

УДК 05.23.00

КАБЕЛЬНЫЕ СЕНСОРЫ ВЛАЖНОСТИ – НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Ю.И. САКУНЕНКО, канд. техн. наук, генеральный директор ООО «ИНЖИМАТИК», фонд Сколково, почетный изобретатель г. Москвы

Ключевые слова: бетоны, сенсоры, влажность, кабели, измерения

Keywords: concretes, sensors, humidity, cables, measurements

Статья посвящена описанию возможностей принципиально нового вида контроля бетонов – кабельных сенсоров влажности бетонов. Они впервые позволяют измерять влажность бетонов не только в отдельной точке, а по любой, заранее заданной траектории. Описана методика имплантации сенсорных кабелей внутрь бетонных конструкций. Приведены экспериментальные данные по мониторингу посредством кабельных сенсоров влажности бетонов в процессе их созревания и при воздействии водяных фронтов на сенсоры.

Трудно переоценить практическую важность контроля содержания воды в бетонах. Достаточно вспомнить, что именно добавление воды в сухую бетонную смесь запускает процесс образования собственно самих бетонов. Кинетика гидратации бетонов на этом этапе напрямую связана с изменением их влажности, а контроль влажности позволяет объективно определять оптимальный момент съемки опалубки, что позволяет экономить по разным оценкам [1] от 10 до 20 % общих затрат на бетонирование.

Именно влага, а в наших широтах еще и морозы, являются основными естественными причинами разрушения строительных, в том числе и бетонных конструкций. Таким образом, постоянный контроль влажностного режима бетонных конструкций является одним из важнейших инструментов, позволяющих реально продлить сроки жизни строительных конструкций.

Стандарты измерения влажности бетонов

Сегодня действуют несколько международных, национальных и отраслевых стандартов измерения влажности бетонов. Они могут быть разделены на две группы: разрушающие (инновационные) и неразрушающие бетонные конструкции.

К первой группе относятся наиболее распространенные методы (ГОСТ 12730.2-78) измельчения, нагрева и взвешивания либо стандартных (специально отлитых) образцов, либо кернов, высверленных из «оригинальных» бетонных конструкций. Метод простой, но серьезно ограниченный для определения влажности бетонов в реальных строительных конструкциях.

Сверление дюймовых отверстий в таких конструкциях требует широко применяемого на практике точечного

метода размещения стандартных (точечных) сенсоров влажности для контроля «напольных» бетонов методом (ASTM F2170). Следует отметить, что в последнее время на рынке появились [2,3,4] автономные малогабаритные сенсорные модули, «имплантируемые» в деталь еще при заливке бетонов. Они непрерывно передают по радиоканалу информацию о влажности и температуре в точке «закладки». Однако срок их службы ограничен сроком службы аккумуляторов, а получаемая информация о влажности относится лишь к одной точке и не отражает ситуацию с конкретным распределением влажности по объему детали.

Ко второй группе относятся т.н. поверхностные методы измерения влажности бетонов. Это стандарт ASTM F 1869 для бетонов, по которому на его поверхность наносится слой хлорида кальция, после чего он закрывается пленкой, и спустя некоторое время регистрируется изменение вида химиката.

Разработан также стандарт ASTM F2659, использующий «отклик» бетонов на зондирующее их микроволновое излучение. Однако в силу физических ограничений (диффузия воды, затухание микроволнового излучения) поверхностные методы измерения влажности корректно работают лишь на сравнительно тонких, поверхностных слоях бетонов – 2-3 см.

Таким образом, существующие в настоящее время измерения влажности имеют одномоментный, разовый характер и позволяют определять влажность лишь тонких поверхностных слоев, а в остальной своей массе – исключительно в одной, отдельной точке бетонных конструкций.

Для многих же ответственных крупногабаритных бетонных конструкций в сложных климатических условиях созревания бетонов или в случаях постоянного контакта с водой, водяным паром, с влагосодержащими почвами и т.д. такой ограниченный объем информации является недостаточным для выявления реального профиля распределения влажности внутри их.

