

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.335>

УДК 69.059.14

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, СВЯЗАННЫХ С РАЗРУШЕНИЕМ ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ковтун В.А., Пасовец В.Н., Танырверди А.М., Антоненко М.А.

Цель. Провести анализ разработок по обеспечению безопасной эксплуатации объектов (зданий и сооружений, мостов и тоннелей, шахт и других строительных конструкций) за счет организации дистанционного мониторинга их напряженно-деформированного состояния путем применения систем тензометрических, потенциометрических и пьезоэлектрических датчиков механической деформации и усилий.

Методы. Теоретический анализ.

Результаты. Представлен обзор научной информации, посвященной исследованиям в области разработки систем непрерывного мониторинга технического состояния строительных конструкций. Показана необходимость применения данных систем на объектах, представляющих потенциальную опасность для персонала, населения и окружающей среды.

Область применения исследований. Представленные результаты могут быть использованы в сфере обеспечения безопасности зданий и сооружений.

Ключевые слова: системы непрерывного мониторинга, техническое состояние, строительные конструкции, технология контроля.

(Поступила в редакцию 6 апреля 2021 г.)

Введение

С каждым годом затраты, связанные с обслуживанием сложных строительных конструкций военного и гражданского назначения, неуклонно возрастают, причем для проведения регламентных ремонтных работ требуются все большие объемы финансирования. Данная тенденция наблюдается как за счет ежегодного увеличения количества обслуживаемых объектов, так и за счет естественного старения зданий и сооружений, а также снижения коэффициента запаса прочности, что связано со снижением материалоемкости конструкций. Временное прекращение эксплуатации таких объектов, как горнодобывающие шахты, морские буровые установки, нефтяные и газовые перекачивающие станции, аэропорты, пешеходные, автомобильные и железнодорожные мосты, а также других сооружений на профилактические и регламентные ремонтные работы обходится чрезвычайно дорого. Бездействие в таких ситуациях неизбежно приведет к выходу из строя несущих конструкций данных объектов и, как следствие, к техногенным катастрофам, ликвидация которых в денежном эквиваленте соизмерима с бюджетом отрасли. Вполне очевидно, что в этом случае необходима разработка новых подходов для непрерывного мониторинга функционирования сложных строительных конструкций в реальном масштабе времени, обладающих предсказательной возможностью ее безопасного срока эксплуатации [1].

Необходимость создания систем мониторинга строительных конструкций также вытекает из того факта, что ряд объектов инфраструктуры как гражданского, так и военного назначения находятся в эксплуатации уже многие годы. Как ожидается, многие объекты, созданные 20–30 лет тому назад, будут эксплуатироваться в ближайшем будущем. Снижение вероятности техногенных катастроф при дальнейшей эксплуатации, например пешеходных, автомобильных, железнодорожных мостов и других промышленных объектов, возможно только при наличии систем контроля, адекватно отображающих как целостность конструкций, так и безопасность эксплуатации. Необходимо отметить, что мониторинг позволит устранить дорогой, а также иногда непомерно частый и необоснованный ремонт. Кроме того, с вводом в эксплуатацию новых военных и промышленных объектов, плавучих буровых установок, уникальных высотных зданий и целого ряда других конструкций, требующих

применения новых материалов и новых конструкторских решений, потребность мониторинга их технического состояния и прогнозирования срока службы становится чрезвычайно важной задачей [2].

В США ведущими научно-исследовательскими центрами, такими как NASA Langley Research Center, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Los Alamos National Laboratory, Naval Research Laboratory, с 2000 г. интенсивно ведутся работы по программе SHM (Structural Health Monitoring), цель которой заключается в разработке расчетных и экспериментальных методов отслеживания технического состояния конструкций в целом по их собственным деформационным и акустическим колебаниям в условиях старения и экстремальных воздействий, а также систем диагностики на их основе. Необходимо отметить, что в статистической постановке концепция мониторинга ресурса и состояния конструкций предполагает решение следующих задач: оперативная оценка, сбор и селекция данных, выделение параметров и обработка данных, разработка статистических моделей и критериев для выявления особенностей снижения ресурса. В результате выполнения этих исследований и разработок был сделан вывод, что создание систем мониторинга и диагностики сдерживается в первую очередь отсутствием сверхширокополосных сенсоров динамической деформации генераторного типа, чувствительность которых на порядок превосходит чувствительность современных аналогов на основе полупроводниковых материалов.

