

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ С МОНОЛИТНЫМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМ КАРКАСОМ

Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович

Белорусский национальный технический университет, Минск

email: snezhkov-d-u@yandex.by, snleonovich@yandex.ru

Необходимый уровень безопасности, как на стадии возведения, так и в период эксплуатации высотного здания может быть обеспечен системой автоматизированного мониторинга деформационного состояния его несущих конструкций. В статье представлен опыт эксплуатации системы автоматизированного мониторинга высотного здания с использованием датчиков углов наклона несущих колонн. В качестве методической основы обработки данных мониторинга рассмотрен корреляционный анализ углов наклона колонн каркаса здания.

Ключевые слова: мониторинг, информационная сеть, инклинометр, несущий каркас, угловое отклонение, деформация, корреляция.

AUTOMATED MONITORING OF A HEIGHT BUILDING WITH A MONOLITHIC FERRO-CONCRETE FRAMEWORK

D. Snezhkov, S. Leonovich

Belarusian National Technical University, Minsk

email: snezhkov-d-u@yandex.by, snleonovich@yandex.ru

The necessary level of safety, both at the stage of construction, and during building operation can be ensured by the automated monitoring system of stress-strain state of load-bearing structures. The article presents the experience of operating a system for automated monitoring of a high-rise building using inclination sensors of bearing columns. As a methodological basis for the processing of monitoring data, a correlation analysis of the slope angles of the building frame columns is proposed.

Keywords: monitoring, information network, inclinometer, load-bearing framework, angular deviation, deformation, correlation

Введение. Наибольшую опасность при эксплуатации строительных объектов представляет собой процесс прогрессирующего обрушения конструкций [1], когда вплоть до катастрофического развития этого процесса явных внешних признаков потери несущей способности конструкции не наблюдается. Своевременно обнаружить начальную стадию такого рода событий возможно путем непрерывной регистрации деформационного состояния несущих конструкций, при соответствующей чувствительности измерительной системы. В мировой практике высотного строительства уже накоплен некоторый опыт эксплуатации информационно-измерительных систем автоматизированного мониторинга несущих конструкций. Несколько таких систем эксплуатируется в Республике Беларусь.

Первой задачей, с которой приходится сталкиваться при создании системы автоматизированного мониторинга, является сокращение перечня контролируемых параметров, который в значительной мере определяет её стоимость. Идеальным, конечно, было бы снабдить каждый элемент силового каркаса здания всем перечнем сенсоров. В реальности, конструктору приходится руководствоваться принципом разумной достаточности, ориен-

тируясь на диапазон рабочих нагрузок, вероятные техногенные и прочие факторы, а также характер использования помещений. Установка датчиков линейной деформации, независимо от физического принципа их работы, требует, как правило, достаточно протяженной базы, на которой производится регистрация взаимного перемещения контрольных точек конструкции [2], что может быть неприемлемым по архитектурным или эстетически соображениям. Сильная связанность элементов железобетонного монолитного каркаса здания в пределах каждого этажа и, соответственно, взаимная зависимость деформации элементов, позволяет минимизировать число контролируемых элементов каркаса. В качестве информационных параметров для оценки деформации несущего каркаса могут быть использованы только углы наклона нескольких ключевых конструкций каркаса. Типичные образцы датчиков угловых перемещений -инклинометров (см. рисунок 1), обеспечивают измерение углов своего наклона в двух ортогональных вертикальных плоскостях X и Y с погрешностью не превосходящей 10^{-3} углового градуса. А компактность конструкции типовых моделей инклинометров в совокупности с беспроводным интерфейсом позволяют их легко устанавливать на элементах каркаса зданий находящихся в эксплуатации.