Разработанный кабельный сенсор влажности [КСВ] газов позволяет преодолеть эти ограничения и может представлять пользователям в режиме онлайн качественно больший объем информации о распределении влажности внутри бетонных конструкций практически по любой траектории.

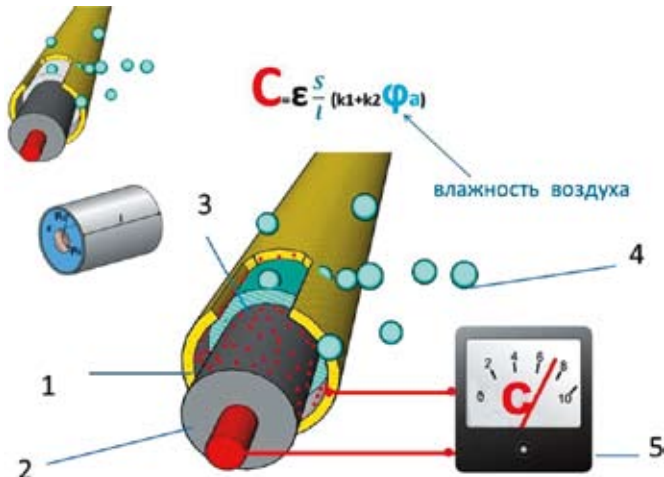


Рис. 1. Схема работы кабельного сенсора влажности:
1 – внешняя оболочка; 2 – сенсорная полимерная оболочка; 3 – прокладка – пористая оболочка; 4 – молекулы воды; 5 – измеритель емкости

При разработке проекта были использованы решения и опыт создания 3D парогидросенсорных кабелей, регистрирующих протечки воды в любой точке пространства [5-8]. Использован хорошо зарекомендовавший себя импедансный метод определения влажности газов за счет измерения изменений емкости электрических конденсаторов при попадании в зазор между их обкладками молекул воды.

Сенсор выполнен (рис. 1) в виде не имеющего ограничений по длине, открытого для внешнего воздействия кабеля – цилиндрического конденсатора. Молекулы воды (4) свободно проходят через внешнюю оболочку (1), сплетенную из металлических проводов типа «экран», и попадают в оболочку-прокладку (3), сделанную из капиллярно пористого материала.

В силу большого различия диэлектрических постоянных воды и воздуха (2 и 80 соответственно) увеличение концентрации молекул воды изменяет эффективное значение диэлектрической постоянной этой прокладки. Как следствие, возрастает электрическая емкость цилиндрического конденсатора, образованного с одной стороны плетеной сеткой-экраном (внешняя обкладка) и с другой стороны – поверхностью электропроводящей полимерной оболочки центрального медного провода (внутренняя обкладка).



Рис. 2. Сравнение характеристик традиционных сенсоров влажности и кабельных сенсоров влажности:
1 – стандартный точечный сенсор влажности; 2 – кабельный сенсор влажности

Таким образом, измеряя изменение электрической емкости такого сенсора, генерируется электрический сигнал, пропорциональный изменению влажности окружающего кабельный сенсор воздуха.

Отличительной особенностью кабельного сенсора является тот факт, что в качестве внешней сенсорной поверхности, эффективно «захватывающей» молекулы воды, используется буквально вся поверхность кабеля (рис. 2). Она в десятки тысяч раз больше аналогичных площадей сенсорного захвата любого из известных точечных сенсоров.

