

УДК 691.32

МРНТИ 67.01.81

DOI 10.55452/1998-6688-2021-18-1-168-175

## РАЗРАБОТКА ИТ-АРХИТЕКТУРЫ ДАТЧИКА БЕСПРОВОДНОГО МОНИТОРИНГА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

УТЕПОВ Е.Б.<sup>1,2</sup>, ТУЛЕБЕКОВА А.С.<sup>1,2</sup>, КАЗКЕЕВ А.Б.<sup>1,3</sup><sup>1</sup>ТОО «CSI Research & Lab»<sup>2</sup>НАО Евразийский Национальный университет имени Л.Н. Гумилева<sup>3</sup>НАО Государственный университет имени Шакарима

**Аннотация:** Рост конкуренции, а также нестабильность мировой экономики в отрасли вынуждает строительные компании снижать расходы при возведении зданий и сооружений, обеспечивая наиболее привлекательную цену за квадратный метр для потребителей. Для снижения расходов строительные компании применяют в своей практике современные цифровые технологии. На сегодняшний день наиболее эффективным и часто применяемым решением в мировой практике является применение датчиков зрелости, при помощи которых можно оптимизировать процесс заливки и распалубливания железобетонных конструкций. За счет точного и своевременного обнаружения момента прочности бетона сокращаются сроки строительства, снижаются трудозатраты и соответственно экономятся средства. Данная статья посвящена разработке усовершенствованной ИТ-архитектуры датчиков зрелости. На начальном этапе разработки был произведен опрос потенциальных пользователей, в результате чего были составлены основные технические требования к датчику. В ходе разработки была предложена схема обмена данными между ССД и БДМ по топологии «Звезда», а в качестве интерфейса беспроводной связи, выполняющей требования системы, была выбрана энергоэффективная сеть LPWAN с протоколом LoRaWAN. Это позволило решить основную проблему зарубежных аналогов датчиков зрелости – одновременная синхронизация данных с большого количества датчиков. Также LoRaWAN имеет больший радиус действия по сравнению с Bluetooth, который используется в зарубежных аналогах. В результате разработки ИТ-архитектуры были реализованы все основные технические требования, составленные во время опроса потенциальных пользователей. Так как в разработанной ИТ-архитектуре предусмотрен обмен и накопление информации с множества датчиков, в дальнейшей перспективе возможно создание больших данных (Big data).

**Ключевые слова:** ИТ-архитектура, датчик зрелости, LoRaWAN, неразрушающий контроль прочности, бетон

## ТЕМІР-БЕТОН КОНСТРУКЦИЯЛАРЫНЫҢ БЕРІКТІГІН СЫМСЫЗ БАҚЫЛАУ ДАТЧИГІНІҢ ІТ-АРХИТЕКТУРАСЫН ӘЗІРЛЕУ

**Аңдатпа:** Бәсекелестіктің өсуі, сондай-ақ саладағы әлемдік экономиканың тұрақсыздығы құрылыс компанияларын тұтынушылар үшін шаршы метрге ең тартымды бағаны қамтамасыз ете отырып, ғимараттар мен құрылыстарды салу кезінде шығындарды азайтуға мәжбүр етеді. Шығындарды азайту үшін құрылыс компаниялары өз тәжірибесінде заманауи сандық технологияларды қолданады. Бүгінгі таңда әлемдік тәжірибеде ең тиімді және жиі қолданылатын шешім бұл жетілу сенсорларын қолдану, олардың көмегімен темір-бетон конструкцияларын құю және сусыздандыру процесін оңтайландыруға болады. Бетонның беріктік сәтін дәл және уақтылы анықтауға байланысты құрылыс мерзімі қысқарады, еңбек шығындары азаяды және сәйкесінше қаражат үнемделеді. Бұл мақала жетілу сенсорларының жетілдірілген ИТ-архитектурасын дамытуға арналған. Дамудың бастапқы

