

УДК 691.32:550.837.75

## РАДИОВОЛНОВЫЙ МЕТОД СВЧ-ИЗМЕРЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БЕТОННОЙ СМЕСИ

<sup>1</sup>Макаров А.Д., <sup>2</sup>Марсов В.И., <sup>2</sup>Марсова Е.В., <sup>2</sup>Джабраилов Х.А., <sup>2</sup>Антонова Е.О.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Нижний Новгород;

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет  
(МАДИ)», Москва, e-mail: snatxes@gmail.com

В работе описываются методы измерения технологических параметров, основанные на воздействии электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ) для контроля таких параметров бетонной смеси, как наличие бетонной смеси в бетономесительной установке, уровень бетонной смеси в опалубке, степень уплотнения уложенной бетонной смеси в опалубке. При использовании указанного метода измерения в системе автоматизированного управления операциями перемещения бетонной смеси в опалубку на строительной площадке и придания ей заданных технологических свойств были определены технические и технологические ограничения, накладываемые на средства контроля параметров смеси. Выбранный радиоволновой метод измерений, в отличие от других методов фиксации параметров бетонной смеси, использует зависимость одной из физических характеристик электромагнитного излучателя. С этой целью был использован волновой датчик, измеряющий СВЧ-мощность волн, прошедшей через бетонную смесь, и датчик, с фиксацией фазового сдвига, возникшего в результате отражения электрической волны относительно падающей от поверхности бетонной смеси, а также проанализированы методы контроля бетонной смеси для нахождения наиболее оптимального, не нарушающего ее структуру. Это дает возможность реализовать измерение ряда параметров бетона с использованием единой физической базы, обеспечивать точность и высокое быстродействие процесса измерений.

**Ключевые слова:** радиоволновой метод, электромагнитные волны, бетонная смесь, СВЧ-датчик, бетоновод, бетонирование, автоматическое управление

## RADIO WAVE METHOD OF MICROWAVE MEASUREMENTS OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF CONCRETE

<sup>1</sup>Макаров А.Д., <sup>2</sup>Марсов В.И., <sup>2</sup>Марсова Е.В., <sup>2</sup>Джабраилов Х.А., <sup>2</sup>Антонова Е.О.

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod;

<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow,  
e-mail: snatxes@gmail.com

The paper describes methods for measuring technological parameters based on the effect of electromagnetic waves of the ultrahigh frequency range (UHF) to control such parameters of a concrete mixture as: the presence of a concrete mixture in a concrete mixing plant, the level of a concrete mixture in the formwork, the degree of compaction of the laid concrete mixture in the formwork. In the process of optimizing the construction of a monolithic structure, it is necessary to develop an integrated automation system based on three unique features of concreting low-rise buildings, a predetermined sequence of operations determined by the technology that implements the construction of buildings, and a system that ensures optimal continuity and consistency of each technological redistribution of technological criteria. Based on these theoretical and practical problems, it becomes necessary to create an optimized automatic control system for the continuous construction of monolithic structures, based on various features of the operation and design of equipment. For this, a wave sensor was used that measures the microwave power of the wave passed through the concrete mixture and the sensor, with the fixation of the phase shift that arose as a result of the reflection of the electric wave relative to the concrete mixture incident from the surface, and also the methods of controlling the concrete mixture were analyzed to find the most optimal without disturbing its structure.

**Keywords:** radio wave method, electromagnetic waves, concrete mix, microwave sensor, concrete pipe, concreting, automatic control

Управление в автоматическом режиме технологическими операциями транспортировки бетонной смеси, последующей ее укладкой и уплотнением требует использования алгоритмов и технических средств индикации параметров процесса бетонирования. В первую очередь необходимо фиксировать темп поступления бетона на рабочую площадку его фактического количества с необходимым по заданию. Весь объем поступающей информации на ее обработке

осуществляется вычислительным устройством, которое определяет оптимальную последовательность перемещения распределительного устройства смеси по точкам бетонирования. Фиксируется толщина укладываемого слоя в соответствии с технологической картой элементов возводимого сооружения.

Информация о параметрах процесса, введенная в вычислительное устройство, обрабатывается в командном блоке и пере-

дается на исполнительные механизмы распределительного устройства бетонной смеси, устанавливая его в исходное положение. Далее осуществляется нагнетание бетонной смеси в трубопровод с подключенным к нему устройством распределения и укладки смеси в бетонируемую конструкцию. Начало процесса транспортирования смеси фиксируется датчиком, сигнал от которого поступает в вычислительное устройство. На его выходе появляется сигнал попадающих на вход командного блока, управляющего исполнительными механизмами устройства распределения смеси включения пакета глубинных вибраторов. Процесс подачи смеси в бетонируемую конструкцию фиксируется датчиком контроля толщины укладываемого слоя, сигнал с которого подается в вычислительное устройство, где сравнивается с сигналом задания. При равенстве этих сигналов подача бетонной смеси прекращается [1, 2].