Все вышесказанное определяет актуальность решения проблемы создания систем непрерывного мониторинга функционирования сложных конструкций в реальном масштабе времени на основе применения новых датчиков динамической деформации и новых технологий анализа состояния объекта.

Цель работы: провести анализ разработок по обеспечению безопасной эксплуатации объектов (зданий и сооружений, мостов и тоннелей, шахт и других строительных конструкций) за счет организации дистанционного мониторинга их напряженно-деформированного состояния путем применения систем тензометрических, потенциометрических и пьезоэлектрических датчиков механической деформации и усилий.

Основная часть

Современные системы контроля технического состояния

Широко используемые в настоящее время системы неразрушающего контроля (СНК) – ультразвуковая дефектоскопия, магнитная рентгенография, акустическая эмиссия, метод проникающих жидкостей и т.д., хорошо зарекомендовали себя на стадии производства отдельных компонентов сложных систем [3], но оказались малопригодными для мониторинга сложных и ответственных конструкций во время всего срока эксплуатации. Поэтому неудивительно, что системы непрерывного мониторинга (СНМ) появились как естественное развитие традиционных технологий СНК, чтобы удовлетворить новым техническим условиям и требованиям. Более того, в связи с бурным развитием вычислительной техники, электроники, устройств сбора данных, систем передачи информации с использованием радио- и оптоволоконной связи задача разработки систем непрерывного мониторинга стала реально выполнимой. Существенное отличие систем непрерывного мониторинга от традиционных концепций неразрушающего контроля состоит в том, что окончательная цель СНМ заключается в установлении истинного срока службы конструкций в автоматическом режиме с минимальными трудозатратами [4].

Технология контроля СНМ включает четыре основных уровня:

- 1) определение существования повреждения в конструкции;
- 2) определение типа повреждения и его локализации;
- 3) классификация серьезности повреждения;
- 4) прогноз остающегося срока службы, основанный на оценке степени влияния эксплуатационных условий на повреждение конструкции.

Основные задачи, решаемые с помощью СНМ:

- 1) сбор первичной информации от датчиков на объекте и передача информации в центр мониторинга технического состояния;
- 2) визуализация информации с объекта;
- 3) анализ информации, полученной от датчиков, с проведением оценки состояния объекта, выявления критичности состояния объекта и формирование отчета о критическом состоянии объекта;
- 4) визуализация отчета о критическом состоянии объекта с одновременным определением адреса объекта и оповещением органов аварийно-восстановительной службы, органов и подразделений МЧС, администрации населенного пункта.

Краткое сравнение традиционных методов СНК и новой технологии СНМ приведено в таблице, где показаны очевидные различия между этими двумя подходами.

Таблица 1. – Сравнительная характеристика технологий СНК и СНМ

Показатели	Система неразрушающего контроля (СНК)	Система непрерывного мониторинга (СНМ)
Цели	Обнаружение локального структурного повреждения	Непрерывная количественная оценка степени целостности конструкции, включая обнаружение повреждения и его влияния на функционирование конструкции в целом
Временной интервал эксплуатации	Не используется история развития дефекта	Эволюция развития дефектов является основным параметром непрерывного контроля
Обслуживание	На основе заранее составленного списка профилактического осмотра	На основе количественных данных, поступающих в режиме онлайн
Типичные методы	Визуальный осмотр, применение проникающей жидкости, ультразвуковая дефектоскопия, магнитная рентгенография, акустическая эмиссия отдельных элементов системы, замена частей системы по регламентному списку	На основе обнаружения и эволюции развития нелинейных эффектов в системе в частотном представлении
Физика	Капиллярное действие, электрические и магнитные свойства материалов, распространение волн, рентгеновское излучение	Динамические изменения физических свойств в результате появления нарушений целостности конструкции
Формат повреждения	Трещины (внутренние и поверхностные), пустоты, поверхностная коррозия и т.д.	Любой вид структурного повреждения
Аппаратура	Хорошо инструментированный	Аппаратурное обеспечение только разрабатывается
Датчик	Строго определенный тип датчика, соответствующий используемому методу контроля	Интеграция массива однотипных датчиков в систему элементов
Возможности	Прямой доступ с целью определения местоположения повреждения	Прямой доступ не является необходимым
Стоимость обслуживания	Высокая	Низкая
Операционное руководство	Отсутствие информации в интервале между проведением регламентных осмотров	Непрерывный автоматический мониторинг, обеспечивающий при возникновении дефекта и установлении степени повреждения автоматическое подключение экспертной системы, которая после анализа назначает время проведения регламентных работ

Впервые система непрерывного мониторинга была применена для обнаружения возможного появления трещин в фундаменте крупного радара [5]. В работе [6] впервые было

предложено использовать для контроля технического состояния мостов распределенную диагностическую систему СНМ.