бастапқы кезеңінде әлеуетті пайдаланушыларға сауалнама жүргізілді, нәтижесінде сенсорға негізгі техникалық талаптар жасалды. Әзірлеу барысында "Звезда" топологиясы бойынша МҚК мен БДМ арасында деректермен алмасу схемасы ұсынылды, ал LoRaWAN хаттамасымен LPWAN энергия тиімді желісі жүйенің талаптарын орындайтын сымсыз байланыс интерфейсі ретінде таңдалды. Бұл жетілу сенсорларының шетелдік аналогтарының негізгі мәселесін шешуге мүмкіндік берді – көптеген сенсорлармен деректерді бір уақытта синхрондау. Сондай-ақ LoRaWAN шетелдік аналогтарда қолданылатын Bluetooth-қа қарағанда үлкен ауқымға ие. IT-архитектурасын әзірлеу нәтижесінде әлеуетті пайдаланушылармен сауалнама жүргізу кезінде жасалған барлық негізгі техникалық талаптар іске асырылды. Әзірленген IT-архитектурада көптеген датчиктерден ақпарат алмасу және жинақтау көзделгендіктен, болашақтағы перспективада үлкен деректерді (Big data) құру мүмкіндігіне жол ашылады.

**Түйін сөздер:** IT-архитектурасы, жетілу сенсоры, LoRaWAN, бұзылмайтын беріктікті бақылау, бетон

## DEVELOPMENT OF AN IT ARCHITECTURE FOR A WIRELESS SENSOR FOR MONITORING THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

**Abstract:** Increased competition, as well as the instability of the global economy in the industry, is forcing construction companies to reduce costs when erecting buildings and structures, ensuring the most attractive price per square metre for consumers. To reduce costs, construction companies are using modern digital technologies in their practices. To date, the most effective and frequently used solution in global practice is the use of maturity sensors which can optimise the pouring and stripping process of reinforced concrete structures. By detecting the moment of concrete strength accurately and in good time, the construction period is reduced, labour costs are reduced and costs are saved accordingly. This paper focuses on the development of an improved IT architecture for maturity sensors. During the initial phase of development, a survey of potential users was carried out, resulting in the basic technical requirements for the sensor. In the course of development, a data exchange scheme was proposed between SSDs and PMs using Star topology, and an energy-efficient LPWAN with LoRaWAN protocol was selected as the wireless communication interface for the system fulfilling the requirements. This solved the main problem of foreign maturity sensor counterparts - simultaneous synchronisation of data from a large number of sensors. LoRaWAN also has a longer range than Bluetooth, which is used in foreign counterparts. As a result of the development of the IT-architecture, all the basic technical requirements drawn up during the survey of potential users were implemented. Since the developed IT architecture provides for the exchange and accumulation of information from multiple sensors, it is possible to create Big Data in the future.

**Key words:** IT architecture, maturity sensor, LoRaWAN, non-destructive strength testing, concrete

### Введение

В условиях нестабильности мировой экономики, усиления конкуренции и борьбы за потребителя строительные компании прибегают к последним достижениям современных цифровых технологий, обеспечивающих сокращение сроков строительства и снижения затрат. За счет снижения себестоимости строительства строительные компании могут предлагать более конкурентную цену за ква-

дратный метр и получать при этом большую прибыль [1]. Под себестоимостью строительных работ подразумеваются все затраты строительной организации на их производство и сдачу заказчику. Оптимальным решением является экономия за счет снижения косвенных расходов, представляющих из себя затраты на эксплуатацию и сервисное об-

служивание оборудования, электроэнергию и топливо, общепроизводственные расходы [2].

