

Е. А. Барабанова, Д. Б. Мальцев, В. Н. Есауленко, М. Ф. Руденко

## РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА БАЗЕ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Рассматривается распределенная система контроля технологических объектов нефтегазовой промышленности на базе беспроводной сенсорной сети. Проведено исследование существующих систем мониторинга. Отмечается, что ввиду ряда недостатков эти системы не обеспечивают должного уровня надежности. Приведены принципы проектирования структуры сенсорной телекоммуникационной системы, которая является оптимальным вариантом для предприятий газотранспортной отрасли. Предложены варианты построения распределенных систем контроля утечек газа линейных участков магистрали на базе различных технологий беспроводных сенсорных сетей. Рассматривается сенсорная сеть на базе технологии ZigBee. Для расчета затухания сигнала беспроводной сенсорной сети при разном значении высоты подвеса (подъема) антенны использовалась модель Окамуры. Определено количество датчиков, необходимых для построения надежной сенсорной сети.

**Ключевые слова:** магистральный газопровод, датчик, беспроводная сенсорная сеть, затухание сигнала, антенна, распределенная система контроля.

### Введение

Одной из главных составляющих топливно-энергетического комплекса России является магистральный трубопроводный транспорт. Магистральные продуктопроводы в настоящее время занимают одно из первых мест по капиталоемким вложениям среди сооружений нефтегазового комплекса, и пролонгация их полноценного функционирования позволяет существенно уменьшить затраты и, соответственно, положительно повлиять на экономику страны.

Наиболее важной проблемой продуктопроводного транспорта является поддержание рабочего состояния линейных участков промысловых и магистральных газопроводов. Подземные газопроводы, которые эксплуатируются в нормальном режиме, сохраняют свои рабочие функции в течение нескольких десятков лет. Это происходит благодаря тому, что уделяется должное внимание систематическому мониторингу технического состояния подземных и надземных магистральных газопроводов и осуществляется своевременная ликвидация появляющихся дефектов.

Появление дефектов чаще всего наблюдается по причине коррозии, в редких случаях – из-за механических воздействий. Для определения места коррозии требуются немалые материальные затраты, кроме того, сам процесс является трудоемким. Процесс вскрытия газопровода экономически нерентабелен, а визуальное обследование не дает точных результатов. Технические средства, которые способны решить данную проблему, различаются методами исследования и физическими принципами действия устройства, областями применения, масштабом диагностирования. Большая протяженность и разветвленность газопроводов в России, их расположение в разных географических и климатических зонах создают существенные неудобства и ограничивают реализацию многих из этих методов при диагностике технического состояния магистралей.

Для решения вышеперечисленных проблем требуется существующие средства и методы мониторинга дополнить устройствами, которые, не влияя на технологический режим эксплуатации газотранспортных объектов, позволили бы контролировать и повышать надежность магистральных газопроводов.

По этой причине *актуальна* организация телекоммуникационной системы, позволяющей идентифицировать технологические объекты производственных комплексов и производить мониторинг технического состояния подземных и надземных промысловых магистральных трубопроводов без их вскрытия.

Таким образом, применение распределенной системы контроля технологических объектов нефтегазовой промышленности на базе беспроводной сенсорной сети является актуальной задачей.

### Анализ существующих систем контроля объектов нефтегазовой промышленности

В большинстве случаев нефтегазовые предприятия прибегают к таким методам мониторинга, как патрулирование трасс, создание систем телеметрии. Как показывает практика, такие методы не являются эффективными из-за большой протяженности продуктопроводов, сбоя в программах по сбору данных с датчиков, установленных на магистральных трубопроводах, что вызывает утечки, порывы, аварии на продуктопроводах, приводящие к загрязнению окружающей среды. Эффективность этих методов снижают также кражи углеводородного сырья из-за «врезок» в трубопровод сторонними организациями, что существенно сказывается на бюджете нефтегазовых компаний.