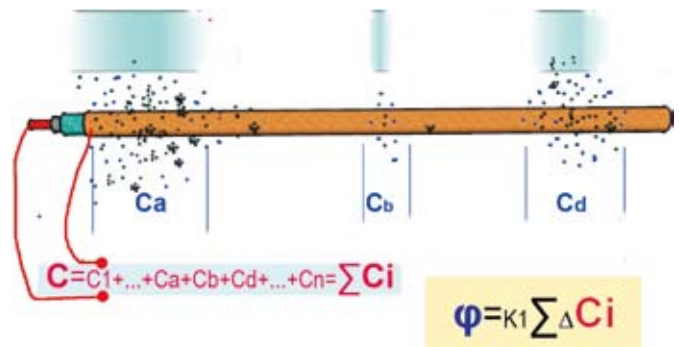


Рис. 3. Генерация КСВ усредненного (по длине кабеля) сигнала влажности среды

Как видно из рис. 3, кабель можно представить как совокупность множества измерительных сегментов – параллельно соединенных конденсаторов. Общая емкость такой системы определяется согласно законам электрических цепей, как сумма составляющих ее элементов. Поэтому измеряемый сигнал сенсорного кабеля несет информацию об автоматически интегрированной средней влажности по всей длине кабеля. Таким образом, один сенсорный кабель влажности (КСВ) может заменить собой несколько обычных точечных сенсоров. Он делает ненужными подводку коммуникационных линий для этих сенсоров, необходимость создания специализированного блока усреднения получаемых от них значений влажности. КСВ является одновременно и измерительным устройством, и коммуникационной линией, подсоединенной напрямую к специализированному интерфейсу.

Измерения влажности бетонов с помощью кабельного сенсора влажности

Данный рисунок иллюстрирует принципиальное различие в качестве и объеме информации о влажности, получаемой от традиционных точечных сенсоров и КСВ. При этом следует иметь в виду, что траектория, вдоль которой возможен съем информации о влажности, определяется направлениями прокладки кабеля внутри бетонных конструкций.

Для «старых» бетонных деталей она определяется направлениями сверления «установочных» отверстий, в которые и размещается КСВ. Для вновь же изготавливаемых бетонных конструкций не существует ограничений по созданию практически любых, требуемых заказчиком, траекторий контроля. Для этого достаточно предварительно разместить измерительный кабель перед

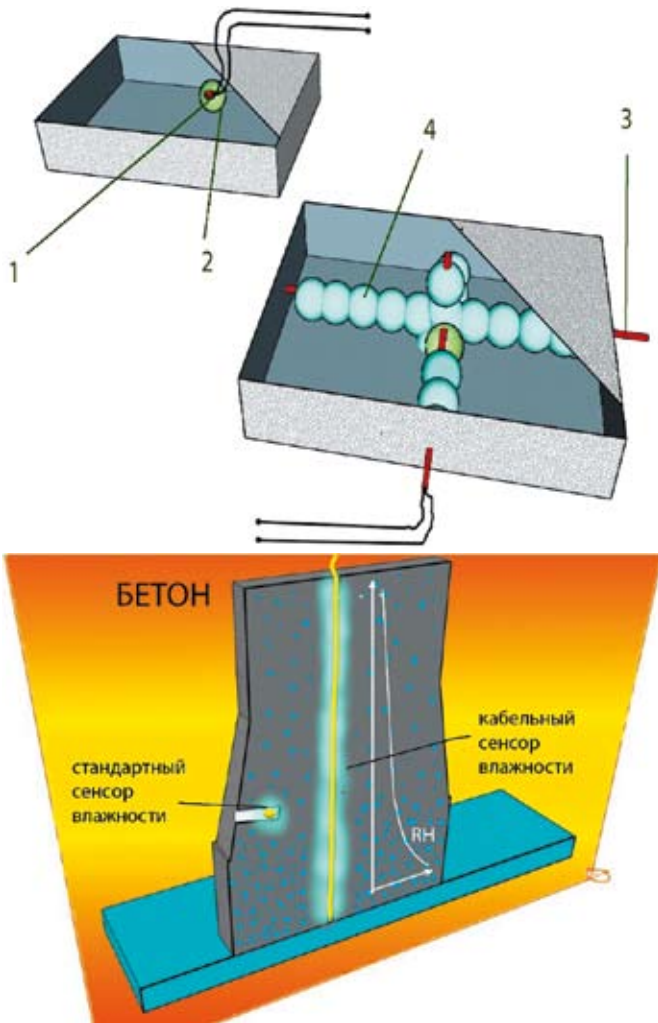


Рис. 4. Различия в объемах и качестве информации о влажности бетонов, получаемой от КСВ и традиционных сенсоров:
1 – точечный сенсор; 2 – сканируемый сенсором объем бетонов;
3 – кабельный сенсор влажности; 4 – сканируемый сенсором объем бетонов

заливкой бетона по нужной траектории и закрепить его с помощью пластиковых стяжек к металлическим стержням арматуры.