Наиболее эффективным решением для снижения накладных расходов является оптимизация цикла заливки железобетонных конструкций (далее – ЖБК) и снижение соответствующих трудозатрат [3-5]. Знание и понимание процессов, происходящих в теле бетона, позволяют добиться наивысшего качества и долговечности конструкции. При этом за счет своевременного обнаружения момента зрелости бетона и принятия дальнейшего решения о снятии опалубки и нагружении конструкции можно добиться сокращения накладных расходов: аренды техники, оборудования и площадей, затраты на сверхурочную работу работников, затраты на логистику и т.д. Помимо снижения накладных расходов таким образом сокращаются сроки строительства, что также положительно влияет на конечную стоимость объекта.

В мировой практике широкое применение в области контроля прочности бетона нашли так называемые «датчики зрелости» [6]. Неоспоримым преимуществом применения датчиков зрелости является автоматизация процесса определения прочности, при котором датчики закладываются в тело бетона и самостоятельно по заданному алгоритму производят замеры, и обеспечиваемая экономия времени и средств за счет своевременного обнаружения момента зрелости конструкции и оперативного принятия решения о ее дальнейшей нагрузке [7]. Однако, несмотря на все преимущества и потенциальные выгоды от использования датчиков, их применение в нашей стране ограничено ввиду относительной по сравнению с традиционными методами дороговизны и присутствия определенных проблем в IT-архитектуре, главным недостатком которой является невозможность синхронного контроля прочности бетона из-за ограничений Bluetooth. В результате этого работнику, производящему сбор данных, необходимо последовательно подключаться к каждому датчику по отдельности, что может быть крайне затруднительным при их большом количестве.

К сожалению, концепция применения датчиков зрелости в бетоне также малоизучена в нашей стране. Однако, работы в данном направлении все же ведутся. Так, например, авторами данной статьи был разработан прототип датчика для мониторинга ЖБК, описанный в статье [8], по которому получен патент [9]. Помимо разработки прототипа были подробно изучены схемы оптимального расположения датчиков в бетонных конструкциях. Так, было выявлено, что место размещения датчиков напрямую влияет на их количество, необходимое для конкретного монолитного каркаса здания [10]. Ввиду несовершенства IT-архитектуры существующих беспроводных датчиков зрелости, актуальной является разработка иной IT-архитектуры для датчиков, которая решала бы проблемы имеющихся на рынке датчиков зрелости.

Целью данной статьи является разработка усовершенствованной IT-архитектуры беспроводного датчика мониторинга железобетонных конструкций (далее – БДМ ЖБК).

Для достижения цели были поставлены и выполнены следующие задачи:

- 1) сбор пользовательских историй;
- 2) составление технических требований БДМ ЖБК;
- 3) разработка IT-архитектуры БДМ ЖБК.

### **Сбор пользовательских историй**

Для того, чтобы БДМ ЖБК, в частности разрабатываемая IT-архитектура, в конечном счете были эффективными, перед самой разработкой необходимо услышать мнение и видение потенциальных пользователей, из которых необходимо сформировать технические требования. Данный процесс принято называть сбором пользовательских историй и требований [11].

Сбор пользовательских историй и требований в виде интервью проводился в рабочее время прямо на строительной линии объекта, чтобы опрашиваемые могли наглядно показать, как они видят крепление устройств в теле бетона, желаемое расстояние между датчиками, способ размещения и количество дат-

чиков на вертикальную и горизонтальную конструкцию, показать скорость и силу потока бетонной смеси при заливке в форму будущей конструкции, показать расстояние откуда и кто должен получать сигнал от датчиков, показать высотность возводимого объекта и прочие факторы, которые можно увидеть и наглядно показать на строительном участке, а не в офисном помещении.

В процессе интервью была получена обратная связь от членов команды проектов на предмет внедрения БДМ ЖБК, по которым можно сделать следующие выводы:

- 1) датчик должен выдавать полную картину о том, что происходит в теле ЖБК;
- 2) датчик должен быть встраиваемым;
- 3) датчик должен быть беспроводным, т.е. иметь в корпусе батарею;
- 4) для получения степени затвердевания датчику понадобятся данные о температуре и влажности в теле бетонных и железобетонных конструкций;
- 5) пользователь должен получить данные о состоянии прочности бетона в необходимый для него момент времени, используя мобильное устройство или персональный компьютер;
- 6) датчик должен иметь функцию физической активации;
- 7) датчик должен иметь световой индикатор активации;
- 8) датчику необходимы идентификаторы для удобства отображения на карте объекта.