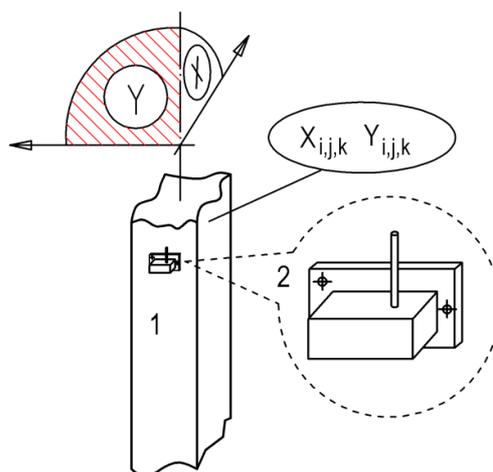


Рисунок 1. – Установка сенсора-инклинометра (2) на контролируемой колонне (1)

Другой важный вопрос, возникающий в начале эксплуатации системы автоматизированного мониторинга, – о предельных значениях контролируемых параметров. Отечественные нормативы -ТКП 45-3.02-108-2008, ТКП 45-1.01-234-2015 -дают лишь общие рекомендации (расстояние от верха фундамента до верха несущих конструкций покрытия h) не должны превышать:

- при h , м до 150 включительно – 1/500;
- то же до 200 – 1/600.

При высоте h от 150 до 200 м значения предельных горизонтальных перемещений следует определять интерполяцией.

Какими могут быть отклонения показателей отдельных элементов или конструкций приходится решать проектировщику. Перспективу в решении указанной задачи может открыть технология информационного моделирования зданий (*Building Information Modelling – BIM*). Разработанная на стадии проектирования и дополняемая в процессе возведения и эксплуатации трехмерная информационная модель здания, где для каждого элемента модели закладываются сведения о его упруго-деформативных и прочностных параметрах, позволит по изменению состояния группы контролируемых элементов, рассчитать состояние остальных. Соответственно можно решать и обратную задачу – выбрать «ключевые» элементы, наиболее чувствительные к вероятным деформациям каркаса.

Таким образом, создание системы мониторинга включает в себя решение следующих задач:

- выбора ключевых контролируемых элементов каркаса здания, обладающих наибольшей чувствительностью к вероятным видам деформации каркаса;
- выбора аппаратной основы измерительной системы, в первую очередь - перечня используемых сенсоров;
- формирования алгоритма оценки деформации силового каркаса здания по данным измерений состояния ключевых элементов каркаса, и на его основе – распознавание *alarm* – ситуации, при которой требуется принятие оперативных решений.

Технические средства системы мониторинга. Системой автоматизированного мониторинга «АККЕ», производства компании «Tieto-Oskari Oy» (Финляндия), оснащено высотное здание с монолитным железобетонным каркасом - «Современный многофункциональный торгово-развлекательный комплекс с гостиницей и паркингом на проспекте Победителей в г. Минске». Комплекс представляет собой 21-этажное здание, состоящее из двух основных частей: шестиэтажной стилобатной части (торгового центра) и 14-этажной гостиницы. Верхняя отметка здания – +85,650 м. Основу несущего каркаса объекта составляли несущие монолитные колонны, диски монолитных перекрытий и элементы поперечной жесткости. Основными аппаратными элементами системы сбора информации являются двухосевые сенсоры-инклинометры и центральный базовый блок, связь между которыми организована по сетевому принципу. Основные параметры сенсоров-инклинометров приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные технические характеристики инклинометра CMS-2D-R

Наименование характеристики	Значение
Количество осей (каналов) измерения	2
Тип подключения	радиоканал
Полный измеряемый диапазон	$\pm 15^\circ$
Разрешающая способность, аналоговая	$0,001^\circ$ (3,6")
Абсолютная погрешность	$\pm 1,8''$
Диапазон измеряемых температур встроенным датчиком, °C	от – 60 до + 125

Предусмотрены средства доступа к базовому блоку по выделенному каналу сети Internet. Контроль геометрических отклонений несущего каркаса производится сенсорами-инклинометрами имеющими беспроводной интерфейс, установленными на колоннах подвального, 7 и 21 этажах здания.

Дополнительно на кровле здания установлены проводные сенсор скорости и направления ветра и сенсор-акселерометр. Кроме датчика угловых перемещений каждый сенсор-инклинометр имеет в своем составе датчик температуры с разрешением $0,1^\circ\text{C}$. Обработка сигналов сенсоров происходит в режиме реального времени в центральном базовом блоке системы.