В настоящее время популярными и перспективными способами мониторинга целостности и надежности продуктопроводов являются метод акустической эмиссии, аэрокосмический метод и технологии дистанционного зондирования, лазерный газоаналитический метод, метод поверхностной электромагнитной волны, гидравлический метод.

*Метод акустической эмиссии* основывается на анализе акустических шумов околотрубного грунта либо оболочки трубы. Этот метод позволяет эффективно следить за образованием и развитием дефектов в металле трубопровода в процессе его эксплуатации. Для применения данного метода мониторинга необходимо обеспечить помехоустойчивость защищенного канала радиосвязи для ограждения от преднамеренных помех, которые приводят к искажению передаваемой информации. Метод эффективен на ранних стадиях образования дефектов, т. к. предполагает использование частотно-временного преобразования сигнала, показывающего распределение энергии сигнала и во времени, и по частоте, метода кумулятивных сумм и кластерного анализа. Использование данных алгоритмов и методов предполагает выборочную проверку исследуемых процессов, исключая фактор резкого изменения свойств.

*Аэрокосмический метод* предполагает использование современных спутниковых технологий, имеющих высокое и сверхвысокое разрешение, геоинформационных технологий, методов дистанционного зондирования, методов регистрации характеристик электромагнитного поля, применение воздушных средств (вертолеты, самолеты и т. д.)

*Лазерный газоаналитический метод* используется для обнаружения газа, который перекачивается вместе с углеводородным сырьем, выходящим за пределы трубы при ее повреждении.

*Метод поверхностной электромагнитной волны* предполагает распространение поверхностной электромагнитной волны вдоль трубы, и на основе изменения этой волны проводится анализ на наличие в трубе дефектов и неоднородностей.

*Гидравлический метод* реализует принцип регистрации динамических кратковременных потоков, которые при порыве трубопровода распространяются от нее в обе стороны.

У каждого из методов есть свои достоинства и недостатки, поэтому оптимальным техническим решением будет являться использование одновременно нескольких методов мониторинга продуктопроводов, а вернее, создание особой системы мониторинга, в которой будут рассмотрены резервные варианты контроля целостности и надежности трубопроводов.

Наиболее интересными считаются методы мониторинга посредством сенсорных сетей, которые предполагают использование волоконно-оптической системы для передачи данных о состоянии объектов мониторинга или же системы радиосвязи.

Беспроводные технологии сбора информации об объектах мониторинга имеют существенное преимущество по сравнению с волоконно-оптическими технологиями – ими можно воспользоваться в ситуациях, когда использование проводных решений дорого и сложно, кроме того, беспроводные сенсорные датчики можно размещать в труднодоступных местах.

### Выбор технологии беспроводной связи

При проектировании структуры сенсорной телекоммуникационной системы (СТС) контроля для магистральных газопроводов основными принципами являются:

- системный подход к проектированию структуры СТС;
- многофункциональность (гибкость);
- модульность;
- стандартизация;
- универсальность в отношении вычислительных средств;
- территориальная распределенность.

В настоящее время беспроводные системы чаще всего используются для контроля параметров работы технологического оборудования и анализа климатических параметров на промышленных объектах. Но интерес к применению беспроводных СТС для сбора и передачи показаний с территориально распределенных датчиков, в частности с датчиков по обнаружению утечек газа при мониторинге магистральных газопроводов, имеет тенденцию к росту. Это связано с тем, что данный подход разрешает дистанционно осуществлять непрерывный мониторинг в режиме реального времени с протяженных объектов, существенно сокращая время и затраты на монтаж и последующее техническое обслуживание недорогих и малопотребляющих устройств системы [1].

Кроме этого, сенсорные сети представляют собой незаменимое техническое решение для обеспечения мониторинга телекоммуникационных систем устаревшего парка магистральных газопроводов, привлекающих особое внимание в связи с выработкой нормативного срока эксплуатации этих объектов и невозможностью применения на них, например, таких современных средств диагностирования, как внутритрубные снаряды-дефектоскопы.

