

**А.С. Тулебекова<sup>1,2\*</sup>, Е.Б. Утепов<sup>1,2</sup>, Ш.Ж. Жарасов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

<sup>2</sup>ТОО «CSI Research&Lab», Нур-Султан, Казахстан

**Информация об авторах:**

Тулебекова Асель Сериковна – PhD, ассоциированный профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0001-8553-3081>, email: krasavka5@mail.ru

Утепов Елбек Бахитович – PhD, ассоциированный профессор, ТОО «CSI Research&Lab», Нур-Султан, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0001-6723-175X>, email: utepov-elbek@mail.ru

Жарасов Шынғыс Жарасови - докторант, НАО Евразийский национальный университет им.Л.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

<https://orcid.org/0000-0002-0468-8362>, email: zhshzh95@gmail.com

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДАТЧИКОВ КОНТРОЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА**

**Аннотация.** В статье представлен разработанный алгоритм применения датчиков контроля прочности бетона с учетом таких особенностей как подбор типа датчика, выбор метода калибровки бетонной смеси согласно регламентированным требованиям, учет расположения датчиков зрелости бетона, степени влияния температуры твердения на набор прочности на основе построения изотерм. Данный алгоритм нашел отражение на практике, так созданный в рамках проекта беспроводной датчик мониторинга прочности бетона был применён согласно выбранной схеме в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** прочность бетона, датчик, калибровка, расположение, стандарт.

**Введение.** Фиксация температуры твердения бетона позволяет оперативно контролировать процесс набора его прочности, обеспечивает возможность его регулирования. К тому же, как показали многочисленные исследования [1–4], температурный фактор является основополагающим в формировании требуемых свойств бетона конструкции. В настоящее время широкое распространение получили беспроводные датчики для контроля прочности бетона, которые могут быть установлены после калибровки и проверки. Немаловажным фактором является количество датчиков и их размещение от чего зависит качество получаемой информации о прочности бетона. Обычно можно выбрать несколько альтернативных позиций, хотя экономические трудности и пространственные особенности иногда ограничивают возможности установки. Таким образом, важно оптимизировать расположение ограниченного числа датчиков, чтобы получить большее количество информации из измеренных данных и обеспечить надежную оценку зрелости бетона. В основном проблема оптимального размещения датчиков решается на основе практических соображений, то есть размещение датчиков как можно ближе к критическим точкам. Требования к температурно-прочностному контролю регламентированы в стандартах ASTM C 1074 (США) [5], СТ–НП СРО ССК–04–2013 (Россия) [6], NEN 5970 (Нидерланды) [7]. Однако ASTM C1074 не предоставляет никаких рекомендаций по

установке датчиков и содержит только следующее примечание: «В строительстве зданий, открытые части перекрытий и соединения перекрытий с колоннами, как правило, являются критическими местами» [5]. Российский же стандарт более детально подходит к расположению контрольных точек для измерения температуры бетона [6]. Однако, как показывает мировой опыт [8,9], вопрос расположения датчиков является немаловажным и открытым.

**Материалы и методы.** Подготовка и калибровка датчика мониторинга прочности бетона.

Применение беспроводных датчиков состоит из трех этапов:

I. Подготовка;

II. Калибровка;

III. Установка.

Первый этап, как правило, включает определение технологии бетонирования, выбор типа датчика и их количества, работоспособности прибора. Далее, чтобы на основании данных о температуре в конструктивном элементе поступающих от датчиков можно было рассчитать степень набора прочности бетоном, требуется калибровка составов для каждой бетонной смеси. Согласно требованиям стандартов, различают несколько подходов к калибровке (табл. 1).