В Лос-Аламосской Национальной лаборатории [7] проведены исследования по применению СНМ с использованием методики распознавания образов на основе данных виброметрии с целью обнаружения повреждений в гражданских строениях (мосты, крупные здания, хранилища нефтепродуктов и т.д.). На сегодня наиболее законченные исследования по разработке и использованию СНМ, стимулированные потребностью в диагностике на герметичность авиационных и космических конструкций (шаттлов и ракеты X-33 – носителя многократного использования), проведены в NASA и Lockheed Martin [8].

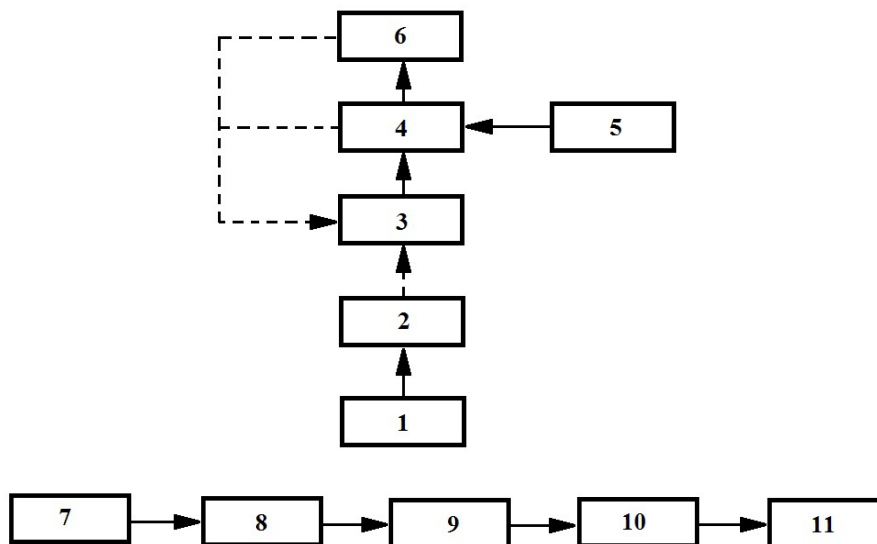
Системы непрерывного мониторинга строительных конструкций в ближайшем будущем непременно войдут в число стандартизованных методик при условии опережающего развития технологий производства чувствительных элементов, специально предназначенных для данных систем, и создания алгоритма обработки информации, поступающей с системы датчиков. С учетом того обстоятельства, что стоимость обслуживания объектов военного и гражданского назначения увеличивается весьма быстро и определяется растущими финансовыми потребностями стареющей инфраструктуры, проведение исследований в области создания СНМ является одним из приоритетных направлений научно-исследовательской деятельности как в Республике Беларусь, так и в Азербайджанской Республике. Например, одной из главных причин высокой стоимости обслуживания мостов является тот факт, что проверку технического состояния конструкций специалисты выполняют вручную, причем с увеличением времени эксплуатации требуется проведение дополнительной инспекции, что опять же увеличивает стоимость обслуживания, которая может уменьшиться только при использовании мониторинга целостности конструкции, проводимого с применением СНМ в режиме онлайн, объективно отображающем состояние конструкции. Замена ежедневных инспекций, проводимых вручную, на автоматический мониторинг позволит существенно уменьшить издержки, связанные с поддержанием жизненного цикла сложных конструкций. Таким образом, как в Республике Беларусь, так и в Азербайджанской Республике существует острая потребность в разработке и применении надежных систем мониторинга состояния строительных конструкций, которые могут автоматически обрабатывать данные, оценивать техническое состояние и сигнализировать о необходимости вмешательства человека.