Также, был проведён онлайн опрос и сбор отзывов на предмет применения БДМ ЖБК командами проектов по строительству жилых комплексов в г. Нур-Султан различных классов жилья, таких как «комфорт» (ЖК «Capital Park»), «бизнес» (ЖК «Tokyo», «НАК») и «премиум» (ЖК «Ray Residence»). Абсолютно все опрашиваемые были за сокращение сроков возведения монолитного каркаса и все за идею мониторинга состояния бетона изнутри.

### Технические требования

Принимая во внимание пожелания и требования членов строительных команд проек-

тов после проведения интервью составлен список требований:

1. БДМ ЖБК должен: производить измерения температуры и влажности бетона с погрешностью не более 1%; дистанционно передавать данные об измерениях на Станцию сбора данных (ССД), которая в свою очередь передает их на сервер для дальнейшей обработки и визуализации через интерфейс мобильного устройства и (или) персонального компьютера; иметь гарантированную работоспособность в течение 1 месяца; должен состоять из: корпуса, кабеля датчика температуры, температурного датчика, датчика влажности, контроллера, модуля памяти, модуля беспроводной сети, модуля часов, источника питания, QR-кода, переключателя.

2. Кабель датчика температуры должен: соединяться с одной стороны – с контроллером, расположенным в корпусе БДМ, с другой – с датчиком температуры; быть стойким к воздействию агрессивной щелочной и кислотной сред; быть стойким к механическим воздействиям: удары, вибрация, давление (0,2 МПа); сохранять работоспособность при температурном диапазоне от -50 до +100°C; обеспечивать передачу данных от датчика температуры на контроллер.

4. Температурный датчик должен: производить замеры температуры в теле бетона в диапазоне от -50 до +100°C с заданной периодичностью; передавать данные об измерениях на контроллер посредством кабеля; быть стойким к воздействию агрессивной щелочной и химической сред; быть стойким к механическим воздействиям: удары, вибрация, давление (0,2 МПа); сохранять работоспособность при температурном диапазоне от -50 до +100°C.

5. Датчик влажности должен: помещаться внутри или снаружи корпуса БДМ и быть подключен к контроллеру; производить замеры влажности в теле бетона; передавать данные об измерениях на контроллер; быть стойким к воздействию агрессивной щелочной и химической сред; сохранять работоспособность при температурном диапазоне от -50 до



+100°C; не допускать проникновение пыли и влаги через себя.

6. Контроллер должен: иметь оптимальные размеры для размещения его внутри корпуса БДМ; быть защищен от механических воздействий, а также воздействий влаги и температуры; вмещать на себе все модули; иметь LED индикатор.

7. Модуль памяти должен: помещаться внутри корпуса БДМ и быть подключен к контроллеру; хранить информацию об измерениях температуры и влажности; иметь объем памяти, достаточный для хранения информации об измерениях на протяжении 1 месяца.

8. Модуль беспроводной сети должен: помещаться внутри корпуса БДМ и быть подключен к контроллеру; осуществлять синхронизацию данных с БДМ в ССД без потери и модификации данных.

9. Источник питания должен: помещаться внутри корпуса БДМ и быть подключен к контроллеру; обеспечивать работоспособность БДМ гарантированно на протяжении 1 месяца после активации БДМ.

10. Переключатель должен: иметь удобный механизм замыкания сети при вынимании диэлектрической пленки, которая должна быть клеящаяся на печатную бумагу; быть подключен к контроллеру.