Таблица 1 – Калибровка состава бетонной смеси

Процесс	СТ-НП СРО ССК-04-2013 [6]			ASTM C 1074 [5]	
	по температурным графикам	по зрелости бетона	по аналитическим зависимостям	температурно-временной фактор Nurse-Saul	Эквивалентный возраст (Arrhenius)
1. Испытание образцов	Кубические образцы: количество 105 шт. на 1, 3, 7, 14 и 28 сутки (5 подходов). Все образцы должны быть формованы одновременно непосредственно на территории завода-изготовителя бетонных смесей. До начала испытаний образцы не менее 1-го часа должны быть выдержаны в испытательной лаборатории в специальных климатических камерах либо аналогичном устройстве при температурных режимах 10, 20, 40, 60 и 80 °С.	Так же	Так же	Цилиндрические образцы количество не менее 15 шт.: 15 шт. образцов – испытание методом сжатия на 1, 3, 7, 14 и 28 сутки по 3 образца на каждые сутки испытаний.	Так же

2. Погружение датчиков в образцы	-	-	-	В 2 цилиндра погружение датчиков на расстоянии не более 615 мм от центра для замера динамики внутренних характеристик бетона во время твердения в течение 28 суток.	Так же
3. Анализ результатов	Получение изотерм при температурных режимах 10, 20, 40, 60 и 80 °С. Построение графика набора прочности Не допускается выполнять расчет по графикам для бетона несоответствующего состава	Построение графика набора прочности только для бетона нормального хранения по рекомендуемым моментам времени 1, 3, 7, 14 и 28 суток.	Получение фактических данных. Построение графика набора прочности	Построение графика набора прочности	Так же

### Результаты и обсуждение. Расположение устройства.

Расположение и устройство самих датчиков является завершающим третьим этапом, после чего измерения температуры бетона и окружающей среды, передаются по беспроводной сети в вычислительный центр и в режиме реального времени рассчитывается набор прочности бетона, на основе предварительно созданной калибровочной кривой. При анализе мировых практик было выявлено, что, например, в исследовании [10] использовались пять RFID-сенсоров для контроля зрелости и температурных градиентов. Сенсоры были встроены в бетон на четырех различных глубинах, и один датчик использовался для получения данных о температуре окружающей среды (рис. 1) [10].



Рисунок 1 – Строительная площадка (Мичиганский университет, Анн-Арбор) [10]

Во время реконструкции автострад были встроены беспроводные измерители зрелости. Метки были размещены на глубинах 2, 4, 6 и 8 дюймов от основания плиты. Для температур была найдена соответствующая зрелость бетона. Колебания температуры бетона на месте и температурные градиенты на момент окончательного остывания бетона показаны на рисунке 2. На рисунке 3 показаны графики набора прочности в бетоне в лабораторных условиях и непосредственно на площадке.

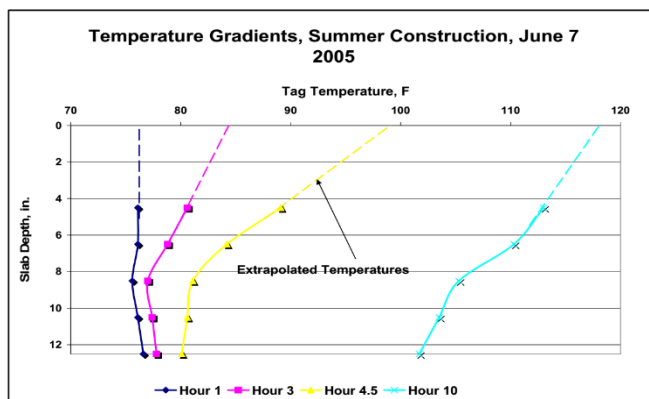


Рисунок 2 – Разница температур и градиента в перекрытии до конечного времени [10]

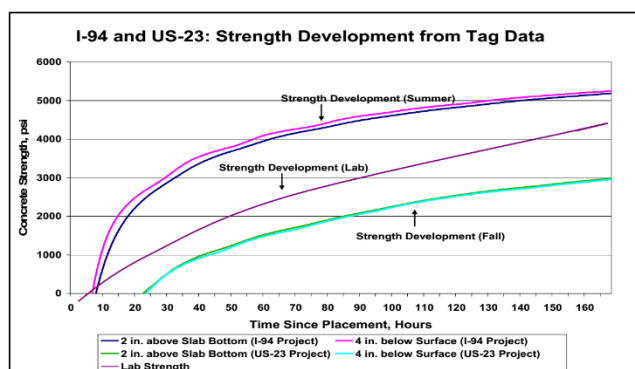


Рисунок 3 – Сравнение наборов прочности для первых 168 часов [10]

На рисунке 3 также показана разница температур в верхней и нижней части плиты. Такие данные невозможно было бы получить, если бы на плите использовался только один датчик. Поэтому рекомендуется использовать три или более метки на каждый датчик, чтобы получить наиболее точную зрелость и прочность. Это приводит к заключению, что зрелость уложенного бетона будет зависеть от самой низкой температуры плиты, и не обязательно от температуры в середине перекрытия.

