

УДК 691.32
МРНТИ 67.09.33

О ТРАДИЦИОННЫХ И СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДАХ И УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

Е.Б. УТЕПОВ^{1,2}, А.Б. КАЗКЕЕВ^{1,2}

¹Евразийский Национальный университет имени Л.Н. Гумилева

²ТОО «CSI Research & Lab»

Аннотация: В статье представлен обзор традиционных и сравнительный анализ современных методов и приборов для контроля прочности бетона. На основе проведенных исследований был разработан прототип встраиваемого датчика для контроля прочности и мониторинга температуры и влажности бетона в период его твердения. Себестоимость прототипа составила около 10 000 тенге. Приведен пример расчета допустимой стоимости датчика для казахстанского потребителя, равной 15 000 тенге за штуку, также рассчитан потенциальный экономический эффект для строительных объектов, и приведен долгосрочный эффект от анализа больших данных, собираемый при помощи разрабатываемого решения.

Ключевые слова: прочность бетона, датчик, контроль прочности, испытание образцов, мониторинг железобетонных конструкций

ON TRADITIONAL AND MODERN METHODS AND DEVICES FOR CONTROLLING THE STRENGTH OF CONCRETE

Abstract: The article presents an overview of traditional and comparative analysis of modern methods and instruments for monitoring the strength of concrete. Based on the research, a prototype of the embedded sensor was developed for monitoring the strength and monitoring the temperature and humidity of concrete during its hardening. The cost of the prototype was about 10,000 tenge. An example is given of calculating the allowable cost of a sensor for a Kazakhstani consumer equal to 15,000 tenge per share, the potential economic effect for construction sites is also calculated, and the long-term effect of big data analysis collected using the developed solution is given.

Keywords: concrete strength, sensor, strength control, sample testing, monitoring of reinforced concrete structures

БЕТОННЫҢ БЕРІКТІГІН БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН ДӘСТҮРЛІ ЖӘНЕ ЗАМАНАУИ ӘДІСТЕР МЕН ҚҰРЫЛҒЫЛАР ТУРАЛЫ

Аңдатпа: Мақалада бетонның беріктігін бақылау үшін қазіргі заманғы әдістер мен аспаптардың дәстүрлі және салыстырмалы талдауы көрсетілген. Жүргізілген зерттеулер негізінде бетонның беріктігін бақылау және оның қатаю кезеңінде температурасының және ылғалдылығының мониторингі үшін орнатылатын датчиктің прототипі әзірленді. Прототиптің өзіндік құны шамамен 10 000 теңгені құрады. Сонымен қатар, құрылыс объектілері үшін әлеуетті экономикалық тиімділік есептелген және әзірленген шешімнің көмегімен жиналатын үлкен деректерді талдаудан ұзақ мерзімді тиімділік келтірілген.

Түйінді сөздер: бетон беріктігі, датчик, беріктікті бақылау, үлгілерді сынау, темір-бетон конструкцияларының мониторингі

Введение

Своевременное обнаружение момента зрелости железобетонной конструкции (ЖБК) и принятие решения о ее нагружении позволяет получить дополнительную прибыль за счет сокращения сроков строительства. Очевидно, что на твердение бетона влияет множество факторов, способных как ускорять процесс набора прочности, так и замедлять его. Знание и понимание процессов, происходящих в теле бетона, позволяет определить полную картину набора его прочности, в результате чего можно добиться максимального качества и долговечности конструкции, при этом обеспечивая экономию за счет сокращения сроков строительства и снижения трудозатрат [1]. Так, например, за счет оптимизации циклов удаления опалубки, можно экономить время, снижать накладные расходы и трудозатраты.

На сегодняшний день выделяют два основных способа контроля прочности бетона: неразрушающий и разрушающий. Неразрушающий контроль прочности – контроль свойств и параметров бетона, при котором его структурная целостность и эксплуатационные характеристики не нарушаются [2]. Существует несколько методов неразрушающего контроля прочности, основывающихся на таких косвенных характеристиках как: отпечаток на бетоне; энергия, затраченная на удар; напряжение, приведшее к местному разрушению бетона и т.д. [3]. Выделить какой-то

один метод невозможно, так как все они обладают своими достоинствами, недостатками и ограничениями в применении. Сущность разрушающего контроля заключается в подготовке и испытании на сжатие при помощи пресса специальных бетонных образцов. При таком испытании пробные образцы изготавливаются из контролируемого состава бетонной смеси или извлекаются из самой конструкции путем выбуривания отборных проб (кернов). Последний процесс отличается особой сложностью и трудоемкостью, так как не всегда удается получить образцы с ровной поверхностью, из-за чего в последующем приходится вручную выравнять грани, иначе результаты испытания окажутся недостоверными [4].