Автономный режим базового блока системы позволяет получать информацию от всех сенсоров, производя накопление данных с различным временным разрешением. Хранение данных мониторинга в базовом блоке производится на протяжении 20 лет непрерывного функционирования системы. В типовой настройке базового блока предусматривается организация массива накопленных данных сенсоров-инклинометров в виде трех файлов, содержащих отсчеты данных с разрешением в 1 сут, 1 ч и 15 мин. Размер каждого файла ограничен ~250 записями, каждая из которых является результатом усреднения отсчетов сенсоров за соответствующий интервал времени. Типовое расположение сенсоров – инкли-

нометров – на угловых колоннах несущего каркаса здания. Схемотехническое исполнение инклинометров и базового блока позволяет их дистанционное конфигурирование: установку параметров чувствительности сенсоров и их начального – нулевого значения отсчетов, периода опроса, параметров конфигурирования информационной сети и др.

Результаты мониторинга. В основе мониторинга конструкций лежит принцип регистрации угловых отклонений сенсора от нормального (первоначального) положения в режиме реального времени. Накопление данных от сенсоров-инклинометров, датчика скорости и направления ветра, и акселерометра осуществлялось в базовом блоке системы. Визуализация деформационных изменений состояния элементов несущего каркаса здания выполнялась путем построения годографов угловых перемещений колонн в полярных координатах, привязанных к выбранной приведенной системе координат X^*Y^* . Угловая координата ang годографа рассчитывалась по формуле

$$ang = arctg\left(\frac{x^*}{y^*}\right), \quad (1)$$

где x^*, y^* – значения угловой координаты каждого сенсора в приведенной системе. Расчет модулей mod углов каждого сенсора производился по формуле

$$mod = \sqrt{(x^*)^2 + (y^*)^2}. \quad (2)$$

На рисунке 2 приведены годографы перемещений сенсоров 7 и 21 этажей высотного здания в плоскости осей X^*, Y^* . За период наблюдений (19.08.2015 – 13.03.2018) средняя величина перемещений по этажам составила 0,007...0,025 углового градуса. Значимая корреляция средних значений угла наклона колонн по этажам не выявлена, что косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком. Для уточнения наблюдаемой деформационной картины выполнен корреляционный анализ сигналов сенсоров в пределах отдельных этажей, а также оценка корреляции усредненных углов наклона между этажами, и определена корреляция угловых отклонений контролируемых элементов объекта с их температурой.

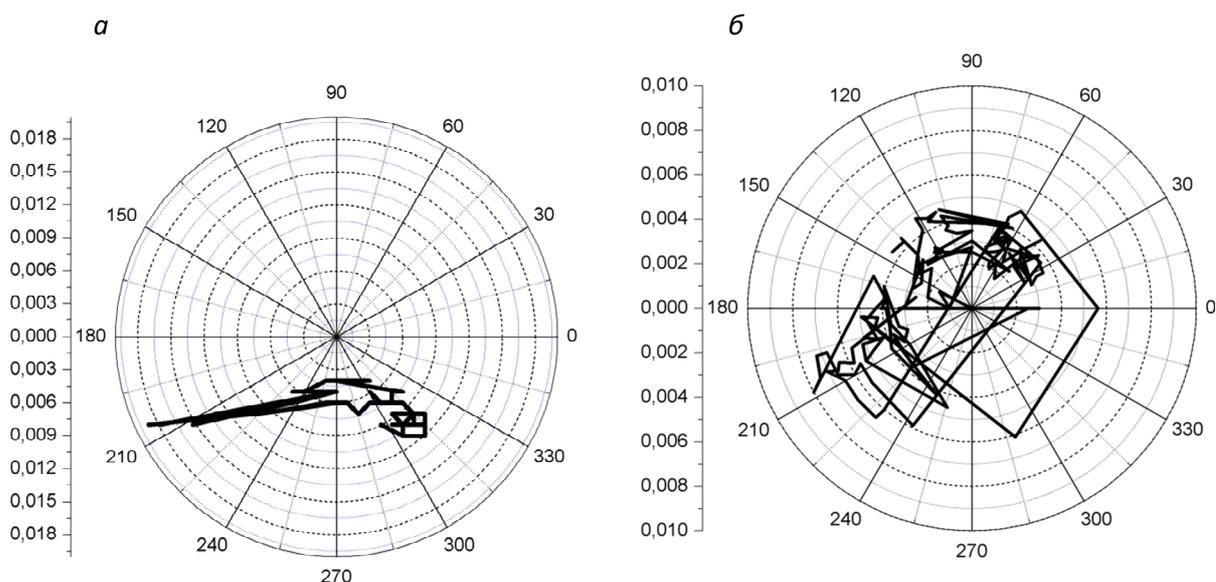


Рисунок 2. – Примеры годографов наклона колонн 7 (а) и 21 (б) этажей высотного здания а период с апреля 2017 г. по март 2018 г.