Для передачи информации от беспроводных модулей в центр контроля и управления необходимо выбрать технологию соединения беспроводных модулей с центром управления.

В настоящее время для построения сенсорных сетей применяется либо технология ZigBee, либо одна из технологий сотовой связи. Сеть с использованием технологии ZigBee может быть построена на базе топологии «точка-точка» или на базе топологии Mesh.

Так как не на всех участках размещения магистральных газопроводов доступна сотовая связь, то наиболее подходящей технологией передачи данных становится технология ZigBee, которая работает в нелицензируемом диапазоне частот. Кроме этого, устройства, оснащенные ZigBee-модулями, потребляют значительно меньше электроэнергии и могут работать от альтернативных источников энергии. Минусом является только ограничение по скорости передачи данных, которая составляет не более 240 кбит/с. Данной скорости вполне хватает для передачи информации о результатах периодического опроса датчиков. Но если на некоторых участках магистральных газопроводов требуется установить устройства, передающие видеoinформацию, данная технология не обеспечит требуемую скорость передачи. В данных случаях потребуются более мощные GSM-модули.

В случае использования технологии ZigBee наиболее подходящей идеологией построения сети является Mesh-сеть, в которой каждый датчик является не только окончательным устройством сбора информации и ее передачи в центр управления, но и ретранслятором, позволяющим передавать данные от точки к точке и увеличить таким образом дальность связи. Структура Mesh-сети представлена на рис. 1. В состав сети входят традиционные для Mesh-сети устройства: маршрутизаторы и координаторы.



Рис. 1. Структура Mesh-сети

Координатор осуществляет формирование сети, реализует функцию управления узлами, а также хранит информацию о настройках каждого узла, подсоединенного к сети. Маршрутизаторы служат для подключения окончательных устройств и отвечают за выбор пути доставки сообщений между узлами сети.

Устройства, оснащенные модулями ZigBee, совмещены со средствами, которые используются для хранения информации, устанавливаются на беспроводные модули и программи-

руются на снятие и передачу данных, после чего полученные данные оперативно передаются в центр контроля и управления, из которого специальное программное обеспечение осуществляет мониторинг сети.

### Структура распределенной системы контроля на базе беспроводной сенсорной сети

На рис. 2 представлена распределенная система контроля технологических объектов нефтегазовой промышленности на базе беспроводной сенсорной сети. Система построена на основе обобщения в единый комплекс различных аппаратно-программных средств. Распределенная сеть представляет собой беспроводную сенсорную сеть, узлы которой передают информацию в диспетчерский центр посредством таких технологий беспроводной связи, как GSM или ZigBee. В состав сети входит  $n$ -е количество распределенных в пространстве беспроводных модулей, а также шлюз (точка сбора информации), сервер и web-сайт клиента на ЭВМ, которые обеспечивают связь беспроводных модулей с базой данных и клиентскими приложениями, установленными на персональных компьютерах.