Наиболее распространенными методами разрушающего и неразрушающего контроля прочности являются испытание на сжатие стандартных образцов и метод ударных импульсов (рисунок 1) [5].

При испытании стандартных образцов существует большая разница между разрушаемым образцом бетона в лаборатории и бетоном на строительной площадке, обусловленная различными условиями твердения: совершенно иные значения температуры окружающей среды и влажности воздуха, что в результате приводит к искажению показателей испытаний [6]. Данный недостаток частично решен ударно-импульсным методом, сущность

РАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ:



а)

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ:



б)

Рис. 1 – Традиционные методы контроля прочности бетона:
а) – сжатие стандартных образцов; б) – метод ударных импульсов

которого заключается в регистрации энергии удара, которая возникает в момент соударения бойка специального прибора с поверхностью бетона [7]. Недостатком ударно-импульсного метода является ограниченный радиус работы прибора – определение прочности возможно лишь в конкретно испытываемой области в слое глубиной до 50 мм, а не всей конструкции. Таким образом для получения полной картины о наборе прочности необходимо проведение испытаний во множестве точек одного и того же элемента [8]. Очевидно, что оба перечисленных традиционных метода довольно трудоемки и относительно дороги. Существует альтернативный метод, основывающийся на современных технологиях, таких как встроенные в бетон датчики и сенсоры, машинное обучение и искусственный интеллект. За счет непрерывного мониторинга внутреннего состояния железобетонной конструкции достигается оперативность получения измерений, в результате чего возможно осуществление демонтажа опалубки раньше ожидаемого срока, экономии времени, и, следовательно, экономии финансовых ресурсов. Несмотря на тот факт, что в Казахстане применение подобных методов определения прочности бетона невозможно ввиду отсутствия соответствующих нормативно-технических документов, регламентов и стандартов, авторами данной статьи была проделана работа по разработке прототипа датчика, способного при погружении его в тело бетона производить измерения температуры и влажности и передавать результаты беспроводным путем на мобильное устройство (смартфон) посредством Bluetooth, которое в свою очередь по известным методикам рассчитывает текущую прочность бетона.

Данная статья посвящена разработке прототипа встраиваемого беспроводного датчика для неразрушающего контроля и мониторинга железобетонных конструкций.

Для достижения поставленной цели были поставлены и выполнены следующие задачи:

- 1) анализ и сравнение существующих решений;
- 2) выявление недостатков зарубежных аналогов;
- 3) описание разработки прототипа датчика;
- 4) расчет допустимой стоимости датчика для казахстанского потребителя;
- 5) расчет экономического эффекта.

Несмотря на текущую ситуацию на казахстанском рынке, данная разработка представляет большую актуальность в сфере строительства. Зарубежный опыт показывает, что применение встраиваемых датчиков при заливке бетона позволяет снижать последующие накладные расходы, а также существенно экономить время при осуществлении монолитных работ. Ввиду неприменимости зарубежных датчиков на строительных площадках нашей страны, особую актуальность приобретает разработка отечественного аналога со схожим функционалом, но при этом имеющего ряд собственных отличительных преимуществ, способного конкурировать как на внутреннем, так и на внешнем рынке.

Сравнение существующих аналогов

Аналоги датчиков для неразрушающего контроля прочности представлены несколькими основными зарубежными производителями: «SmartRock2», выпускаемые канадской компанией Giatec, «CS100» и «CS200» от американской компании ConcreteSensors, а также датчики компании COMMAND Center Wireless (США). Для выявления сильных и слабых сторон аналогов было проведено их детальное сравнение по основным пунктам. Данные для сравнения были внесены в таблицу 1 для более наглядного сравнения.

