющих регистрацию волновых и вибрационных деформационных процессов:

1) в низкочастотном диапазоне от 0,3 до 400 Гц (3 трехкомпонентных сейсмоприемника);

2) в среднечастотном диапазоне до 10 000 Гц (6 однокомпонентных акселерометров).

Синхронизированные результаты измерений со всей совокупности датчиков каждого блока поступают по кабельным коммуникационным каналам в устройство сбора, хранения и первичной обработки результатов измерений. Устройство сбора и хранения результатов измерений представляет собой физически два персональных компьютера (ПК) в антивандальных шкафах и, таким образом, аппаратно производится разделение данных о «быстрых» и «медленных» деформационных процессах.

Программное обеспечение организует выполнение измерений по заданному алгоритму, обработку и сохранение измеренных данных в локальной базе данных и последующую передачу их на главный сервер с помощью внешнего LTE роутера. Источники бесперебойного питания позволяют осуществлять контроль за деформационными процессами еще в течение часа. Главный сервер физически располагается в Институте механики сплошных сред УрО РАН в г. Перми. К данному ресурсу организован интернет-доступ с учетом делегированных прав пользователей. Вся необходимая информация доступна на специальном WEB-сайте, на котором пользователю доступны схемы размещения каждого типа датчиков и актуальные значения всех наблюдаемых параметров.

Структура основных элементов системы мониторинга и их функциональная взаимосвязь представлены на рис. 3.

Для регистрации изменения величин вертикальных перемещений (осадок) фундаментов, взаимодействующих с грунтом, использована оригинальная разработка на основе совокупности датчиков гидростатического нивелирования [3], которая обеспечивает измерение величин осадок от 0 до 50 мм с разрешением около 0,06 мм. Принцип измерения с использованием метода гидростатического нивелирования

и результаты наблюдений подробно изложены в работе [4].

На рис. 4 приведен пример графиков осадок для двух датчиков и их скоростей, наблюдаемые за период измерения с начала 2020 г. График показывает, что в первый год наблюдалось оседание колонн с датчиками относительно шахтного ствола. Также на графиках заметны сезонные изменения: максимальная разность осадок достигается в летний период, в зимний период наблюдается возврат к предыдущим значениям. При более детальном рассмотрении заметны также суточные изменения, связанные с колебаниями температуры.

Измерение температуры элементов конструкции поверхности несущих колонн производилось с помощью 7 термосопротивлений, размещенных совместно с датчиками гидронивелирования. Принцип их работы основан на изменении электрического сопротивления с температурой. Наличие данных об эволюции температуры позволяет оценивать ее корреляцию с другими деформационными параметрами на разных временных масштабах для идентификации наблюдаемых процессов.

Для регистрации величин осевых деформаций в несущих колоннах используются тензометрические датчики (тензодатчики), размещенные в их основаниях вдоль оси колонн. Принцип работы тензодатчика основывается на законе пропорционального изменения проходящего через него электрического сигнала от действия растягивающего или сжимающего усилия, которое меняет геометрические характеристики проводника, а значит, и его сопротивление. Применение мостовой схемы подключения тензодатчиков совместно с термокомпенсационной схемой позволяет достигать высокой чувствительности порядка 0,1 мк (мкм/м). Подробно особенности и проблемы использования тензодатчиков на металлической конструкции описаны в [5].

В качестве примера результатов на рис. 5 приведены графики изменения деформации колонн у их основания на раз-