11. Станция сбора данных (далее – ССД) должна: быть мобильной, для возможности переноса с объекта на объект; иметь поддержку беспроводного интерфейса для получения данных с БДМ ЖБК; отправлять полученные значения в облачное хранилище; иметь возможность питания от сети и от встроенной батареи; иметь возможность мгновенного переключения при отключении питания; иметь возможность уведомления на web-интерфейс персонального компьютера и в приложение сообщение об отключении внешнего питания; иметь внутреннюю память на хранение значений минимум 100 датчиков на протяжении последних 24 часов; иметь Wi-Fi модуль для связи с интернетом; сохранять работоспособность при температурном диапазоне от -50 до +50°C с возможностью подогрева корпуса изнутри; иметь пластиковый, ради-

опрозрачный, герметичный корпус; иметь внешнюю антенну.

12. Программное обеспечение (далее – ПО для БДМ ЖБК) должно: располагаться на сервере; устанавливаться и использоваться на платформах iOS и Android; использоваться на нескольких устройствах одновременно; иметь понятный и интуитивный интерфейс для пользователя; иметь возможность использования ПО для БДМ ЖБК на персональных компьютерах и иметь поддержку браузеров Chrome, Internet Explorer, Mozilla Firefox; получать данные с БДМ ЖБК и преобразовывать их в значения прочности железобетонных конструкций; хранить данные в течение минимум 2 лет; визуализировать графики всех значений; выгружать отчеты в форматах .pdf и .csv; иметь нумерацию от поступающих датчиков и иметь возможность переименования их под удобный учёт пользователем; иметь возможность сканирования индивидуальных QR-кодов БДМ ЖБК; иметь различные роли в системе администратор/пользователь для разграничения прав пользователей.

### Диаграмма компонентов UML

Исходя из требований на создание БДМ ЖБК, представляется принципиальная архитектура системы, представленная на рисунке 1. Передача данных с БДМ ЖБК требуется в небольшом количестве, однако БДМ должен быть компактным и иметь в корпусе своё автономное питание на продолжительный период времени. В качестве интерфейса беспроводной связи, выполняющей требования системы, была выбрана энергоэффективная сеть LPWAN с протоколом LoRaWAN. Для сбора данных с БДМ по выбранному протоколу будет использоваться Станция сбора данных (ССД), также именуемая в топологии сети как «шлюз». ССД будет обладать беспроводными интерфейсами приём-передачи LPWAN и Wi-Fi. Рядом с ССД будет находиться Wi-Fi точка доступа, обладающая интерфейсами 3G/4G для выхода в интернет. Узлом соединения, хранения данных, обработки запросов и отправки результатов будет виртуальный сервер на собственных