В таблице 2 приведены значения межэтажных коэффициентов взаимной корреляции средних значений модулей наклона и средних значений азимутов наклона колонн.

Таблица 2 – Коэффициенты корреляции средних по этажам модулей векторов наклона колонн

Этажи	Коэффициент корреляции mod годографов	Коэффициенты корреляции азимутов годографов
21эт – 7эт	-0,22	-0,27
21эт - подвал	0,03	-0,05
7эт - подвал	0,52	-0,13

Результаты анализа показали (см. табл. 1), что взаимная корреляция среднего значения модулей углов наклона колонн этажей, за исключением этого показателя для 7 этажа и подвала, не является значимой. Корреляция азимутальных углов также практически отсутствует. Это косвенно указывает на отсутствие наклонных перемещений всего здания целиком. Годографы векторов деформации отдельных колонн (см. рис. 2) имеют стохастический характер и не выходят за пределы характерной устойчивой области, что также свидетельствует об отсутствии накопления деформаций вследствие усадочных процессов в элементах конструкций и фундаменте здания. Выявлена значимая корреляция угловых деформационных перемещений колонн от температуры. На рисунке 3 показаны совместные диаграммы изменений модуля угла наклона одной из колонн и температуры. Для датчиков высотной части здания устойчивое и близкое к 1 значение коэффициента корреляции наблюдалось в интервале температур +12...+32°С (рис. 4). Для сенсоров подвальной части характерной температурой (рис. 5) явилось значение 19...20°С, при отклонении от которого коэффициент корреляции угла наклона и температуры менял знак.

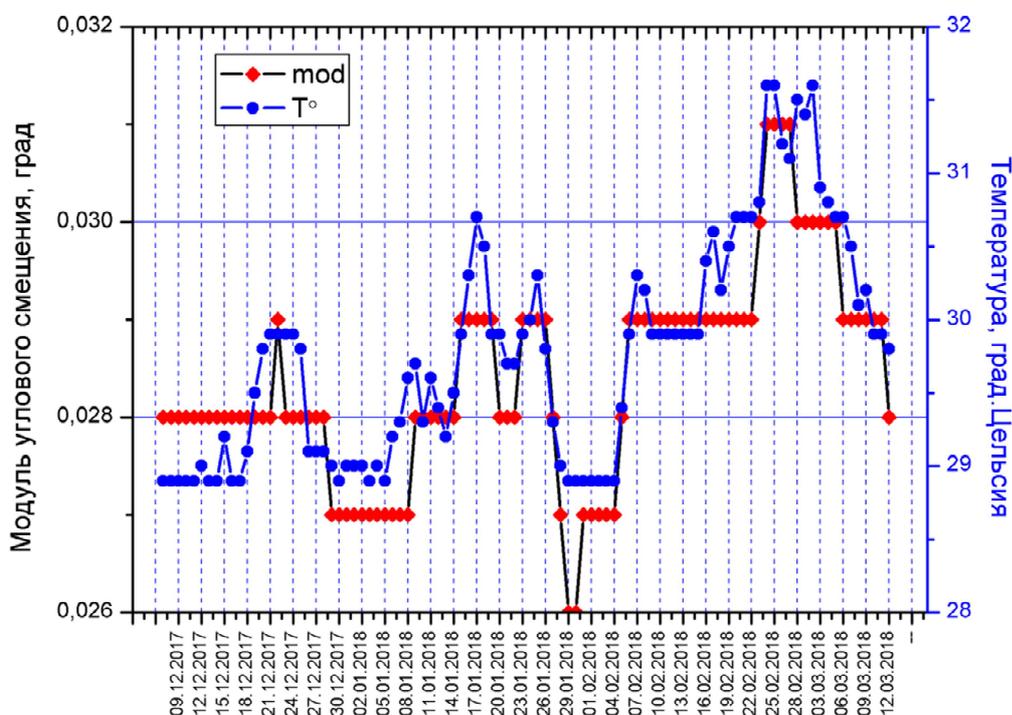


Рисунок 3. – Временные диаграммы угловых смещений сенсора подвала здания и его температуры за период декабрь 2017 г. – март 2018 г.