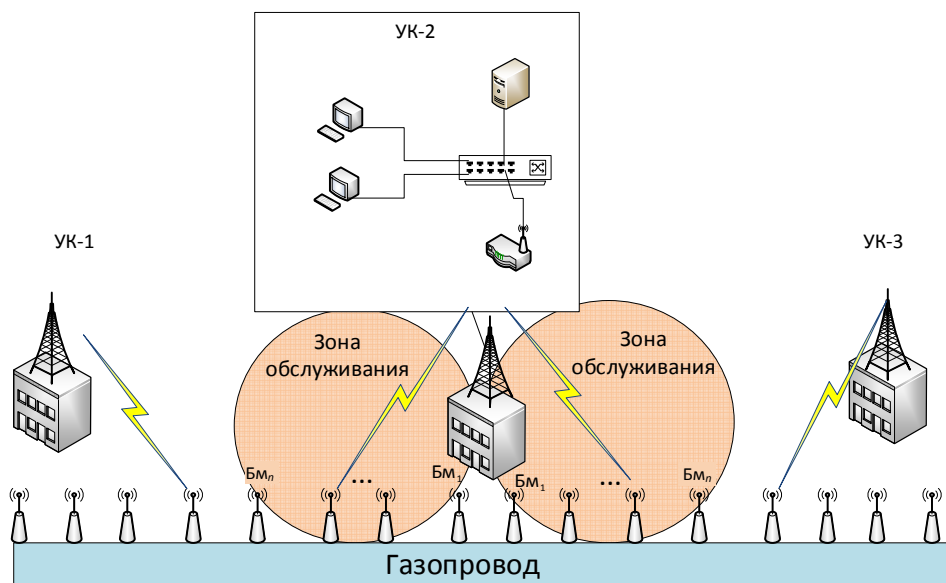


Рис. 2. Обобщенная схема СТС:  
БМ – беспроводной модуль; УК – узел контроля

Сенсорная сеть состоит из нескольких ветвей с  $n$ -м количеством беспроводных модулей, каждая ветвь территориально охватывает половину расстояния (в среднем 50 км) между следующими друг за другом узлами контроля, которые могут быть размещены на компрессорных станциях. Первый беспроводной модуль каждой ветви устанавливается непосредственно вблизи маршрутизатора, с которым он может связаться также по беспроводному каналу связи, в том числе по GSM-каналу [2].

В центре управления и контроля устанавливается программное обеспечение, представляющее собой автоматизированную систему мониторинга, которая состоит из некоторого количества подсистем, реализующих определенные задачи по контролю системы магистральных газопроводов.

Достоинством беспроводной сенсорной системы мониторинга является то, что она обладает высокой мобильностью и может быть установлена в любом труднодоступном месте магистральных газопроводов. Несомненным плюсом является также процесс приема данных в режиме реального времени.

От выбора системы мониторинга зависят варианты взаимодействия шлюза и сервера: локальное подключение к серверу по интерфейсам USB, RS-232, RS-485; удаленное подключение к серверу через модем.

Первый вариант является более простым в применении и предназначается для систем, организующих проводной канал связи между сенсорной сетью сбора данных и сервером. В этом случае сервер можно реализовывать на компрессорных станциях, что обеспечивает точный мониторинг состояния наблюдаемых объектов.

Второй вариант – удаленное подключение к шлюзу по беспроводному каналу связи. В таком варианте оборудование сенсорной сети монтируют вблизи магистральных газопроводов непосредственно на распределенных модулях, а сервер – в любом другом удобном месте (например, в центре принятия решений обслуживающего газотранспортного предприятия). Это обеспечивает возможность эксплуатировать систему мониторинга без какого-либо энергоснабжения. Главным плюсом удаленного доступа к системе является то, что квалифицированным специалистам обеспечивается возможность осуществлять контроль распределенных объектов газотранспортных сетей без периодического выезда и осмотра.

Каждый элемент данной сети имеет автономный источник энергии, приемопередающее устройство и микрокомпьютер. Область покрытия составляет от нескольких метров до десятков и сотен километров и определяется типом беспроводного модуля и антенны, а также за счет ретрансляции пакета данных от одного элемента к другому с учетом топологии сети. Для расширения радиуса действия сенсорной сети между конечными устройствами используются ретрансляторы, позволяющие увеличить дальность работы и качество принимаемого сигнала [3].

### Расчет затухания сигнала беспроводной сенсорной сети

Для расчета затухания сигнала беспроводной сенсорной сети в процессе исследования использовалась модель Окамуры. Данная модель подходит для расчета затухания беспроводной сети в диапазоне частот 2 400–2 483,5 МГц, в котором работает оборудование ZigBee.

Модель позволяет определить затухание сигнала беспроводной сенсорной сети по формуле

$$L = L_{FS} + A(f, d) - H(h_t) - H(h_r) - C, \quad (1)$$

где  $L_{FS}$  – затухание в свободном пространстве;  $A(f, d)$  – затухание в городе относительно затухания в свободном пространстве;  $C$  – фактор затухания для различных типов местности;  $H(h_t)$  – высота антенны передатчика;  $H(h_r)$  – высота антенны приемника.