При использовании беспроводных датчиков на объектах [11–13] компанией Giatec было отмечено, что в односторонних или двусторонних системах перекрытий конструктивно важные зоны расположены в больших отрицательных и положительных расчетных моментах. Как правило, максимальный положительный момент располагается в середине пролета, а максимальный отрицательный момент – на стыке перекрытия и колонны. Для другой кон-

фигурации перекрытия (перекрытие с балками) длины пролета, схемы нагрузок и соединений, расположение максимального положительного и отрицательного момента будут меняться (рис. 4).

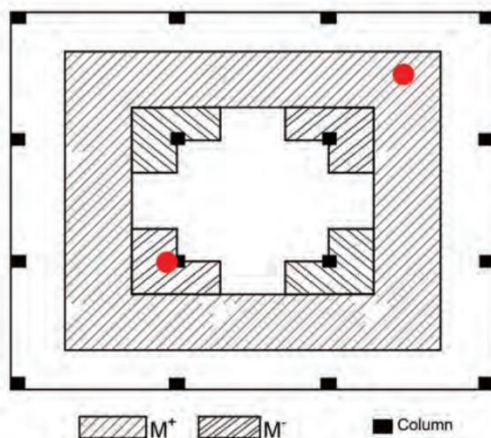


Рисунок 4 – Распределение в плане этажа максимальных положительных и отрицательных моментов [11]

Для вертикальных элементов, таких как колонны и стены самая холодная зона находится на верхней открытой поверхности как стен, так и колонн, также необходимо проводить мониторинг зрелости в критических местах в сдвигаемых стенах или колоннах, которые расположены в местах соединений (рис. 5).

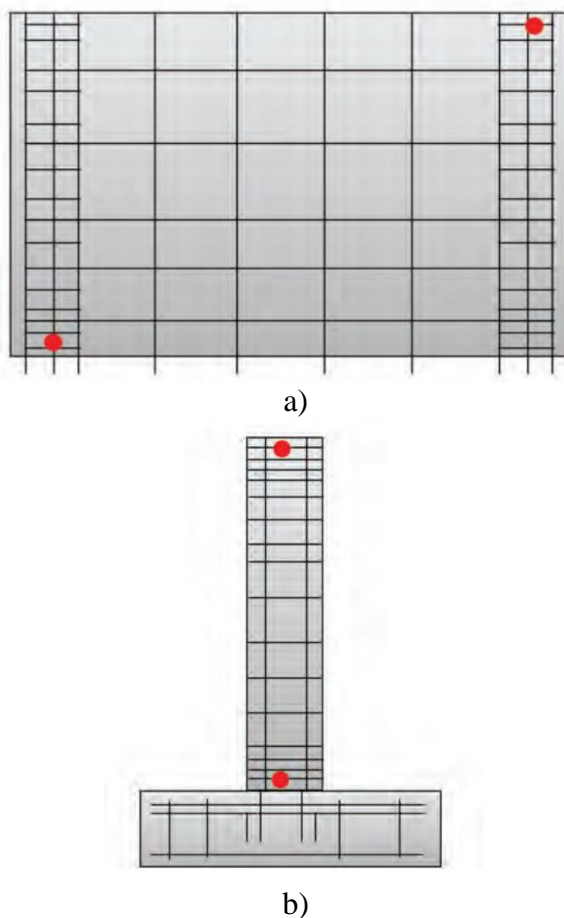


Рисунок 5 – Расположение мониторинга зрелости в вертикальных элементах: а) стена; б) колонна [11]