Рис. 5. Крепление кабельных сенсоров влажности к арматуре перед заливкой бетона

Следует отметить, что на самой ранней стадии жизненного цикла бетонов получение информация и о кинетике изменения содержания влаги при конкретных внешних условиях созревания бетонов может иметь

ключевое значение для принятия решений о съеме опалубки или продолжении бетонирования. По данным применения имплантируемых точечных сенсоров [1], реальная экономия достигает 20% от общих затрат на бетонирование.

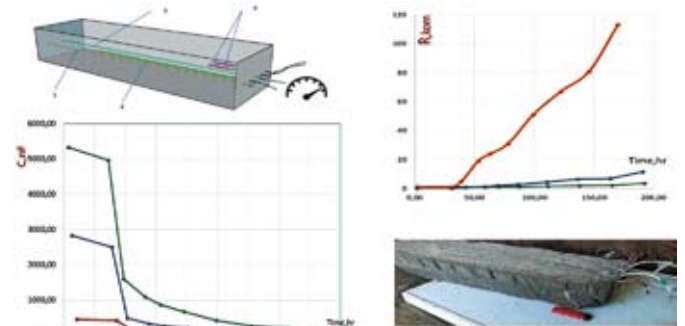


Рис. 6. Динамика изменения электрической емкости и сопротивления трех различных конструкций КСВ в процессе созревания изделия из бетона

На рис. 6 приведены результаты экспериментов с бетонным блоком из пескобетона М300 и тремя различными марками КСВ, имплантированными при заливке бетонами. Подобная технология «имплантации» КСВ в бетоны позволяет создавать малобюджетные системы пожизненного мониторинга влажности внутри практически любых бетонных конструкций в режиме on line. Для этого достаточно просто заложить при заливке отрезок КСВ и подключиться к нему в требуемый момент для измерения фактического среднего уровня

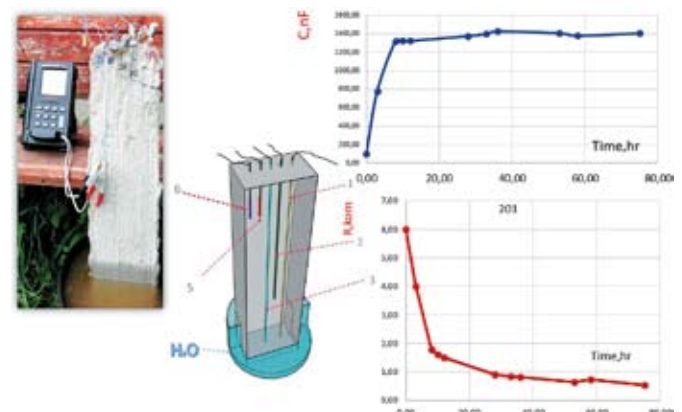


Рис. 7. Регистрация прохождения фронта влажности в бетонном изделии

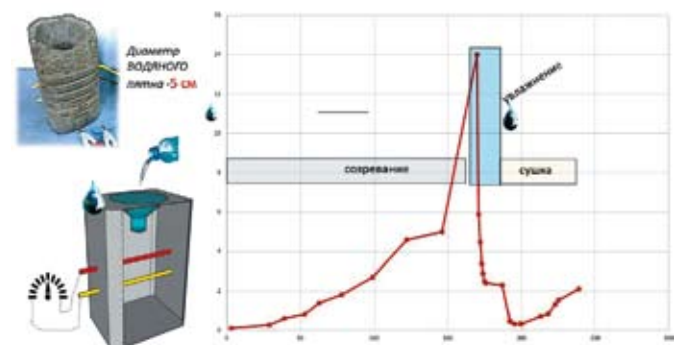


Рис. 8. Изменение сигнала КСВ при созревании бетонной детали, локальном воздействии воды и последующей сушке

влажности, например при регистрации возникновения угрозы «подтоплений».