Решить задачи автоматического управления операциями укладки и уплотнения бетона в монолитном домостроении возможно на основе специальных технических средств – датчиков технологических параметров бетонной смеси, при этом надо учитывать, что выбор типа датчика будет существенно сказываться на качественных показателях системы автоматизированного управления технологическим процессом бетонирования в целом.

Основные физико-механические свойства бетонной смеси, перекачиваемой по бетоноводам:

- средний размер частиц крупного заполнителя до 40 мм;
- подвижность бетонной смеси от 8 до 12 см осадки стандартного конуса;
- плотность 2500 кг/м<sup>3</sup>;
- объемный вес 1850 кг;
- начало схватывания бетонной смеси от 30 до 60 мин;
- удельное электрическое сопротивление от 3 до 23,4 Ом\*м.

Для автоматизации процессов укладки и подачи бетонной смеси при монолитном жилищном строительстве необходим оперативный контроль технологических параметров смеси, таких как ее присутствие и расход в бетоноводе, высота и уровень подачи в опалубке и степень уплотнения.

Различные методы и средства контроля технологических параметров готовой смеси: наличие и расход, уровень в опалубке, степень сжатия – требуют выбора метода контроля, обладающего универсальностью по отношению к фиксации этих разнообразных параметров [3].

По виду измеряемой физической величины средства контроля можно подразделить на устройства контроля: наличия бетонной смеси, расхода бетонной смеси, уровня бетонной смеси, степени уплотнения бетонной смеси. По этому признаку характера работы можно выделить средства непрерывного контроля и интервальной оценки параметров.

По признаку характера взаимодействия с измеряемой средой (бетонной смесью) различают контактные и бесконтактные средства контроля, которые подразделяются на электромеханические, ультразвуковые, радиационные, тепловые, электромагнитные.

Цель исследования – разработка универсального СВЧ-метода для контроля физических параметров бетонной смеси, таких как наличие бетонной смеси в бетоноводе, уровня бетонной смеси в опалубке, степени уплотнения уложенной бетонной смеси, для управления непрерывным процессом подачи бетонной смеси на строительный участок.

### Материалы и методы исследования

Рассмотрим соответствие средств контроля технологических параметров бетонной смеси приведенным классификационным признакам.

Бетонная смесь характеризуется высокой вязкостью, текучестью, склонностью к налипанию и относительно быстрым схватыванием, что исключает применение контактных средств контроля. Соответственно для контроля технологических параметров следует обращаться к неразрушающим методам.

Датчиками в электромеханических средствах контроля служат тензометрические силоизмерительные элементы. С помощью электромеханических датчиков, монтируемых на конструкции опалубки, можно контролировать массу ее заполнения бетонной смесью. Датчики обладают высокими точностными характеристиками определения массы смеси, отсутствием зависимости измерений от изменения ее плотности, надежностью, независимостью от таких факторов состояния внешней среды, как влажность и загрязненность [4]. Однако недостатком метода электромеханических измерений являются: отсутствие универсальности, трудоемкость монтажа и технического обслуживания датчиков.

Как следует из анализа данных, приведенных в таблице, наибольшими технологическими возможностями обладают ультразвуковые, радиационные и электромагнитные средства контроля, так как они обладают наибольшей информативностью по сравнению с электромеханическими и тепловыми.

Технологические возможности средств контроля  
в зависимости от физического принципа действия

Принцип действия средств контроля	Контролируемый параметр			
	Наличие смеси	Уровень смеси в опалубке	Расход смеси	Степень уплотнения смеси
Электромеханические	–	+	–	–
Ультразвуковые	+	+	+	+
Радиационные	+	+	+	+
Тепловые	–	+	+	–
Электромагнитные	+	+	+	+

Принцип действия ультразвуковых средств контроля сводится к изменению мощности акустической волны (от 300 МГц до 300 ГГц) при взаимодействии с контролируемым материалом. Такой метод контроля обладает высоким быстродействием и разрешающей способностью.

Метод измерения значения уплотнения бетонной смеси по величине изменения скорости ультразвука, проходящего между излучателем и приемником неэффективен, так как скорость ультразвуковых колебаний зависит от физико-химических свойств и температуры просвечиваемой среды [1, 2].