Таблица 1 – Существующие на рынке беспроводные датчики мониторинга ЖБК

Параметры	Giatec SmartRock2 (Канада)	Concrete Sensors (Великобритания)	COMMAND Center Wireless (США)
			
Беспроводная сеть	Bluetooth, GPS	Bluetooth	Bluetooth в модуле
Измерения*	T, R	T, W, R	T, R
Температурный диапазон	от -30 до +60°C	от -40 до +85°C	от -30 до +85°C
Точность	T: ±1 °C	T: ±0,4 °C, W: ±3%	T: ±1 °C
Глубина заложения	От 5 см	От 5 до 15 см	Длина кабеля до 4м
Диапазон передачи данных	До 8 м	До 20 м	До 9 м
Интервал измерений	30 мин	30 мин	Настраиваемый
Память	Достаточный	Достаточный	2048 измерений
Срок службы аккумулятора	До 4 месяцев	До 2 лет	До 10 лет
Требуемое количество	2 шт. на 76,5 м ³	5 шт. на 1400-1900 м ²	5 шт. на 76,5 м ³
Наличие приложения	iOS и Android	iOS	iOS
Формат отчетности	PDF, CSV	PDF, CSV	PDF, XLS
Стоимость за ед. без доставки	\$85	\$150-200	\$2100 (3 модуля, 50 датчиков)

*Т – температура, W – влажность, R – прочность

По результатам сравнения можно сделать следующие выводы: из трех датчиков один производит контроль температуры, влажности и прочности, а два других – лишь температуры и прочности. Обмен данными со смартфоном у всех аналогов происходит посредством протокола Bluetooth, из-за чего глубина заложения датчика в теле бетона составляет от 5 до 15 см. Это обусловлено ограниченным радиусом действия Bluetooth, в результате чего диапазон передачи данных составляет от 8 до 20 м. При этом стоит учитывать, что смартфон в состоянии подключаться по Bluetooth только к одному датчику одновременно, это также обусловлено ограничениями данного протокола. Температурный диапазон работы у датчиков сопоставимый и составляет в среднем от -30 до +85°C. Срок службы аккумулятора сильно варьируется: от 4 месяцев до 10 лет и зависит от физических размеров корпуса и режима работы датчика. Однако, стоит отметить, что требуется около месяца для достаточного набора прочности бетона, поэтому 10-летний срок работы является избыточным. Оптимальной продолжительностью работы

датчика можно считать 3-4 месяца. Цены на датчики также сильно варьируются: от \$85 до 200 за штуку или \$2100 за 3 модуля и 50 датчиков.

Разработка прототипа датчика. Сущность работы прототипа заключается в следующем: перед началом заливки датчик помещается в корпусе бетона посредством крепления его к арматуре с помощью хомута. После этого устройство запускается, задается интервал, с которым датчик будет производить измерения температуры и влажности в теле бетона. Далее полученные данные передаются на смартфон с помощью протокола беспроводной передачи Bluetooth. Специально разработанное мобильное приложение для смартфона анализирует эти данные и выдает отчет о фактической прочности бетона. Особенностью прочностного контроля с помощью датчиков является предварительный лабораторный анализ. На основе результатов этого анализа выстраивается корреляционная зависимость между температурой, влажностью и прочностью, позволяющая определить

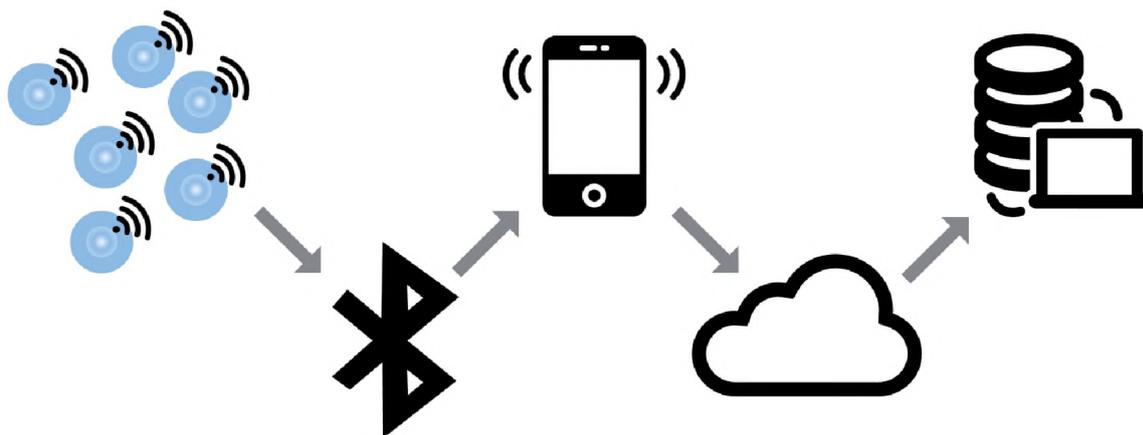


Рис. 2 – Архитектура прототипа

текущую прочность бетона через встроенный датчик.