В ходе проведенных экспериментов (рис. 7) на блоке из пескобетона М300 с 6 различными имплантированными на разных расстояниях от водяной поверхности КСВ было уверенно зарегистрировано прохождение фронта влажности. В зависимости от типа КСВ и их расстояния от водяной поверхности, время обнаружения подхода фронта влажности от водяной поверхности изменялось от 30 минут до 6 часов.

На рис. 8 приведены результаты по измерению влажности «изделия с воронкой» с момента его формования (фаза созревания), фазы воздействия локального водяного пятна (его диаметр равен 5 см) и фазы сушки. Они подтверждают реальную чувствительность КСВ к технологическим фазам и изменению внешних, воздействующих на бетоны, факторов.

Мультизональные кабельные сенсоры влажности

С целью расширения возможностей, заложенных в концепцию КСВ, для более точной локализации измерений был разработан мультизональный сенсорный кабель влажности МКСВ.

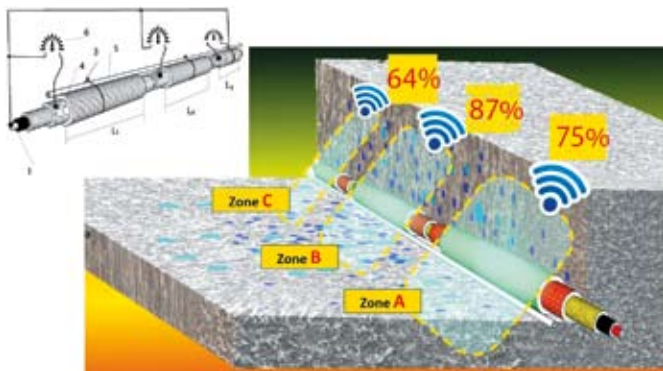


Рис. 9. Мультизональный кабельный сенсор влажности бетонов

Конструкция МКСВ предусматривает разделение кабеля на несколько функционально независимых друг от друга зон Li. Каждая такая зона генерирует свой сигнал

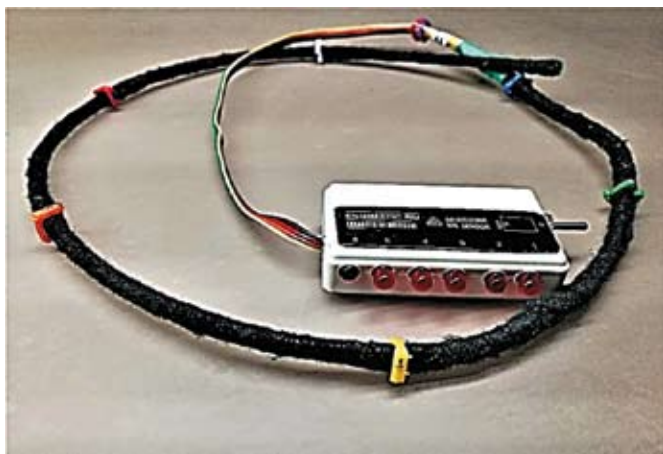


Рис. 10. Шести зонный кабельный сенсор влажности с индикаторным устройством критического превышения влажности в зонах

пропорциональный средней влажности в пределах этой зоны. Таким образом, с помощью одного такого МКСВ реализована возможность независимого многозонального контроля распределения влажности по выбранной траектории внутри бетонных конструкций.

На рис. 10 изображен образец шести зонного МКСВ с индикаторным устройством критического превышения влажности в зонах.

Применение кабельных сенсоров влажности в строительстве

Наиболее простым и экономичным способом установки КСВ в бетонах является их пространственная (по выбранной, исходя из требований заказчика, траектории) «привязка» к металлической арматуре (см. рис. 5). В этом случае, буквально с первой минуты после заливки, кабель начинает «работать» и генерирует электрический сигнал, несущий информацию об изменении содержания «свободной и связанной» воды вдоль измеряемой траектории в бетоне.