Подрядчик Astaldi Canada Inc. выбрал компанию Дока в качестве надежного партнера для решения всех задач по опалубке на стройплощадке, расположенной на реке Нижний Черчилль в провинции Лабрадор, Маскратский водопад – второй по величине гидрогенерирующий объект в Канаде [14]. Так как бетонная смесь и опалубка подвергаются воздействию широкого диапазона температур от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ , что увеличивает риск замерзания и термического растрескивания, а также связанных с ними затрат на ремонт, мониторинг достижения проектной прочности бетона является важным моментом. Для непрерывных измерений температуры и прочности бетона было установлено 32 датчика Concremote (рис. 6). Количество датчиков является техническим решением с учетом выбранных конструкций.



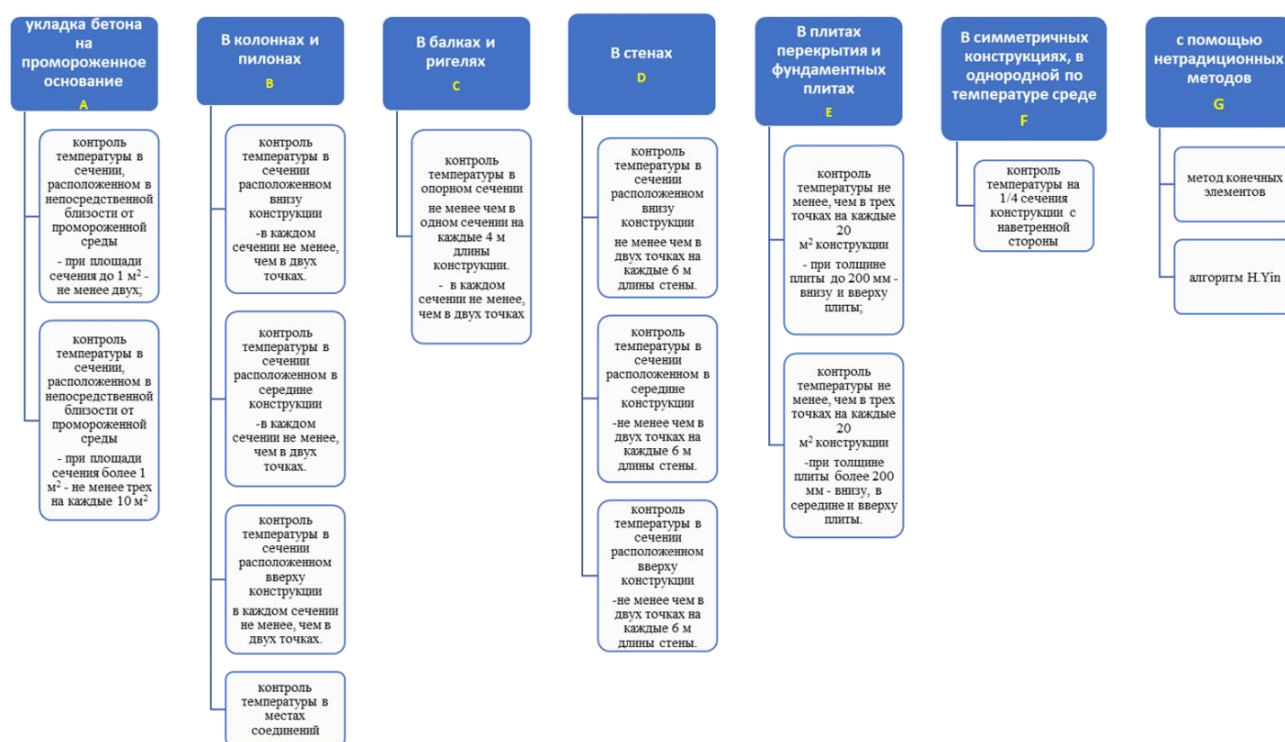
Рисунок 6 – Строительный объект Маскратского водопада [14]

В исследовании [8] был предложен новый последовательный алгоритм, позволяющий сократить количество датчиков, что в результате позволило сэкономить и получить достоверные результаты. Также была предложена [15] стратегия размещения датчиков, основанная на моделировании методом конечных элементов, где рассматривается случай теплопередачи в бетонной плите. Явления окружающей среды такие, как ветер, дождь могут в определенной степени влиять на внутреннюю температуру бетона, что в конечном итоге сказывается на наборе прочности [16].