Архитектура прототипа основана на концепции интернета вещей (IoT). IoT архитектура включает в себя: с одной стороны – большое количество периферийных устройств с низкой вычислительной мощностью, низким энергопотреблением, высокой скоростью реакции на события, с другой стороны – облачные серверы с высокой вычислительной мощностью для обработки больших объемов данных, их хранение и классификация, часто с элементами машинного обучения и аналитики (рис. 2).

Корпус прототипа напечатан на 3D-принтере из материала акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС-пластик) и имеет габариты

86×86×49 мм. Он состоит из нижней части и верхней (крышки), соединяющихся друг с другом посредством 8 болтов. Водонепроницаемость соединения обеспечивается за счет резиновой прокладки.

Функционал прототипа реализован на базе микроконтроллера Arduino Nano 3.0 с возможностью подключения к нему дополнительных модулей. Применение Arduino в качестве основы позволило значительно упростить и ускорить процесс разработки за счет уже имеющихся встроенных модулей, а также специальных слотов расширения, которые позволили подключить к микроконтроллеру Bluetooth-модуль, а также датчик температуры с кабелем 100 см. Датчик влажности встроен внутрь корпуса и также подключен к

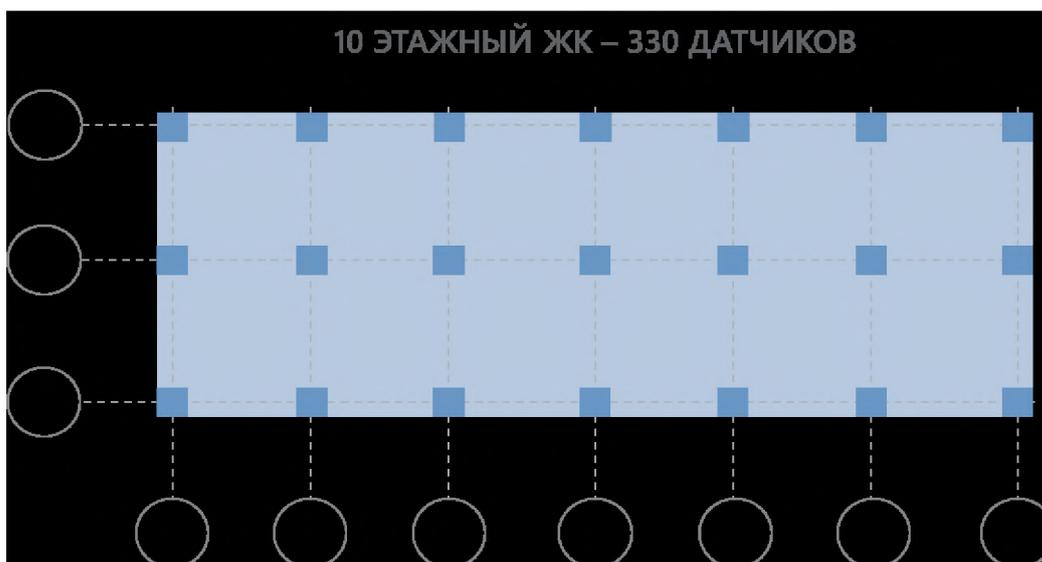


Рис. 3 – Монолитный каркас

микроконтроллеру через слот расширения. Модуль памяти встроен в микроконтроллер, его объема в несколько мегабайт достаточно для хранения данных об измерениях на несколько месяцев. Питание прототипа осуществляется от трех батарейных аккумуляторов типа АА.

Конечная стоимость разработки прототипа составила 10200 тенге, что составляет около \$27.

Расчет допустимой стоимости. Относительно низкая стоимость конечного продукта является боль-

шим конкурентным преимуществом не только на внутреннем, но и на зарубежном рынке. Для расчета допустимой стоимости для потенциального потребителя перейдем к следующему примеру. В среднем для монолитного каркаса 10-этажного здания с количеством пролетов 8×2 и шириной пролета 6 метров потребуется около 330 датчиков (рис. 3). При розничной стоимости датчиков 15 тыс. тенге и себестоимости 10 тыс. тенге, доход организации с одного здания составит 1 млн. 650 тыс. тенге. Учитывая объемы и темпы монолитного домостроения в Казахстане, рассчитанная цифра может оказаться намного выше.

Экономический эффект. Для строительных компаний экономический эффект обеспечивается за счет снижения трудоемкости и ускорения темпов строительства. Так, при ускорении возведения монолитного каркаса одного этажа аналогичного здания на один день и средневзвешенной стоимости накладных расходов в 1 млн. тенге, за вычетом розничной стоимости 330 датчиков, экономия составит 5 млн. 50 тыс. тенге (рис. 4).