Динамика деформационных процессов представлена медленными – период колебаний порядка 3...6 сут – изменениями углов наклона контролируемых колонн с амплитудой не более $0,001^\circ$. Анализ данных с часовым и 15-минутным временным разрешением также не выявил высокочастотных процессов. Временные диаграммы имеют плавный характер без признаков динамических и ударных нагрузок.

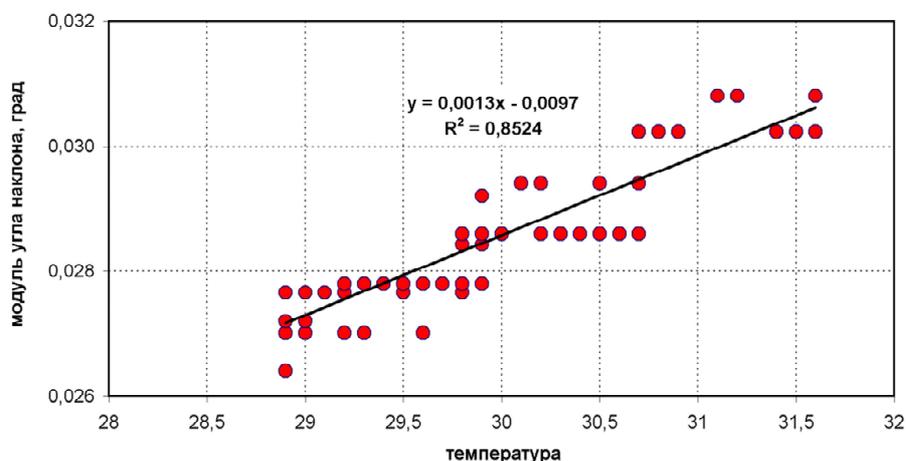


Рисунок 4. – Зависимость модуль угла наклона колонны ID-02 от температуры: коэффициент детерминации $r^2 = 0,85$; коэффициент регрессии – $0,0013$

Кроме измерений квазистатических деформационных эволюций каркаса здания, в системе мониторинга предусматривалась регистрация вибрационных ускорений. Запуск автоматической регистрации потока данных сенсора-акселерометра происходит по событию превышения сигналом любой из трех пространственных координат X, Y, Z значения $1 \text{ mg} \approx 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$. После запуска происходит запись значений пространственных составляющих вектора ускорения с временным разрешением 30 мс. На рисунке 6 приведены временные диаграммы сигналов акселерометра, зарегистрированные 12.09.2017 в 9 ч 06 мин.

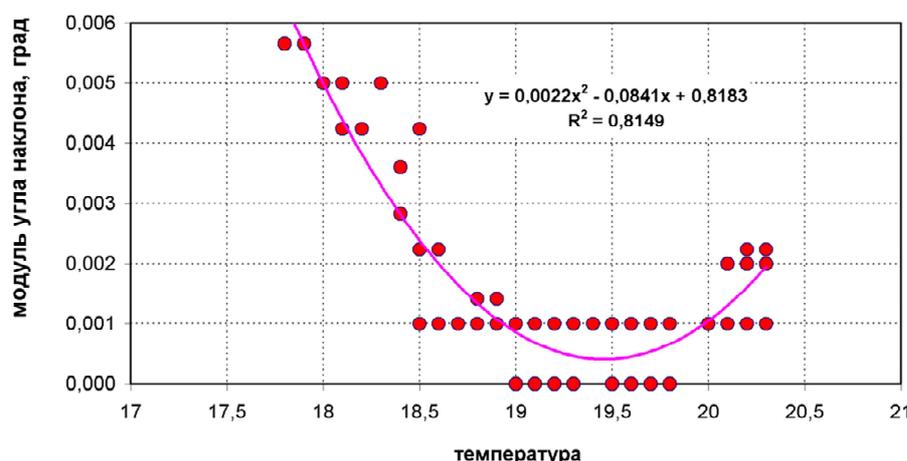


Рисунок 5. – Зависимость модуль угла наклона колонны ID-13 от температуры: коэффициент детерминации $r^2 = 0,81$; коэффициент регрессии – $-0,084$

Начальная часть сигнала, вызвавшая запуск регистрации, обусловлена, вероятно, однократной ударной нагрузкой. Установившийся сигнал акселерометра имеет квазипериодический характер с периодом порядка 90...100 мс, что обусловлено, вероятно, вибрацией технологического оборудования здания – лифтов, вентиляции и др. Амплитуда установившихся колебательных ускорений практически неизменна и сохраняет свое значение на

уровне 0,1...0,3 mg. Кроме указанного, других событий превышения вибрациями установленного порога не зарегистрировано.