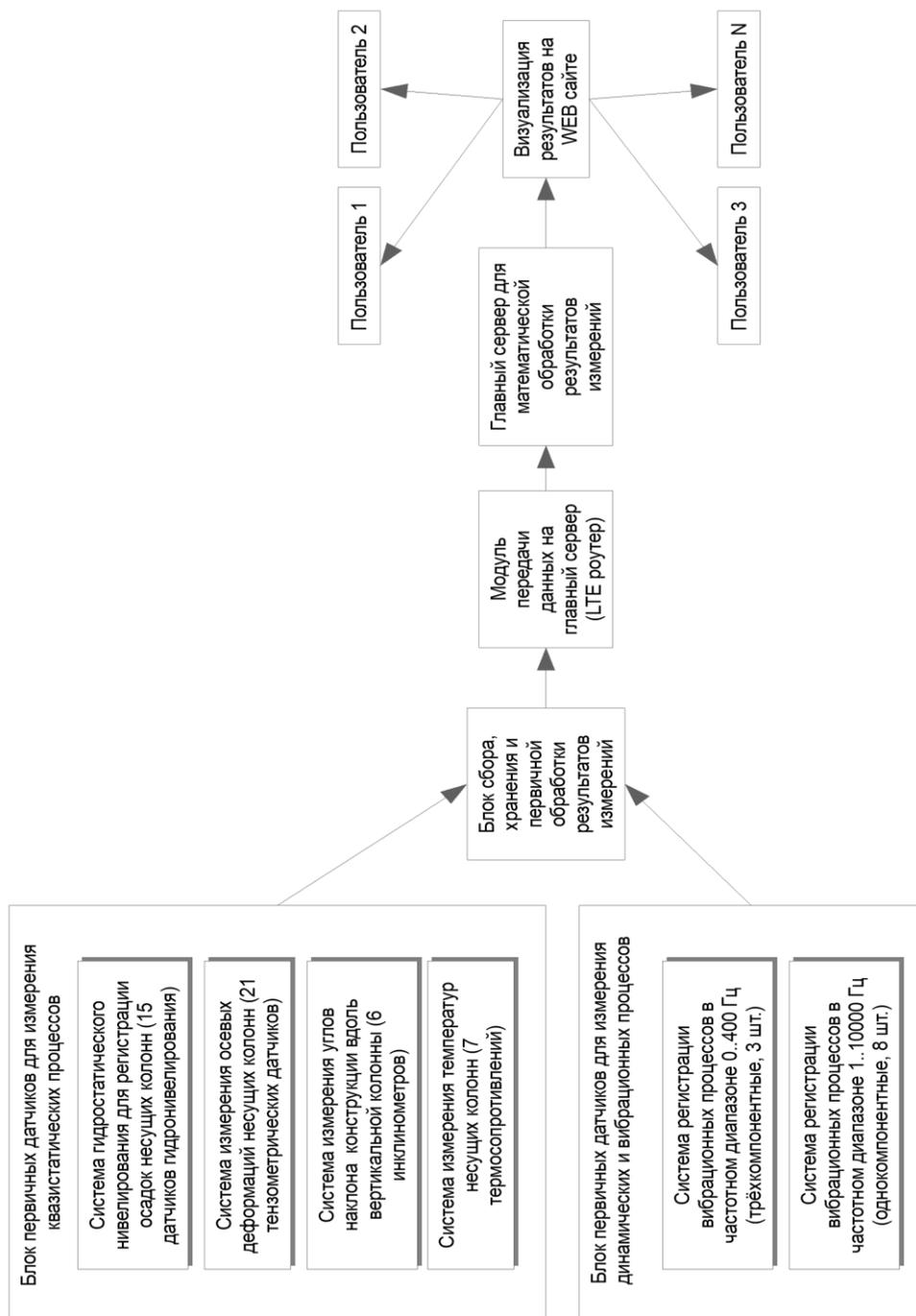


Рис. 3. Структурная схема основных элементов системы мониторинга

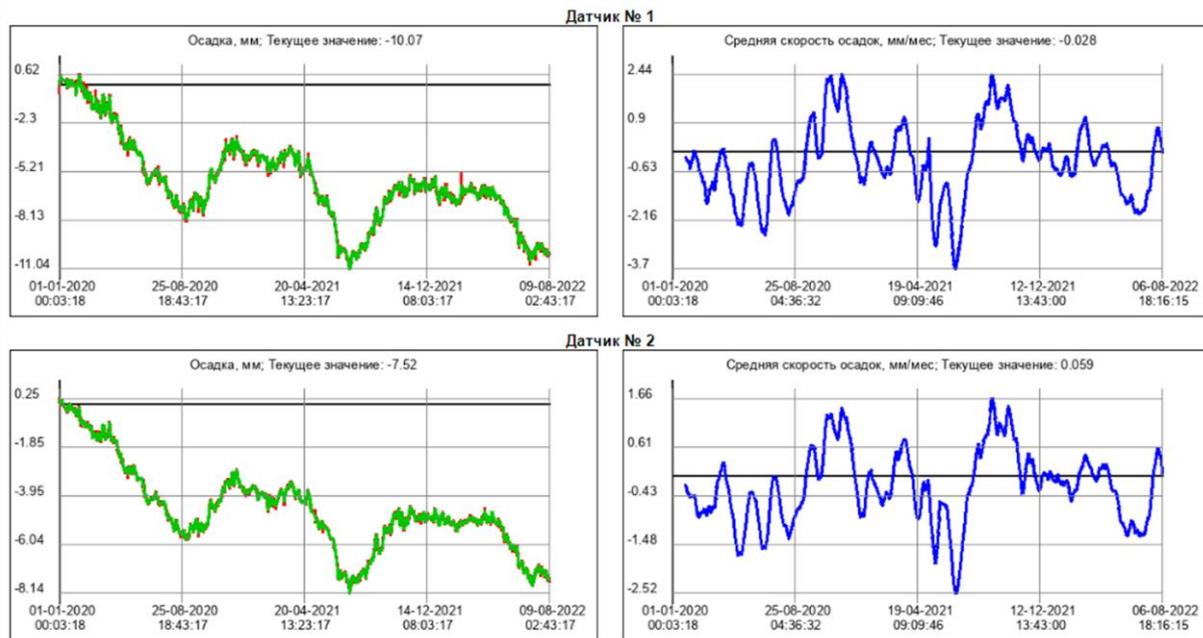


Рис. 4. Эволюция осадок (слева) и их скоростей (справа) для двух датчиков гидронивелирования относительно базового датчика, расположенного на шахтном стволе

ных временных масштабах. На рис. 5 слева можно видеть сезонное изменение деформации колонны. Анализируя показания датчиков деформаций, также можно сделать вывод о том, что они чувствительны к эксплуатационным нагрузкам. Амплитуда изменения величин деформации при подъеме руды составляет от 1 до 9 мкм/м, в зависимости от расположения датчика. Также можно отметить, что несмотря на наличие термокомпенсации, у некоторых датчиков наблюдается корреляция между изменением значений деформаций и показателей температуры в разрезе суточной и годовой циклики, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции Пирсона, превышающими значение 0,9.