В настоящее время в Российской Федерации разработаны и запатентованы системы мониторинга технического состояния строительных объектов, которые могут быть использованы при проектировании и эксплуатации зданий и сооружений¹. Данные системы, по сравнению с существующими аналогами, позволяют устранить проблемы, связанные с недостаточной точностью диагностирования текущего технического состояния строительного объекта, повысить достоверность контроля конструкций, находящихся в аварийном или предаварийном состоянии за счет исключения систематических ошибок измерительных приборов и возможности взаимовязанного анализа измерений с различных приборов, повысить быстродействие за счет уменьшения массива обрабатываемой информации. При этом принцип действия систем основан на подготовке логической цепочки вывода данных, сформированной с использованием множества правил, основанных на применении булевых операций.

Принцип действия систем заключается в следующем (рис. 1). Из множества строительных конструкций выделяется подмножество, элементы которого подлежат контролю системой мониторинга (множество контролируемых элементов). Для каждого из таких элементов определяют один или несколько параметров, изменения значений которых позволяют судить об изменении деформационного состояния строительного элемента. Данный массив параметров образует множество, каждый из элементов которого может быть получен

¹ Способ мониторинга технического состояния строительных объектов и система мониторинга технического состояния строительных объектов: пат. RU 2672532 / А.М. Шахраманьян, Ю.А. Колотовичев, Д.А. Мозжухин. – Опубл. 11.05.2018.

на основе измерений, проведенных датчиками различной физической природы, что позволяет минимизировать систематическую ошибку измерений. Сплошными линиями на рисунке 1 показаны связи, которые будут присутствовать вне зависимости от выбора контролируемых элементов, измеряемых параметров и вида алгоритмов/обработчиков, пунктиром показаны связи, которые могут образовываться в частных случаях.



1 – множество датчиков; 2 – множество измеряемых величин; 3 – множество обработчиков; 4 – множество контролируемых параметров; 5 – множество отклонений; 6 – множество контролируемых элементов; 7 – блок датчиков; 8 – блок регистрации измерений; 9 – блок расчета контролируемых параметров; 10 – блок аналитической обработки; 11 – блок отображения мониторинговой информации

Рисунок 1. – Схема системы мониторинга технического состояния зданий и сооружений

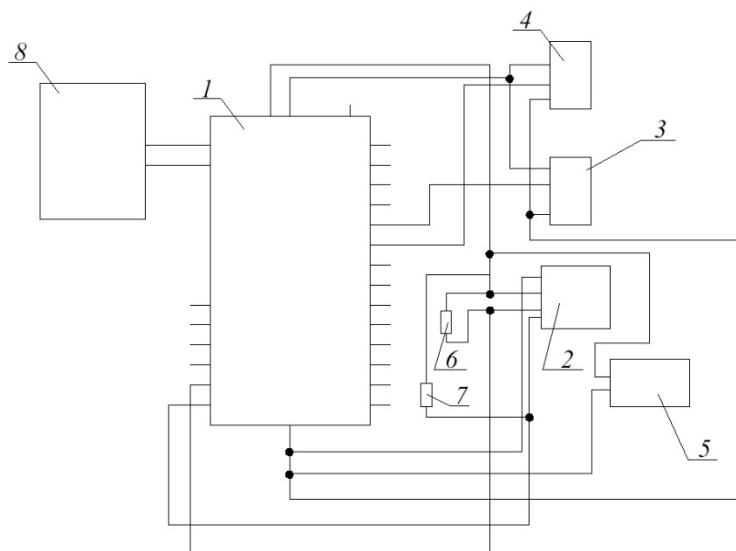
Заключение

Перспективы развития систем непрерывного мониторинга

В различных отраслях промышленности эксплуатируются объекты и используются технологии, представляющие потенциальную опасность для персонала, населения и окружающей среды. В связи с этим возникла необходимость применения систем непрерывного мониторинга в течение всего цикла эксплуатации объектов.

В Республике Беларусь и Азербайджанской Республике, несмотря на значительное число теоретических и экспериментальных работ в области неразрушающего контроля, технической диагностики, дефектоскопии и оценки ресурса прочности распределенных систем вида «конструкция – воздействия», появление законченных теоретических и практических результатов по оценке ресурса прочности конструкции на сегодня не получило повсеместного применения. В настоящее время экспериментальные исследования строительных конструкций посвящены в основном изучению подсистем и элементов. Экспериментальные исследования широкополосных динамических деформаций в области упругости и упруго-пластичности материалов конструкций для их ранней диагностики в первую очередь затруднены отсутствием миниатюрных средств измерения динамической деформации с высокой чувствительностью и широкой полосой спектра измерения.