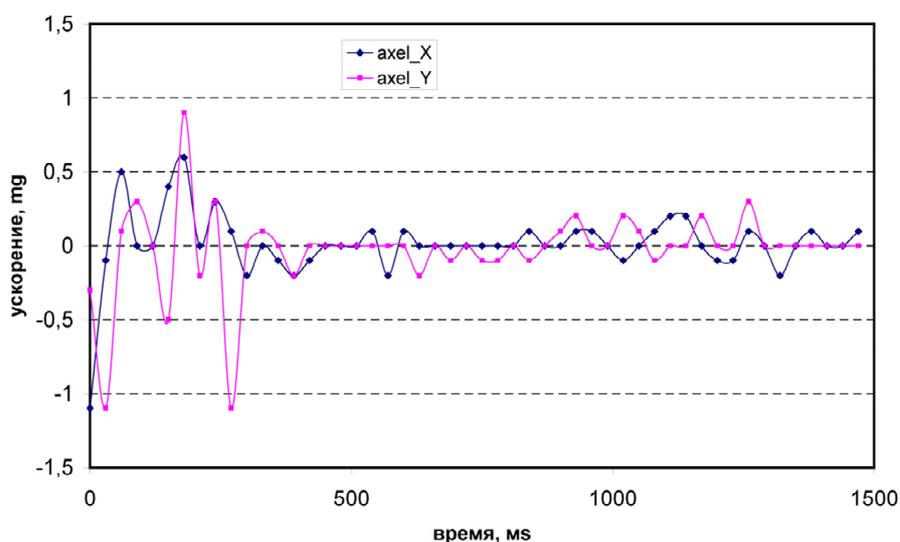


Рисунок 6. — Временные диаграммы пространственных составляющих вектора ускорения: регистрация 12.09.2017 в 09 ч 06 мин

Заключение. При возведении высотных (высотным является многоэтажное здание жилого назначения высотой от 75 до 100 м включительно, общественного и многофункционального назначения - высотой от 50 до 200 м включительно) и уникальных по архитектуре зданий зачастую становится проблематичным использовать несущие конструкции с большими запасами прочности, что при сочетании неблагоприятных факторов может увеличить риск их разрушения. С целью обеспечения необходимого уровня безопасности, как на стадии возведения, так и в период эксплуатации здания, важную роль приобретают системы автоматизированного мониторинга за деформационным состоянием несущих конструкций здания. Выполненные работы показали высокую эффективность использования инклинометров в качестве измерительной основы автоматизированной системы мониторинга несущего каркаса строительных объектов. Выявлено сильное влияние на показатели деформации элементов несущего каркаса здания температуры. Показатели чувствительности и долговременной стабильности метрологических характеристик инклинометров позволяют регистрировать практически любые деформационные изменения геометрии несущего каркаса здания, в том числе, обусловленные вариацией температуры. Данные мониторинга подтверждают статистическую обоснованность значений чувствительности сенсоров инклинометров – 0,001 углового градуса. В качестве методической основы обработки данных системы предлагается корреляционный анализ приращений углов наклона ключевых конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьев, В.В. Автоматизированные станции мониторинга деформационного состояния (СМДС) и их применение на строительных объектах / В.В. Гурьев [и др.] // Стройпрофиль. – 2009. – № 1 (71). – С. 3–6.
2. Информационные технологии в строительстве / В.Т. Минченя [и др.] // Актуальные проблемы инновационной подготовки инж. кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. / БНТУ. – Минск, 2015. – С. 174–180.
3. Снежков, Д.Ю. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами / Д.Ю. Снежков, С.Н. Леонович. – Минск : БНТУ, 2016. – 330 с.