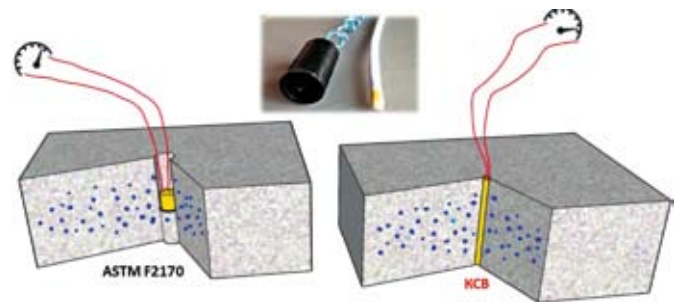


Рис. 11. Измерение влажности бетонных оснований под напольные покрытия по ASTM F2170 и с помощью КСВ

Для контроля влажности внутри «старых» бетонных конструкций необходимо предварительно просверлить в нужном направлении «установочные» отверстия диаметром 5-8 мм и закрепить в них КСВ. Следует отметить,

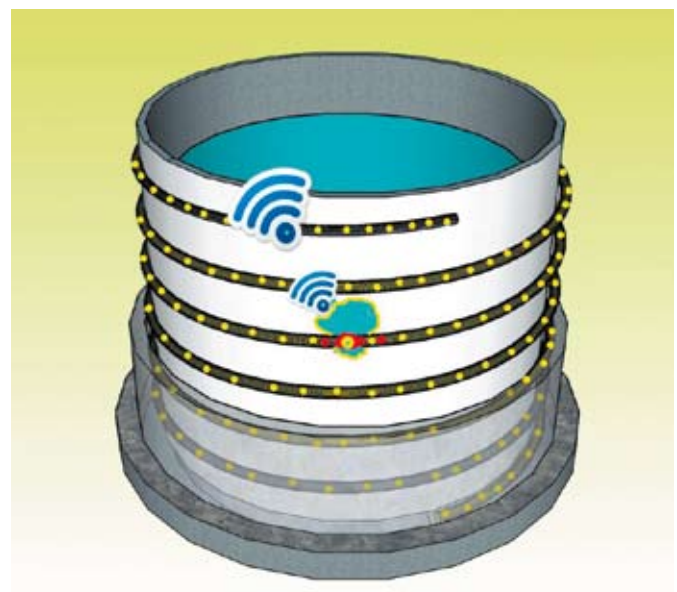


Рис. 12. Обнаружение протечек бетонных резервуаров с помощью КСВ

что сечение отверстий при этом в 10-15 раз меньше сечения отверстий, предусмотренных действующими стандартами. Они классифицируются, как малоинвазивные, практически не влияющие на прочность деталей, отверстия.

КСВ, будучи размещенными в бетонах, в любой момент, спустя даже годы и десятилетия, полностью готовы к процедуре измерения влажности – достаточно лишь к ним подсоединить измерительный прибор. В случаях, когда необходим постоянный контроль изменения влажности бетонных конструкций, КСВ подсоединяется к стационарной измерительной системе, которая в случае, например, превышения влажности в контролируемой области активирует радиоканал и передает сообщение об инциденте на централизованный пункт контроля.

Характеристики КСВ позволяют генерировать сигнал не только об изменении влажности (вода в газовой фазе) в окружающей среде, но и о воздействии на КСВ воды, т.е. сигнализировать на пункты контроля о протечках воды или любых других электропроводных жидкостей.

Одним из перспективных направлений является контроль протечек в т.н. «холодных» и деформационных швах. Схема расположения КСВ для «холодных» швов представлена на рис. 13.