Для контроля наклона сооружения в двух направлениях использовано шесть прецизионных инклинометров ИН-ДЗ, расположенных на главных колоннах на высотных отметках 8, 22, 30, 42 и 56 м. На верхней отметке установлено в противоположных концах два инклинометра, регистрирующих наклоны в диапазоне $\pm 7\ 200$ угловых секунд. Расположенные ниже датчики имеют предел измерения $\pm 3\ 600$ угловых секунд. Инклинометры размещены на стационарных опорах, приваренных к телу колонны. Размещение пяти инклинометров вдоль одной несущей колонны позволяет интерполировать полученные значения углов наклона и аппроксимировать функцию перемещений по вы-

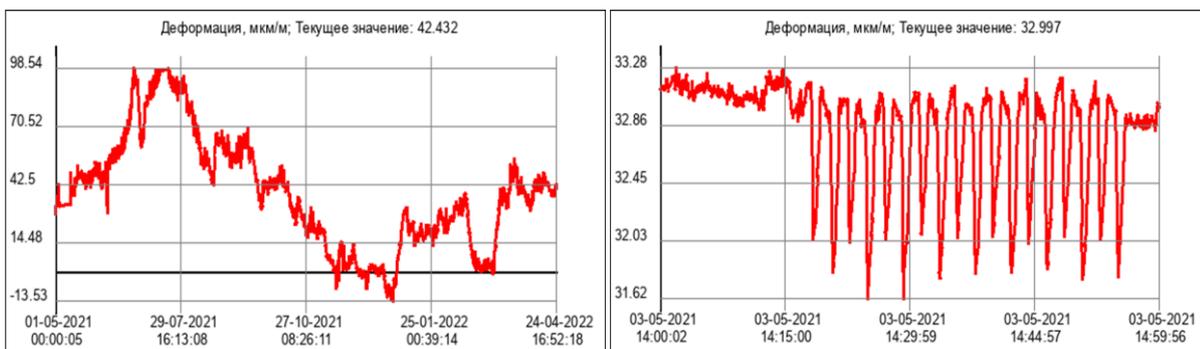


Рис. 5. Изменение деформации на различных временных масштабах год (слева) и 1 час (справа)

соте. Для примера на рис. 6 приведены графики наклонов на одном из датчиков в различных временных масштабах, на которых видна годовая и суточная цикличность. Подробнее с особенностями установки инклинометров и результатами измерений можно ознакомиться в работе [6].