Так как предполагается, что антенны передатчика и приемника находятся на одной и той же высоте, то формула (1) будет иметь следующий вид:

$$L = L_{FS} + A(f, d) - 2H - C,$$

где  $H(h_t) = H(h_r) = H$ .

Расчет производился для различных значений высоты подъема антенны. Это означает, что при реализации сенсорной сети вдоль магистральных газопроводов можно устанавливать антенну на различной высоте. При расчетах использовалась модель открытого пространства, т. е. учитывалось, что между антеннами узлов сети обеспечиваются условия прямой видимости.

На рис. 3 представлена зависимость затухания сенсорной сети  $L$  от расстояния между датчиками  $d$  при различной высоте подъема антенны  $H$ .

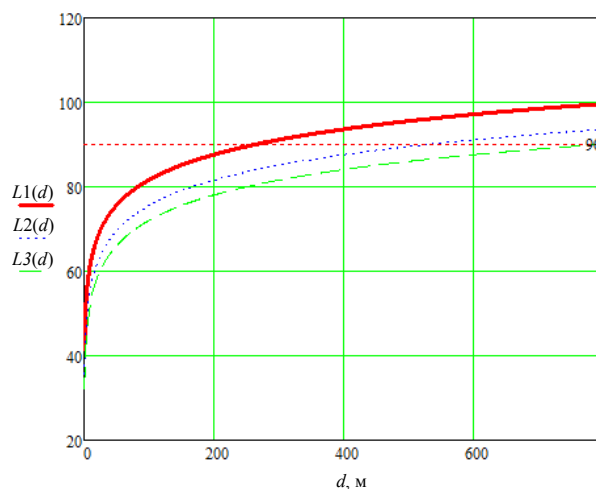


Рис. 3. Зависимость затухания сенсорной сети от расстояния между датчиками при различной высоте подъема антенны:

$L1(d) - H = 1$  м;  $L2(d) - H = 2$  м;  $L3(d) - H = 3$  м

По результатам расчета и исходя из значения чувствительности приемника беспроводного модуля равной 95 дБм можно сделать вывод о том, что для уверенного приема сигналов беспроводного модуля необходимо устанавливать датчики через каждые 200–250 м при высоте подъема антенны 1 м, через каждые 400–450 м при высоте 2 м и через каждые 700–750 м – при высоте подъема 3 м. На рис. 3 обозначен пороговый уровень сигнала – 90 дБм, при котором один беспроводной модуль способен принять сигнал с соседнего беспроводного модуля.

Тогда на 100 км понадобится 500 датчиков при высоте подъема антенны 1 м, 225 датчиков при высоте 2 м и около 145 датчиков при высоте подъема антенны 3 м. Для более объективного мониторинга сенсорной сети возможен вариант установки на одной точке контроля от 2 до 3 датчиков, что позволит повысить надежность сенсорной сети, точность переданных результатов и обеспечит возможность правильно и своевременно отреагировать на внештатную ситуацию.

### **Заключение**

Таким образом, анализ показал, что существующие системы мониторинга, характеризующиеся рядом недостатков, не обеспечивают должного уровня надежности. Оптимальным решением для предприятий газотранспортной отрасли является создание систем контроля и слежения на основе беспроводных систем связи.

В связи с этим предложены варианты построения распределенных систем контроля утечек газа линейных участков магистрали на базе различных технологий беспроводных сенсорных сетей. Выбор варианта зависит от задач, для решения которых строится сеть. Для передачи только телеметрии достаточно использовать модули Zigbee; в случае передачи видеoinформации следует использовать GSM-модули.

Показано, что для расчета затухания сигнала сенсорной сети на базе технологии Zigbee возможно использовать модель Окамуры.