Метод радиационного измерения основан на степени поглощения облучаемого материала  $g$  – необходимо обеспечить получение объективной информации о контролируемых параметрах технологического процесса;

– физико-химические свойства бетонной смеси исключают возможность контакта с ней датчиков систем измерений, что определяет необходимость использования бесконтактных датчиков;

– предполагаемые технические средства считывания технологических параметров должны без затруднений становиться частью технологического объекта;

– необходимо обеспечивать независимость средства контроля от значений элек-

трических помех в условиях строительной площадки;

– в основу выбора средств контроля разнообразной информации необходимо использовать единый принцип измерений на одной физической базе;

– средства контроля должны быть безопасными, не иметь отрицательного воздействия на строителей;

– метрологические характеристики технологических средств измерений должны соответствовать требованиям к операциям бетонирования.

Радиоволновые методы, в отличие от других методов фиксации параметров бетонной смеси, используют зависимость одной из физических характеристик электромагнитного излучателя. Это дает возможность реализовать измерение ряда параметров бетона с использованием единой физической базы, обеспечивать точность и высокое быстродействие процесса измерений.

В результате взаимодействия электромагнитных сверхвысокочастотных волн с материалом бетонной смеси происходит изменение характеристик волнового потока [5].

Для фиксации присутствия бетонной смеси в бетоноводе может быть использована структурная схема волнового датчика, измеряющего СВЧ-мощность волны, прошедшей через бетонную смесь (рис. 1).

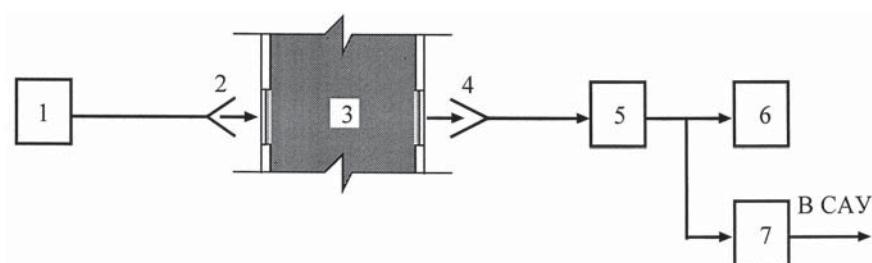


Рис. 1. Структурная схема измерений наличия бетонной смеси в бетоноводе:  
1 – микроволновый генератор; 2 – передающая антенна; 3 – контролируемый участок бетоновода;  
4 – приемная антенна; 5 – детектор; 6 – индикаторный прибор; 7 – усилитель

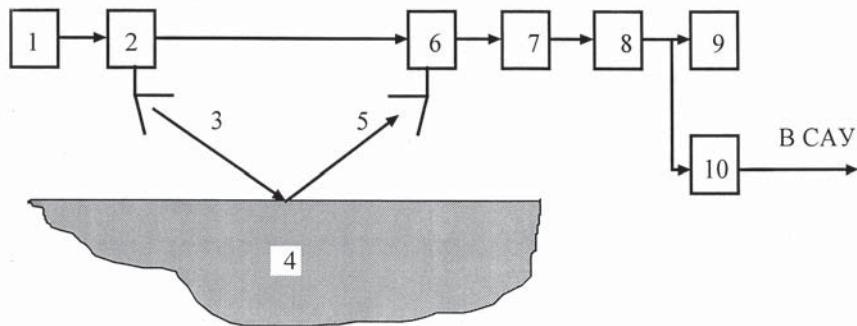


Рис. 2. Структурная схема измерений уровня бетонной смеси в опалубке:  
1 – модулятор; 2 – микроволновый генератор; 3 – передающая антенна;  
4 – бетонная смесь в опалубке; 5 – приемная антенна; 6 – смеситель;  
7 – усилитель; 8 – фильтр; 9 – индикатор; 10 – выходной усилитель