Для регистрации динамических деформационных процессов в элементах конструкции использованы акселерометры двух видов, рассчитанные на разные диапазоны частот и амплитуд ускорений. Однокомпонентный *иср*-акселерометр преобразует вибрации с максимальной амплитудой до 50g в электрический сигнал в диапазоне частот до 10 КГц. Трехкомпонентный сейсмоприемник, преобразующий механические ускорения с максимальной амплитудой до 1g в электрический сигнал в диапазоне частот от 0,3 до 400 Гц. Акселерометры размещены на двух центральных несущих колоннах скипового ствола на отметках: 10 м, 21 м, 31 м, 42 м, 53 м и 58 м. Выбор схемы произведен с учетом особенностей расположения источников динамического сигнала: колеса подъемного механизма, разгрузочная камера, механизмы ленточного

транспортера и др. Датчики крепились к металлическим опорам, приваренным к стальным колоннам конструкции. Подробное описание возможностей измерительной подсистемы, результатов мониторинговых измерений, а также их анализ приведены в работе [7]. Ниже показаны графики вибраций с датчиков, иллюстрирующие аспекты работы конструкции в процессе работы.

На графике рис. 7. (слева) показано усредненное значение ускорения, соответствующее серии из 15 циклов подъемов руды, длящейся порядка 1 часа. Данное значение виброускорения получено с помощью однокомпонентного акселерометра, расположенного на отметке 58 м. Справа на рисунке показан фрагмент вибрационного сигнала, соответствующий одному циклу подъема руды, длительностью около 90 с. Также во время этой операции осуществляется измерение другими датчиками.

На рис. 8 показаны низкочастотные составляющие спектра для той же операции подъема руды для сейсмометра, расположенного на отметке 53 м. На графике видно, что нижняя собственная частота

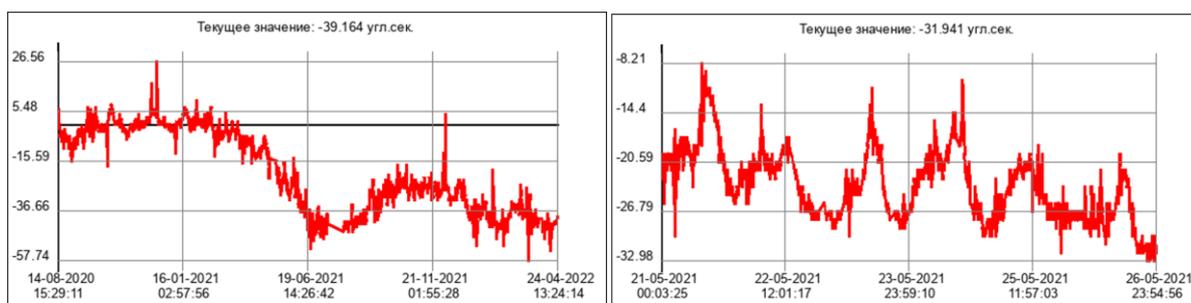


Рис. 6. Изменения наклона на датчике (отметка 22 м) на различных временных масштабах год (слева) и несколько дней (справа)

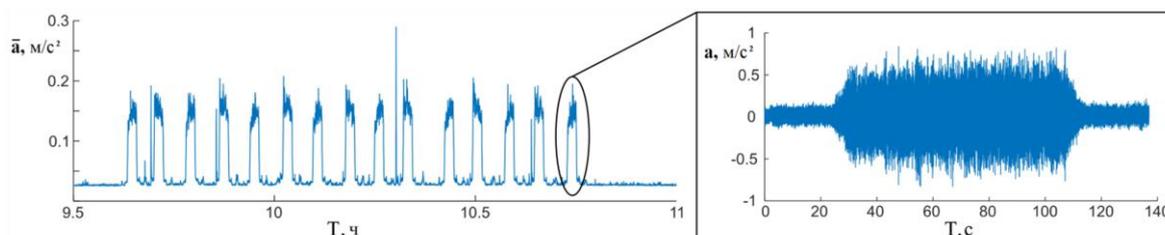


Рис. 7. Средняя амплитуда сигнала для одной серии подъемов (слева) и виброграмма, соответствующая одному из подъемов руды (справа)

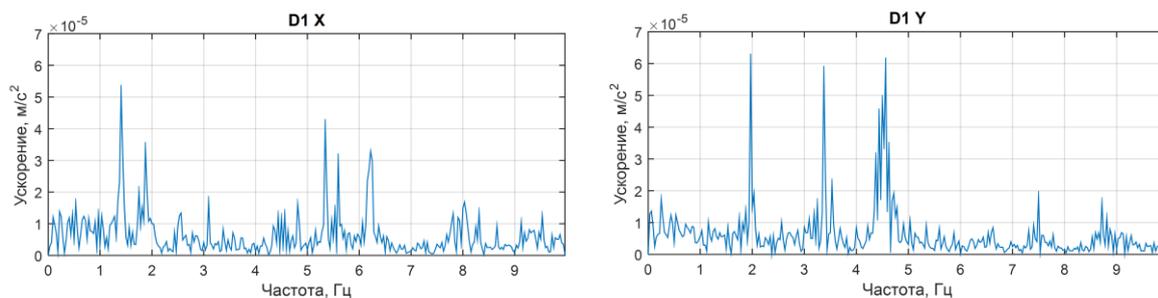


Рис. 8. Фурье-спектры в области низких частот для горизонтальных компонент датчика, расположенного в верхней части конструкции