Следует отметить, что проведены исследования по разработке противопожарных систем непрерывного мониторинга, предназначенных для обнаружения и ликвидации пожара на начальной стадии в автоматическом режиме [9]. При этом за счет точности определения очага пожара обеспечивается использование минимального количества огнетушащих веществ. Конструкция разработанной системы представлена на схеме (рис. 2).



1 – программируемый модуль обработки сигналов датчиков и управления сервоприводами; 2 – пиродатчик; 3 – горизонтальный сервопривод; 4 – вертикальный сервопривод; 5 – целеуказатель пиродатчика; 6, 7 – резисторы; 8 – визуализатор

Рисунок 2. – Схема противопожарной системы непрерывного мониторинга [9]

Мониторинг защищаемого пространства происходит по заранее заданному алгоритму работы программы. На основании результатов мониторинга подается сигнал на включение системы пожаротушения. При этом процесс обхода контролируемых точек проводится два раза для исключения ложного срабатывания устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасовец, В.Н. Пути снижения рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с разрушением строительных конструкций / В.Н. Пасовец [и др.] // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 3–7.
2. Пасовец, В.Н. Применение тензометрических датчиков в системах непрерывного мониторинга основных несущих конструкций зданий и сооружений / В.Н. Пасовец, В.А. Ковтун, С.Г. Короткевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2012. – Т. 7, № 1. – С. 34–38.
3. Пасовец, В.Н. Практическое применение систем непрерывного мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений различного назначения с целью снижения риска возникновения чрезвычайных ситуаций / В.Н. Пасовец, С.Г. Короткевич // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 42–47.
4. Бирюк, В.А. Неразрушающие методы контроля агрегатов и узлов пожарной аварийно-спасательной техники / В.А. Бирюк, В.Н. Пасовец, М.М. Журов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 387–396. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-4.389.
5. Bridge deck evaluation with ground penetrating radar / D. Huston [et al.] // Proceedings of the International workshop on structural health monitoring, Stanford, 18–20 September 1997. – Stanford: Stanford University. – Pp. 91–102.
6. Vector auto-regressive modal analysis with application to ship structures / C.-S. Li [et al.] // Journal of Sound and Vibration, 1997. – Vol. 167, No. 1. – Pp. 1–15.
7. A Review of Structural Health Monitoring. Literature: 1996-2001. Los Alamos National Laboratory Report. – Los Alamos: LA-47656-MS, 2002. – 320 p.
8. Derriso, M.M. Integrated vehicle health management: the key to future aerospace systems / M.M. Derriso // Proceedings of the 4th International workshop on structural health monitoring, Stanford, 15-17 September 2003. Stanford. – P. 3–11.
9. Пасовец, В.Н. Система точного обнаружения очага возгорания / В.Н. Пасовец, Я.С. Волчек, А.Г. Савчук // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 153–158. DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.153.

**Предупреждение чрезвычайных ситуаций, связанных
с разрушением инженерных конструкций**
Prevention of emergencies caused by destruction of engineering structures

Ковтун Вадим Анатольевич

доктор технических наук, профессор

Гомельский филиал государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра оперативно-тактической деятельности и техники, профессор

Адрес: пр-т Речицкий, 35А,
246023, г. Гомель, Беларусь

e-mail: vadimkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9510-132X

Vadim A. Kovtun

Grand PhD in Technical Sciences, Professor

Gomel Branch of the State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Operational-Tactical Activity and Technical Equipment, Professor

Address: av. Rechitskiy, 35A,
246023, Gomel, Belarus

e-mail: vadimkov@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-9510-132X

Пасовец Владимир Николаевич

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной аварийно-спасательной техники, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: pasovets_v@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9451-9513

Vladimir N. Pasovets

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Rescue Equipment, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: pasovets_v@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9451-9513

Танырверди Али Магамед оглы

Министерство по чрезвычайным ситуациям Азербайджанской Республики,
Государственная служба пожарного надзора, инспектор-инженер