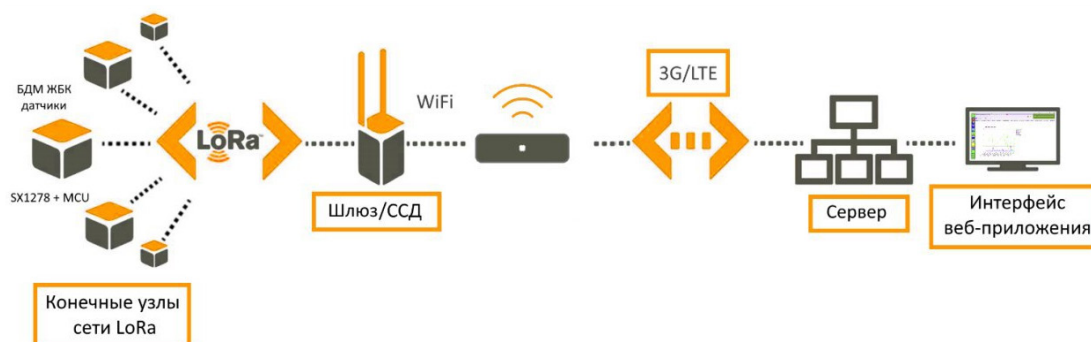


Рис. 1 – Принципиальная архитектура БДМ ЖБК

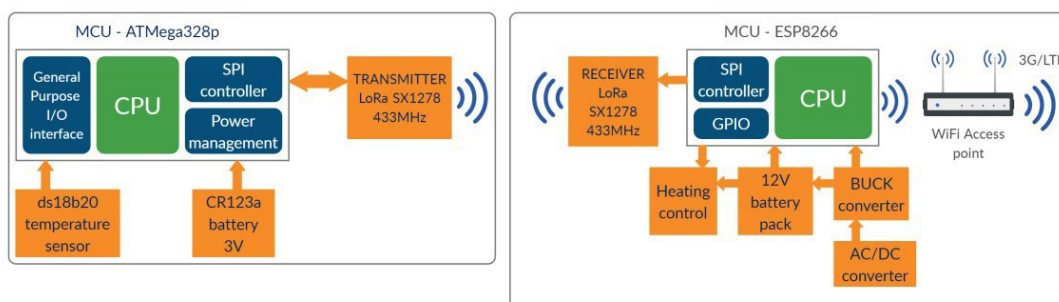


Рис. 2 – Архитектура компонентов узлов и шлюза БДМ ЖБК

или арендуемых мощностях, на которых будет располагаться веб-интерфейс для доступа с персонального компьютера и виртуальные порты и выходы для получения и передачи данных с мобильного приложения.

На рисунке 2 отображено подключение одного из узлов БДМ ЖБК к ССД, т.е. к шлюзу сети по протоколу LoRaWAN. Каждый БДМ ЖБК будет работать следующим образом: микроконтроллер ATmega328p с автономным питанием от 3В батарейки типа CR123A получает данные от внешних датчиков температуры и влажности, которые передаёт по интерфейсу SPI на передатчик Semtech SX1278. Далее данные модулируются и транслируются в эфир в диапазоне 433MHz с мощностью в 18dBm (63mW) по протоколу LoRaWAN. ССД (шлюз) принимает полученные данные, демодулирует их по SPI интерфейсу, передаёт на микроконтроллер ESP8266, который имеет модуль беспроводной связи Wi-Fi. ССД отправляет полученные данные от всех БДМ ЖБК в облако посредством точки доступа. Связующим звеном между облаком и шлюзом будет точка доступа. Шлюз будет иметь

возможность подогревать себя во время работы в температурах ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . Шлюз будет постоянно питаться от сети 230В и иметь возможность мгновенно переключаться на внутренний аккумулятор 12В при отключении сети 230В.

Было решено использовать обмен данными между ССД и БДМ по топологии «Звезда», то есть в сети имеется одна ССД и множество БДМ ЖБК и все они обращаются к ССД напрямую. Таким образом будет решена проблема существующих на рынке датчиков зрелости, где ввиду ограничений Bluetooth осуществление одновременной синхронизации все датчиков со смартфоном или компьютером было невозможным. Коэффициент распространения и пропускная способность протокола LoRaWAN будут сконфигурированы до начала сеанса связи. В части веб-интерфейса используется телеметрический транспорт запросов сообщений (MQTT). MQTT является известным протоколом связи «машина-машина» (M2M) во многих созданных устройствах Интернета Вещей (IoT). MQTT

является внутренним протоколом связи TCP/IP с низким уровнем передачи данных.

ESP8266 в шлюзе LoRaWAN будет публиковать данные, полученные от БДМ ЖБК, а установленное в облаке ПО Node-RED будет использоваться для отображения принимаемых пакетов от БДМ ЖБК при подписке на тот же MQTT хаб.