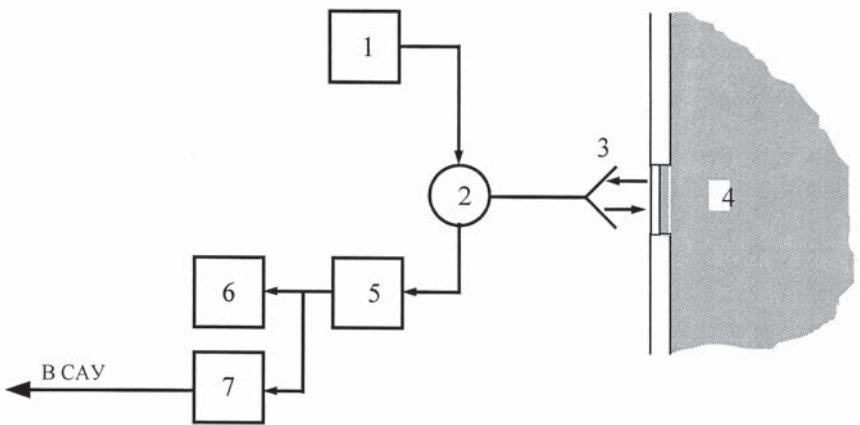


Рис. 3. Структурная схема измерений уплотнения уложенной бетонной смеси:  
1 – микроволновый генератор; 2 – циркулятор; 3 – приемо-передающая антенна;  
4 – уложенная бетонная смесь; 5 – детектор; 6 – индикатор; 7 – усилитель

СВЧ-датчик работает следующим образом. На СВЧ-генератор подается входное напряжение, под воздействием которого модулятор вырабатывает управляющий сигнал на векторный СВЧ-генератор (от 9 кГц до 40 ГГц), который в свою очередь создает колебания определённой частоты. Сгенерированный сигнал достигает передающей антенны и распространяется по исследуемой области. Сигнал, в виде волны, отраженный от поверхности бетонной смеси попадает на приемную антенну, которая перенаправляет его в детекторный приемник, состоящий из короткозамкнутого волновода, диода, который устанавливается на некотором расстоянии от его задней стенки и фильтра низких частот [1, 6]. Благодаря фильтру на выходе из детекторной секции выделяется только низкочастотный спектр сигнала.

Уровень заполнения бетонной смесью опалубки можно измерить датчиком с фиксацией фазового сдвига падающей и отраженной от поверхности бетонной смеси электромагнитной волны (рис. 2).

Можно оценить уплотненность лицевой части бетонного массива, используя информацию микроволнового датчика об изменении мощности отраженного СВЧ-сигнала (рис. 3).

Электрические импульсы поступают с генератора импульсов 1 и попадают через циркулятор 2 на приемо-передающую антенну-рупор 3. Волны, отраженные от расположенного бетона 4, поступают на вход детектора-приемника 5 через циркулятор 2 и попадают на индикатор 6. Сигнал с выхода измерителя микроволн, содержащий информацию о коэффициенте уплотнения (плотности) смеси, сглаживается и усиливается

ливается с помощью фильтров и усилителя сигнала соответственно, что позволяет использовать его в качестве управляющего значения в автоматизированную систему управления технологическим процессом.

В случае, когда опалубка выполнена из стальных листов, контроль коэффициента уплотнения смеси производится через специальные «окна» из радиопрозрачного материала (фторопластика), принципиальной особенностью которого является низкая адгезия с цементирующей смесью [7].

### Заключение

Таким образом, можно констатировать, что разработан универсальный СВЧ-метод контроля таких разнородных физических параметров смеси, как ее наличие в бетоноводе, уровень заполнения опалубки, степень уплотнения. Результаты использования СВЧ-метода показали, что ошибка измерений находится в интервале допусков по точности и времени выполнения технологических операций. Наиболее эффективно использовать предлагаемый СВЧ-метод при возведении монолитных односекционных объектов, так как это повысит производительность труда на 20% с одновре-

менным сокращением себестоимости работ на 15% [6].

### Список литературы

1. Ходыкин В.В. Автоматизация технологических процессов производства бетонных работ в монолитном домостроении: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1999. 184 с.
2. Мацкевич А.Ф., Плотников Н.М., Ходыкин В.В. Патент РФ № 2057867, 10.04.1996. Способ автоматической укладки и уплотнения бетонной смеси // Патент России № 2057867.1996. Бюл. № 3.
3. Хегай О.Н., Хегай М.О. Технология изготовления строительных конструкций. Устройство для уплотнения бетона // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2016. № 3 (30). С. 65–69.
4. Ахобадзе Г.Н. Волновые измерения неэлектрических величин с метрологическим анализом // Приборы. 2018. № 5 (215). С. 49–54.
5. Смирнов Г.В., Замятин Н.В. Способ контроля параметров сыпучих или жидких материалов в резервуарах // Патент РФ № 2636794. Патентообладатель ФГОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». 2017. Бюл. № 34.
6. Смирнов В.В. Система автоматического контроля уровня заполнения цементного бункера бетоносмесительного узла // Фундаментальные исследования. 2013. № 6–5. С. 1094–1097.
7. Жариков И.С., Лакетич А., Лакетич Н. Влияние качества бетонных работ на прочность бетона монолитных конструкций // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 1. С. 51–58.