Анализируя лучшие практики мира, а также регламентированные требования, представленные в российском стандарте [6], на рисунке 7 представлены особенности расположения датчиков в зависимости от типа конструкции.

Принимая во внимание все вышеописанные особенности предварительных этапов, алгоритм предложенного подхода к расположению и применению датчиков контроля зрелости бетона представлен на рисунке 8. Первый шаг алгоритма включает в себя определение свойств конструкции и правильный выбор типа датчика. Очень важно выбрать датчик с необходимыми техническими параметрами, где важными показателями являются частотный диапазон, температурный диапазон кабель, интервал измерений, точность и т.д. Определение местоположения датчиков на втором этапе должно быть выпол-

нено на основе технического обоснования, и предложенная следующая функция включает постановку задачи оптимизации и выбора способа расположения устройств согласно рисунку 7, что обеспечит качественные измерения и точные данные о зрелости бетона. На следующем шаге осуществляется сбор сигналов от установленных датчиков и обработка. Интеллектуальная обработка данных датчиков является одним из наиболее важных элементов систем мониторинга состояния конструкций. Основные элементы обработки сигналов для обнаружения повреждений включают: проверку сбора данных и сигналов первые 15 минут. Однако если на завершающем этапе были выявлены сбои в работе, необходимо рассмотреть решение проблемы и выбрать альтернативные способы, не снижающие качество результатов испытаний.



\*А,В,С,Д,Е, F, G – способ устройства в зависимости от вида конструкции

Рисунок 7 – Расположение контрольных точек

### Применение датчика (БДМ-1) по предложенному алгоритму

Для контроля прочности бетона применяется разработанный в рамках проекта беспроводной датчик (БДМ-1)[17]. БДМ-1 состоит из трех основных компонентов: измерителя температуры (ИТ), станции сбора данных (ССД) и серверного программного обеспечения (СПО).

Для калибровки бетонной смеси изготовлены бетонные образцы – кубы в количестве 105 штук, бетонные образцы-цилиндры 17 штук, бетонные образцы-боксы 2 штуки. Формовка образцов производилась на территории завода изготовителя товарного бетона ТОО «Темирбетон-1», г. Алматы. Для испытаний принят стандартный состав отпускаемого с завода товарного бетона класса В25 М350 (рис. 8). Результаты испытаний представлены на рисунке 9.