### Выводы

Разработанная IT-архитектура БДМ ЖБК представляет собой иной подход к передаче и хранению данных. В ней используется энергоэффективная сеть LPWAN с протоколом LoRaWAN, которая при практически идентичном энергопотреблении имеет больший радиус действия, чем Bluetooth, что является необходимым при применении датчиков на крупных строительных объектах. Предложенная в рамках IT-архитектуры Система сбора данных позволит производить одновременную синхронизацию множества датчиков зрелости, что значительно снизит трудоемкость процесса сбора данных. Также отличительной особенностью архитектуры

IT-архитектуры является непрерывный сбор данных о состоянии железобетонных конструкций, вплоть до разрядки аккумулятора, даже после окончания монолитных работ. Данная особенность способствует накоплению больших данных (Big Data) на сервере, представляющих из себя огромное количество различной количественной и качественной информации о скорости набора прочности железобетонных конструкций, составе бетонной смеси, условий окружающей среды и других параметрах. В дальнейшей перспективе на основе больших данных можно составлять аналитические отчеты о качестве инертных материалов бетона местных и зарубежных производителей, отчеты по надежности монолитного каркаса строительных объектов в регионах, давать рекомендации строительным компаниям по улучшению качества монолитных работ и многое другое. Также эти данные могут быть применены в информационном моделировании зданий (BIM) для формирования более точных и полных отчетов о состоянии монолитного каркаса зданий и сооружений.

### Финансирование

Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP08052033).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Dixit S. et al. Evolution of studies in construction productivity: A systematic literature review (2006--2017) // Ain Shams Eng. J. Elsevier, 2019. Vol. 10, № 3. – P. 555-564.
2. Habibi M., Kermanshachi S., Safapour E. Engineering, procurement and construction cost and schedule performance leading indicators: state-of-the-art review // Proceedings of Construction Research Congress. 2018. – P. 2-4.
3. Duah D., Syal M.G.M. Direct and indirect costs of change orders // Pract. Period. Struct. Des. Constr. American Society of Civil Engineers, 2017. Vol. 22, № 4. – P. 4017025.
4. Domingues S., Almeidaand N., Sousa V. Gross margin risk assessment in construction projects: the influence of indirect costs deviations // welcome to Deleg. IRC 2017. 2017. – P. 731.
5. Chassiakos A.P., Sakellaropoulos S.P. Time-cost optimization of construction projects with generalized activity constraints // J. Constr. Eng. Manag. American Society of Civil Engineers, 2005. Vol. 131, № 10. – P. 1115-1124.
6. Hyari K., El-Mashaleh M., Kandil A. Optimal assignment of multiskilled labor in building construction projects // Int. J. Constr. Educ. Res. Taylor & Francis, 2010. Vol. 6, № 1. – P. 70-80.
7. Tsapko K.A., Alyaeva M.Y. Optimization of Construction Operations at Reduced Resource Intensity and Labor Costs // Materials Science Forum. 2018. Vol. 931. – P. 1271-1275.

8. Kasal P., Lorenc V., Wenighofer W. The Use of Maturity Method for Estimating In Situ Compressive Strength of Concrete // Solid State Phenomena. 2020. Vol. 309. – P. 103-107.
9. Badawi Y. et al. Use of maturity sensors to predict concrete compressive strength in different curing and compaction regimes // Conference Proceedings Civil Engineering 2018. 2018.
10. Utepov Y. et al. Prototyping an embedded wireless sensor for monitoring reinforced concrete structures // Comput. Concr. Techno-Press, 2019. Vol. 24, № 2. – P. 95-102.
11. Khudaibergenov O. et al. Wireless sensor for monitoring reinforced concrete structures: pat. 3575 USA. Kazakhstan, 2019.
12. Utepov Y.B. et al. Maturity sensors placement based on the temperature transitional boundaries. // Mag. Civ. Eng. 2019. Vol. 90, № 6. – P. 93-103.
13. Lucassen G. et al. Improving agile requirements: the quality user story framework and tool // Requir. Eng. Springer, 2016. Vol. 21, № 3. P. 383-403.
14. de Carvalho Silva J. et al. LoRaWAN – A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities // 2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech). 2017. – P. 1-6.
15. Morin E. et al. Comparison of the device lifetime in wireless networks for the internet of things // IEEE Access. IEEE, 2017. Vol. 5. – P. 7097-7114.