составляет порядка 1,5 Гц, что согласуется с расчётными данными. Аналогичным образом определяются и сохраняются значения собственных частот конструкции в нижней части спектра, а также других динамических параметров, анализ эволюции которых и позволяет оценивать ее деформационное состояние. В настоящее время продолжается контроль деформационного поведения конструкции надшахтного строения скипового ствола с

помощью автоматизированной системы мониторинга. Представленные результаты свидетельствуют о ее возможностях по регистрации деформационных процессов на различных временных масштабах: от вибраций, возникающих при работе механизмов, ветровых колебаний конструкций, суточных температурных деформаций, до квазистационарных процессов деформирования, занимающих годы.

Библиографический список

1. Farrar C.R., Worden K. *An introduction to structural health monitoring // Philosophical transactions of the royal society A.* – 2006. – Vol. 365. – P. 303–315.
2. ГОСТ Р 53964-2010 Вибрация. Измерение вибрации сооружений. Руководство по проведению измерений. – М.: Стандартинформ, 2011.
3. Васютинский И.Ю. Гидронивелирование // – М.: Недра, 1983.– 124 с.
4. Epin V., Glot I., Gusev G., Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A. Hydrostatic leveling system for monitoring the headframe of the mine shaft // *Procedia Structural Integrity.* – 2021.– Vol. 32. – P. 64–70.
5. Gusev G., Glot I., Epin V., Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A. Experience of using tensorial strain gauges in corrosive environments // *Procedia Structural Integrity.*– 2021. – Vol. 32. – P. 49–55.
6. Glot I.O., Shardakov I.N., Gusev G.N., Tsvetkov R.V., Shestakov A.P. Inclinometer-Based Long-Term Monitoring of the Headframe of Salt Mine Shaft // *IOP Journal of Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 1945. – 01200910.
7. Glot I., Gusev G., Shardakov I., Shestakov A., Tsvetkov R., Yepin V. Vibration-based monitoring of engineering metal structures during technological operations // *Procedia Structural Integrity.* – 2021. – Vol. 32. – P. 216–223.

MONITORING OF AN ENGINEERING STRUCTURE IN THE PROCESS OF ITS OPERATION UNDER THE CONDITIONS OF A CORROSIVE ENVIRONMENT

V.V. Epin, R.V. Tsvetkov, G.N. Gusev, A.P. Shestakov, I.N. Shardakov

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

For citation:

Epin V.V., Tsvetkov R.V., Gusev G.N., Shestakov A.P., Shardakov I.N. Monitoring of an engineering structure in the process of its operation under the conditions of a corrosive environment // Perm Federal Research Center Journal. – 2022. – № 4. – P. 6–15. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.4.1>

The functioning of engineering structures that perform critical technological operations is impossible without monitoring its deformation state. The fundamental engineering problem of this study is the development of an automated system for monitoring deformation processes in a structure subject to severe corrosion, as well as the adaptation of this system to the aggressive effects of the external environment (exposure to salt brines and aerosols, operation at low temperatures). The engineering structure is a large-scale metal construction for lifting and unloading potash ore from a mine shaft. A mathematical model has been created for this structure, considering the main weight, size and stiffness characteristics. Installation locations and sensors parameters were determined on the basis of numerical experiments. The systems of sensors adapted to the conditions of a corrosive environment have been developed to control quasi-static, vibrational and dynamic processes on different time scales. Examples of readings of various types of sensors are given to illustrate the response of the structure to natural, man-made and technological processes.

Keywords: deformation monitoring, mathematical model, hydrostatic leveling, strain gauge, vibration sensors.

Сведения об авторах

Епин Валерий Валерьевич, младший научный сотрудник лаборатории механики функциональных материалов, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, ул. Академика Королева, 1; e-mail: epin.v@icmm.ru

Цветков Роман Валерьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: flower@icmm.ru

Гусев Георгий Николаевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией строительной механики, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: gusev.g@icmm.ru

Шестаков Алексей Петрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: shap@icmm.ru

Шардаков Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: shardakov@icmm.ru

Материал поступил в редакцию 11.10.2022 г.