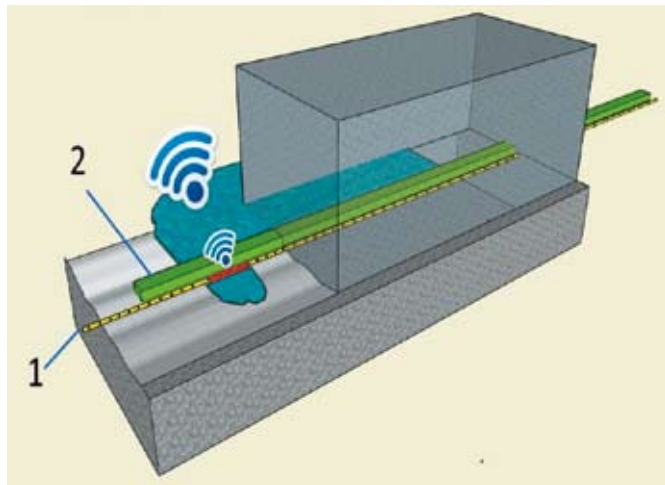


Рис. 13. Контроль холодных швов:
1 – кабельный сенсор влажности; 2 – гидрошпонка

На рис. 14 представлен полноразмерный стенд, демонстрирующий варианты возможного применения КСВ для комплексного контроля увлажнения и протечек в холодных и деформационных швах заглубляемых железобетонных конструкций. Стенд разработан и изготовлен инжиниринговой компанией «Электротехнический центр» и производителем гидроизоляционных компонентов компанией «Гидромикс».

Разработанное и экспериментально подтвержденное решение позволяет специализированному процессору (2) в комплекте с кабельным сенсором влажности (1) эффективно контролировать гидровлажностный режим

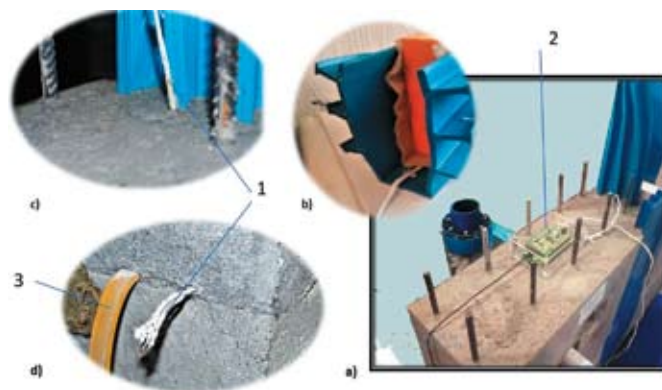


Рис. 14. Демонстрационный стенд контроля гидровлажностных режимов заглубляемых бетонных конструкций:
а) общий вид демонстрационного стенда контроля гидровлажностного режима бетонных конструкций; б) деформационный шов; в) вертикальный деформационный шов; г) «холодный» шов с гидрошпонкой (3).

заглубляемых железобетонных конструкций. При первых признаках отклонений в гидрорежимах конструкций процессор сигнализирует об этом и выдает пользователю точные координаты места, где это произошло. Такая ранняя диагностика позволяет оперативно принять превентивные меры по устранению инцидента и, соответственно, снизить убытки.

Приведенные примеры не ограничивают сферу применения КСВ. Это могут быть и автостреды (рис. 15), взлетно-посадочные полосы, специальные сооружения, работающие в сложных режимах эксплуатации, хранилища вредных жидких отходов, мосты, причалы и т.д.



Рис. 15. Потенциальные области применения кабельных сенсоров влажности бетонов

Библиографический список

- <https://www.giatecscientific.com/case-studies/>;
- maturix.com/concrete-sensor/maturity-temperature-sensor/;
- www.concretesensors.com/products/;
- sensohive.com/sensors/orbit3/;
- Патент РФ № 2536766 «Мультисенсорный датчик критических ситуаций» Сакуненко Ю.И., Кондратенко В.С.;
- Патент РФ № 2545485 «Датчик электропроводящих жидкостей» Сакуненко Ю.И., Кондратенко В.С.;
- Патент РФ №2662252 Датчик утечек электропроводящих жидкостей Сакуненко Ю.И., Кондратенко В.С.;
- Заявки на патент РФ № 2018104565, №2018104563;
- Заявка на патент США, No. 5/442,116 02 24 2017.