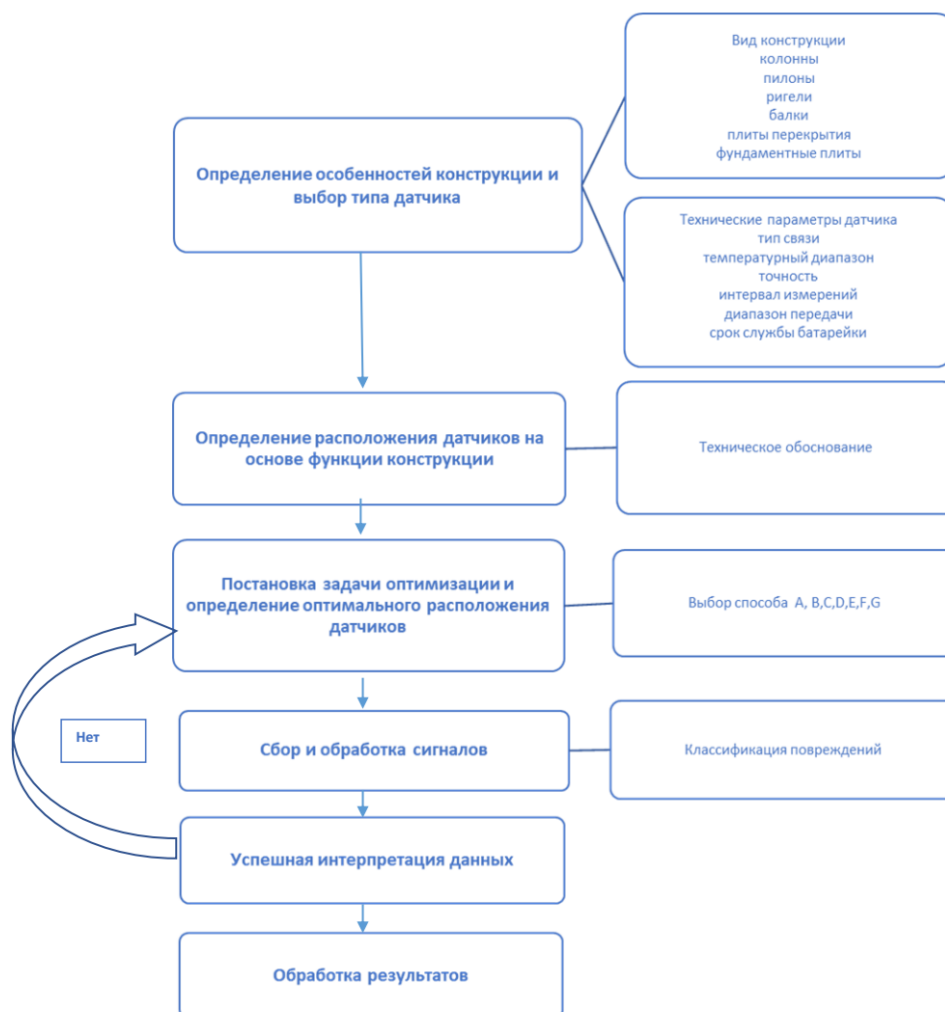


Рисунок 8 – Алгоритм использования предложенного подхода использования датчиков контроля прочности бетона



Рисунок 9 – Заливка образцов и установка датчиков

Согласно разработанному алгоритму расположению датчиков в зависимости от типа конструкции выбран тип В (рис. 7).



## Заклучение

Анализ показывает, что контроль прочности бетона, проводимый по требованиям американского стандарта нашел распространение в лучших практиках мира, однако стандарт не акцентирует внимание на детальные требования к расположению датчиков. Предложенный подход реализован в алгоритме для датчиков контроля прочности бетона и включает детальный анализ трех предварительных этапов перед использованием и находит практическое применение. Проблема оптимального расположения датчиков заключается в оценке необходимого количества датчиков для достижения наилучшей производительности. В исследовании, согласно техническим параметрам, измеритель температуры (ИТ) крепится на арматуру конструктивного элемента перед заливкой бетонной смеси с помощью пластиковых хомутов или с помощью вязальной проволоки. Для гарантированного приема сигнала, глубина погружения должна быть не более 10 см. Корпус ИТ является герметичным при плотном закрытии крышки и исключает попадание влаги во внутрь. Кабель датчика температуры должен фиксироваться на арматуре. Таким образом, прибор регистрирует температуру именно в той точке, в которой расположен металлический наконечник кабеля (т.е. температурный датчик). Поэтому очень важно изначально определить расположение контрольных точек. Таким образом, подход позволяет избежать погрешности, помогает видеть полный ход процесса испытаний, а также направлен на получение результатов испытаний с максимальной надежностью.

## Информация о финансировании

Данное исследование финансировано Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант №AP08052033).

## Литература:

1. Poorarbabi A., Ghasemi M. Concrete compressive strength prediction using non-destructive tests through response surface methodology // *Ain Shams Eng J.* – 2020. – Vol.11, № 4. – P.939-949.
2. Karahan Ş., Büyüksaraç A., Işık E. The Relationship Between Concrete Strengths Obtained by Destructive and Non-destructive Methods // *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.* – 2020. – Vol. 44, № 1. – P.91-105.
3. Rasmussen R.O., Cable J.K., Turner D.J., Voigt G.F. Strength prediction by using maturity for Portland cement concrete pavement construction at airfields // *Transp. Res. Rec.* – 2004. – Vol. 1893, № 1. – P.18–25.
4. Ebensperger L., Oyarzún J.C., Torres R. Determinación de la temperatura datum para la aplicación de la madurez en climas fríos. // *Rev Ing construcción.* – 2020. – Vol. 35, №1. – P.84-99.
5. ASTM C1074–19. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. – 2019. – 10 p.
6. ST–NP SRO SSK–04–2013 Temperature and strength control of concrete during the construction of monolithic structures in winter. – 2013.
7. NEN 5970. Determination of strength of fresh concrete with the method of weighted maturity. – 2001. – 21 p.
8. Yin H., Dong K., Pan A., Peng Z., Jiang Z., Li S. Optimal sensor placement based on relaxation sequential algorithm // *Neurocomputing.* 2019. 344. Pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.neucom.2018.03.088.