Результаты расчета затухания при разных значениях высоты подъема антенны позволяют оценить количество датчиков, необходимых для построения надежной сенсорной сети.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Сорокин А. А., Дмитриев В. Н., Пищин О. Н. Инфокоммуникационные технологии транспортных магистралей. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2015. 208 с.
2. Бушмелев П. Е., Увайсов С. У., Бушмелева К. И., Плюснин И. И. Повышение качества контроля утечек газа из магистралей газопроводов посредством беспроводной сенсорной телекоммуникационной системы // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». Т. 2. Пенза: ПГУ, 2015. С. 4–8.
3. Фролова А. В., Барабанова Е. А. Сенсорная телекоммуникационная система для мониторинга магистральных продуктопроводов // Наука, образование, инновации: пути развития: материалы Седьмой Всерос. науч.-практ. конф. (16–19 мая 2016 г.). Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2016. С. 98–100.

Статья поступила в редакцию 22.03.2017

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Барабанова Елизавета Александровна** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры связи; ElizavetaAlexB@yandex.ru.

**Мальцев Денис Борисович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры связи; Maltsevdb@mail.ru.

**Есауленко Владимир Николаевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры автоматизации и управления; v.esaulenko@astu.org.

**Руденко Михаил Фёдорович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности и гидромеханики; rudenko@astu.org.



E. A. Barabanova, D. B. Maltsev, V. N. Esaulenko, M. F. Rudenko

## DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL OBJECTS OIL AND GAS INDUSTRY ON THE BASIS OF WIRELESS SENSOR NETWORK

**Abstract.** The article deals with the distributed system of control over technological objects in oil and gas industry based on a wireless sensor network. There was carried out the study of existing monitoring systems. It should be pointed out that these systems do not provide the required level of reliability. The article presents principles of designing the structure of sensor telecommunicating system, which is an optimal variant for enterprises of gas transportation system. There are proposed variants of constructing distributed systems for monitoring gas leaks on linear sections of gas main, which are based on wireless sensor network technologies. The authors consider a sensor network based on ZigBee technology. To calculate the attenuation of the sensor network signal at different height of the antenna, there was applied the Okumura model which allowed estimating the number of sensors necessary for building a reliable sensor network.

**Key words:** main gas pipeline, sensor, wireless sensor network, signal attenuation, antenna, distributed control system.

### REFERENCES

1. Sorokin A. A., Dmitriev V. N., Pishchin O. N. *Infokommunikatsionnye tekhnologii transportnykh magistralей* [Infocommunicational technologies of transport routes]. Astrakhan, Izd-vo AGTU, 2015. 208 p.
2. Bushmelev P. E. Uvaisov S. U., Bushmeleva K. I., Plusnin I. I. *Povyshenie kachestva kontrolya utechek gaza iz magistralей gazoprovodov posredstvom besprovodnoi sensornoi telekommunikatsionnoi sistemy* [Increasing the control over gas leaks from gas pipelines by means of the sensor telecommunicating system]. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo». Vol. 2* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and quality"]. Penza, PGU, 2015. P. 4-8.
3. Frolova A. V., Barabanova E. A. *Sensornaya telekommunikatsionnaya sistema dlia monitoringa magistral'nykh produktoprovodov* [Sensor telecommunicating system for monitoring main pipeline routes]. *Nauka, obrazovanie, innovatsii: puti razvitiia: materialy Sed'moi Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (16–19 maia 2016 g.)* [Science, education, innovations: ways of development: materials of VII all-Russia scientific-practical conference (may 16-19, 2016)]. Petropavlovsk-Kamchatsky: KamchatGTU, 2016. P. 98-100.

The article submitted to the editors 22.03.2017

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Barabanova Elizaveta Aleksandrovna** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Communication; ElizavetaAlexB@yandex.ru.

**Maltsev Denis Borisovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Communication; Maltsevdb@mail.ru.

**Esaulenko Vladimir Nikolayevich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Automation and Control; v.esaulenko@astu.org.

**Rudenko Mikhail Fedorovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Life Security and Hydromechanics; rudenko@astu.org.