Одной из отличительных особенностей разрабатываемых датчиков является непрерывный сбор данных о состоянии железобетонных конструкций, вплоть до разрядки аккумулятора, даже после окончания моно-



Рис. 4 – Расчет экономического эффекта

литных работ. Данное свойство датчиков 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 на 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 (рис. 5).

Выводы. На сегодняшний день в Казахстане не существует производства встроенных датчиков для беспроводного контроля прочности бетона. Зарубежные аналоги неприменимы в Казахстане по следующим причинам:

1) методы испытаний и расчет прочности не регламентированы в казахстане;

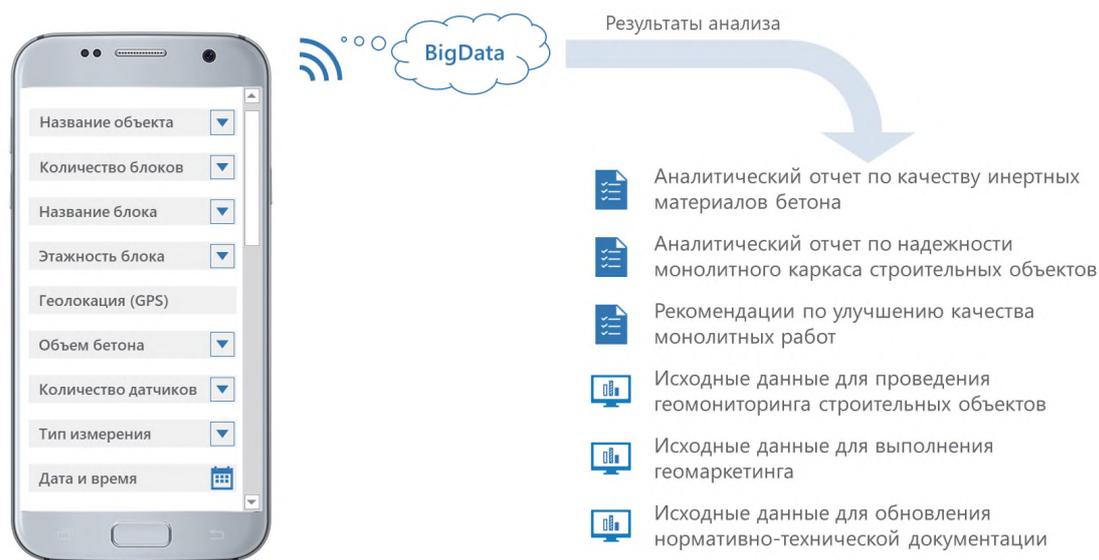


Рис. 5 – Долгосрочный эффект от анализа больших данных

2) расчет прочности осуществляется на основе результатов лабораторных испытаний того же состава бетона, что заливается на строительной площадке, однако в случае аналогов – подобрать состав с идентичными свойствами инертных материалов за рубежом не получится;

3) стоимость зарубежных аналогов невыгодна для казахстанского потребителя;

4) через Bluetooth можно одновременно подключаться только к одному датчику, поэтому строителям приходится ловить сигналы датчиков по отдельности, что создает неудобство и тратит время.

На основе этих выводов планируется дальнейшая модернизация датчика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградова Е.В. Проблемы управления качеством бетонных работ // Инженерный вестник Дона. – 2012. – Т. 21. – № 3. – С. 711-714.
2. Романенко Е.Ю. и др. Роль неразрушающего контроля формирования параметров качества монолитного строения // «Строительство-2006»: Материалы международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2006. – С. 29-30.
3. Бербеков Ж.В. Неразрушающие методы контроля прочности бетона // Молодой ученый. – 2012. Т. – 11. – № 46. – С. 20-23.
4. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – Т. – 4. – № 22. – С. 10-15.
5. Букин А.В., Патраков А.Н. Определение прочности бетона методами разрушающего и неразрушающего контроля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 89-94.
6. Thandavamoorthy T.S. Determination of concrete compressive strength: A novel approach // Adv. Appl. Sci. Res. 2015. – Т. 21. – № 3. – С. 88-96.
7. Клименко Н.Е. Ударно-импульсный метод определения прочности бетона // Прорывные научные исследования как двигатель науки. Сборник статей Международной научно-практической конференции. – Магнитогорск: ООО «ОМЕГА САЙНС», 2018. – С. 61-63.
8. Несветаев Г.В., Коллеганов А.В., Коллеганов Н.А. Особенности неразрушающего контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9. – № 2.