9. Liu K., Yan R.-J., Guedes Soares C. *Optimal sensor placement and assessment for modal identification* // *Ocean Engineering*. 2018. № 165. pp. 209–220. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.034.
10. Will Hansen S.S. *Embedded Wireless Temperature Monitoring Systems For Concrete Quality Control*. 2006. 43 p.
11. Carufel de. S. *Practical Installation Locations of Wireless Concrete Maturity Sensors* [Electronic resource] // *Giatic Scientific Inc*. 2020.
12. Giatic. *South African Arch Bridge Project*. [Electronic resource] // URL: <https://www.giaticscientific.com/case-study/south-african-arch-bridge-project/>
13. Giatic. *The best concrete sensor in 2020* [Electronic resource] // URL: <https://www.giaticscientific.com/education/the-best-concrete-sensors-2020/>
14. Doka. *Wasserkraftwerk in eisigen Gefilden*. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, // *Beton- Und Stahlbetonbau*. 2016. Vol. 111, № 1. P. 8.
15. Nath P., Hu Z., Mahadevan S. *Sensor placement for calibration of spatially varying model parameters* // *J. Comput. Phys*. 2017. Vol. 343. P. 150–169.
16. Uteпов Y.B., Khudaibergenov O.A., Kabdush Y.B. *Prototyping an embedded wireless sensor for monitoring reinforced concrete structures* // *Computers and Concrete*.
17. Uteпов Ye., Aniskin A., Ibrashov A.P., Tulebekova A.S. *Maturity sensors placement based on the temperature transitional boundaries*, *Mag Civ Eng.*, 2019. Vol 90, Pp 93–103.

#### References:

1. Poorarbabi, A., Ghasemi, M. *Concrete compressive strength prediction using non-destructive tests through response surface methodology* // *Ain Shams Eng J.* – 2020. – Vol.11, № 4. – P.939-949.
2. Karahan Ş., Büyüksaraç A., Işık E. *The Relationship Between Concrete Strengths Obtained by Destructive and Non-destructive Methods* // *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng.* – 2020. – Vol. 44, № 1. – P.91-105.
3. Rasmussen R.O., Cable J.K., Turner D.J., Voigt G.F. *Strength prediction by using maturity for Portland cement concrete pavement construction at airfields* // *Transp. Res. Rec.* – 2004. – Vol. 1893, № 1. – P.18–25.
4. Ebensperger L., Oyarzún J.C., Torres R. *Determinación de la temperatura datum para la aplicación de la madurez en climas fríos*. // *Rev Ing construcción.* – 2020. – Vol. 35, №1. – P.84-99.
5. *ASTM C1074–19. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.* – 2019. – 10 p.
6. *ST–NP SRO SSK–04–2013 Temperature and strength control of concrete during the construction of monolithic structures in winter.* – 2013.
7. *NEN 5970. Determination of strength of fresh concrete with the method of weighted maturity.* – 2001. – 21 p.
8. Yin H., Dong K., Pan A., Peng Z., Jiang Z., Li S. *Optimal sensor placement based on relaxation sequential algorithm* // *Neurocomputing*. 2019. 344. Pp. 28–36. DOI: 10.1016/j.neucom.2018.03.088.
9. Liu K., Yan R.-J., Guedes Soares C. *Optimal sensor placement and assessment for modal identification* // *Ocean Engineering*. 2018. № 165. pp. 209–220. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.034.
10. Will Hansen S.S. *Embedded Wireless Temperature Monitoring Systems For Concrete Quality Control*. 2006. 43 p.
11. Carufel de. S. *Practical Installation Locations of Wireless Concrete Maturity Sensors* [Electronic resource] // *Giatic Scientific Inc*. 2020.
12. Giatic. *South African Arch Bridge Project*. [Electronic resource] // URL: <https://www.giaticscientific.com/case-study/south-african-arch-bridge-project/>
13. Giatic. *The best concrete sensor in 2020* [Electronic resource] // URL: <https://www.giaticscientific.com/education/the-best-concrete-sensors-2020/>