Адрес: ул. М. Мушвига, 501,
AZ1073, г. Баку, Азербайджан

e-mail: ali_can92@mail.ru

Ali M. Tanirverdi

Ministry for Emergency Situations of the Republic of Azerbaijan,
State Fire Supervision Service,
Inspector-engineer

Address: M. Mushviq str., 501,
AZ1073, Baku, Azerbaijan

e-mail: ali_can92@mail.ru

Антоненко Максим Алексеевич

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», магистрант

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: keksss2007@mail.ru

Maksim A. Antonenko

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus»,
Graduate Student

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: keksss2007@mail.ru

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.335>

PREVENTION OF EMERGENCIES CAUSED BY DESTRUCTION OF ENGINEERING STRUCTURES

Kovtun V.A., Pasovets V.N., Tanirverdi A.M., Antonenko M.M.

Purpose. To analyze developments to ensure the safe operation of objects (buildings and structures, bridges and tunnels, mines and other building structures) by organizing remote monitoring of their stress-strain state by using systems of strain-gauge, potentiometric and piezoelectric sensors of mechanical deformation and forces.

Methods. Theoretical analysis.

Findings. An overview of scientific information devoted to research in the development of systems for continuous monitoring of the technical condition of building structures is presented. The necessity of using these systems at facilities that pose a potential danger to personnel, population and the environment is shown.

Application field of research. The results can be used in the field of ensuring the safety of buildings and structures.

Keywords: continuous monitoring systems, technical condition, building structures, control technology.

(The date of submitting: April 6, 2021)

REFERENCES

1. Pasovets V.N., Kovtun V.A., Pleskachevskiy Yu.M., Ukrainets A.A., Marchenko S.A. Puti snizheniya riskov vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy, svyazannykh s razrusheniem stroitel'nykh konstruksiy [Ways to reduce the risks of emergencies associated with the destruction of building structures]. *Chrezvychaynie situacii: obrazovanie i nauka*, 2011. Vol. 6, No. 2. Pp. 3–7. (rus)
2. Pasovets V.N., Kovtun V.A., Korotkevich S.G. Primenenie tenzometrichekikh datchikov v sistemakh nepreryvnogo monitoringa osnovnykh nesushchikh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy [Application of strain gauge sensors in continuous monitoring systems of the main bearing structures of buildings and structures]. *Chrezvychaynie situacii: obrazovanie i nauka*, 2012. Vol. 7, No. 1. Pp. 34–38. (rus)
3. Pasovets V.N., Korotkevich S.G. Prakticheskoe primeneniye sistem nepreryvnogo monitoringa nesushchikh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy razlichnogo naznacheniya s tsel'yu snizheniya riska vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy [Practical application of systems for continuous monitoring of load-bearing structures of buildings and structures for various purposes in order to reduce the risk of emergencies]. *Chrezvychaynie situacii: obrazovanie i nauka*, 2013. Vol. 8, No. 1. Pp. 42–47. (rus)
4. Biryuk V.A., Pasovets V.N., Zhurov M.M. Nerazrushayushchie metody kontrolya agregatov i uzlov pozharnoy avariyno-spatatel'noy tekhniki [Non-destructive testing methods of assemblies and units in fire emergency technique]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 4. Pp. 387–396. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-4.389.
5. Huston D. [et al.]. Bridge deck evaluation with ground penetrating radar / *Proc. International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, 18-20 September, 1997*. Stanford: Stanford University. Pp. 91–102.
6. Li C.-S., Ko W.J., Lin H.T., Shyu R.J. Vector auto-regressive modal analysis with application to ship structures. *Journal of Sound and Vibration*, 1997. Vol. 167, No. 1. Pp. 1–15.
7. *A review of structural health monitoring. Literature: 1996-2001*. Los Alamos National Laboratory Report. Los Alamos: LA-47656-MS, 2002. 320 p.
8. Derriso M.M. Integrated vehicle health management: the key to future aerospace systems. *Proc. 4th International workshop on structural health monitoring, Stanford, 15–17 September 2003*. Stanford. Pp. 3–11.
9. Pasovets V., Volchek Ja., Savchuk A. Sistema tochnogo obnaruzheniya ochaga vozgoraniya [System of precise detection of the fire seat]. *Journal of Civil Protection*, 2017. Vol. 1, No. 2. Pp. 153–158. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2017.1-2.153.