14. Doka. Wasserkraftwerk in eisigen Gefilden. In: Beton- und Stahlbetonbau, // Beton- Und Stahlbetonbau. 2016. Vol. 111, № 1. P. 8.
15. Nath P., Hu Z., Mahadevan S. Sensor placement for calibration of spatially varying model parameters // J. Comput. Phys. 2017. Vol. 343. P. 150–169.
16. Утепов Y.B., Khudaibergenov O.A., Kabdush Y.B. Prototyping an embedded wireless sensor for monitoring reinforced concrete structures // Computers and Concrete.
17. Утепов Ye., Aniskin A., Ibrashov A.P., Tulebekova A.S. Maturity sensors placement based on the temperature transitional boundaries", Mag Civ Eng., 2019. Vol 90, Pp 93–103.

**А.С. Тулебекова<sup>1,2\*</sup>, Е.Б. Утепов<sup>1,2</sup>, Ш.Ж. Жарасов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Л.Н. Гумилев ат. Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<sup>2</sup>«CSI Research&Lab» ЖШС, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

**Авторлар туралы мәлімет:**

Тулебекова Асель Сериковна – PhD, қауымдастырылған профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0001-8553-3081>, email: krasavka5@mail.ru

Утепов Елбек Бахитович – PhD, қауымдастырылған профессор, ЖШС «CSI Research&Lab», Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0001-6723-175X>, email: utepov-elbek@mail.ru

Жарасов Шынгыс Жарасови - докторант, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан

<https://orcid.org/0000-0002-0468-8362>, email: zhshzh95@gmail.com

**Аңдатпа.** Мақалада датчиктің түрін таңдау, реттелетін талаптарға сәйкес бетон қоспасын калибрлеу әдісін таңдау, бетонның жетілу сенсорының орналасқан жерін, қатаю температурасының изотермиялық дизайн негізінде беріктіктің өсуіне әсер ету дәрежесін ескере отырып, бетонның беріктігін бақылау датчиктерін қолдану алгоритмі берілген. Бұл алгоритм іс жүзінде көрініс тапты, өйткені жоба аясында жасалған бетонның беріктігін бақылаудың сымсыз сенсоры нақты уақыт режимінде таңдалған схемаға сәйкес қолданылды.

**Түйін сөздер:** бетонның беріктігі, сенсор, калибрлеу, орналасу, стандарт.

**A.S. Tulebekova<sup>1,2\*</sup>, Ye.B. Uteпов<sup>1,2</sup>, Sh.Zh. Zharasov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<sup>2</sup>LTD «CSI Research&Lab», Nur-Sultan, Kazakhstan

**Information about authors**

Tulebekova Assel Serikovna - PhD, Associate Professor, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0001-8553-3081>, email: krasavka5@mail.ru

Uteпов Yelbek Bakhitovich - PhD, Associate Professor, LTD «CSI Research&Lab», Nur-Sultan, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0001-6723-175X>, email: utepov-elbek@mail.ru

Zharassov Shyngys Zharassovich, PhD Student, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

<https://orcid.org/0000-0002-0468-8362>, email: zhshzh95@gmail.com

**Annotation.** The paper presents an algorithm of application of concrete strength monitoring sensors taking into account such features as selection of sensor type, selection of concrete mixture calibration method according to regulated requirements, consideration of concrete maturity sensor location, degree of influence of hardening temperature on strength gain based on isotherms construction. This algorithm was reflected in practice, as the wireless sensor for concrete strength monitoring developed within the project was applied according to the selected scheme in real time.

**Keywords:** concrete strength, sensor, calibration, location, standard.