

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ СКРЫТЫХ УТЕЧЕК  
НА ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ  
СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. МИНСКА**

*Э. И. Михневич<sup>1</sup>, Е. И. Ермакович<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,  
ed\_mik\_bia@tut.by

<sup>2</sup>Инженер-технолог УП «Минскводоканал», Минск, Республика Беларусь,  
ermakovich.evgen@mail.ru

**Аннотация**

Описан опыт применения акустического, корреляционно-акустического и телеробототехнического методов диагностики трубопроводов, которые являются основой мониторинга эксплуатируемых УП «Минскводоканал» водопроводных сетей на поиск скрытых утечек и позволяют с достаточной точностью определять потери воды на исследуемых участках сети.

**Ключевые слова:** водопроводные сети, методы диагностики, акустические приборы, телевизионные роботы.

**METHODS FOR DIAGNOSIS OF HIDDEN LEAKS IN THE WATER  
NETWORK OF THE WATER SUPPLY SYSTEM MINSK**

*E. I. Mikhnevich<sup>1</sup>, E. I. Ermakovich<sup>2</sup>*

**Abstract**

The experience of using acoustic, correlation-acoustic and telerobotic methods of pipeline diagnostics is described, which are the basis for monitoring water supply networks operated by the Minskvodokanal Unitary Enterprise to search for hidden leaks and allow one to determine with sufficient accuracy water losses in the studied sections of the network.

**Keywords:** water supply networks, diagnostic methods, acoustic devices, television robots.

**Введение.** Основной целью служб, эксплуатирующих водопроводные сети, является повышение качества и надежности водоснабжения потребителей. Для достижения поставленной цели очень важным является снижение количества повреждений на водопроводной сети города и уменьшение затрат на ремонтные работы. В связи с этим возрастает роль диагностики и профилактики водопроводной сети. Основой такой диагностики, направленной на выявление аварийного участка на ранней стадии, является мониторинг водопроводной сети. Целью комплекса работ, проводимых с помощью систем мониторинга водопроводной сети, является обнаружение скрытых утечек - потерь воды, не проявля-

ющихся выходом на поверхность или подтоплением различных подземных коммуникаций и сооружений, что определяет трудность их нахождения, при этом приводящих к значительным потерям воды.

**Методы диагностики.** В настоящее время существует целый ряд различных методов поиска утечек воды: гидравлические (визуальный контроль уровня воды в гидрантах при закрытии участка сети; анализ манометрической съёмки); акустический и корреляционно-акустический; телеробототехнический и др.[1,2,3].

Существенным недостатком гидравлических методов является необходимость отключения участков сети трубопровода, что делает эти методы не оперативными и трудоёмкими в исполнении.

Более точными, позволяющими установить не только факт наличия, но и место утечки, являются акустические методы [1,2]. При этом задачи нахождения утечек из водопроводов решаются путем локализации места наибольшей интенсивности акустического «шума», появляющегося при резком изменении давления жидкости в месте повреждения трубопровода. Чем больше разница давлений внутри трубопровода и вне его, тем больше интенсивность звуковых колебаний. Метод акустического нахождения мест повреждений трубопровода разделяется на 2 способа: акустический и корреляционно-акустический.

При акустическом способе находится место наибольшей величины колебаний на поверхности земли, связанных с утечкой. Колебания грунта преобразуются датчиками сейсмического типа в электрический ток, который затем усиливается, фильтруется от посторонних шумов и его значение отображается на дисплее. Кроме этого, усиленный электрический ток преобразуется в звуковые колебания в головных наушниках.

При корреляционно-акустическом методе устанавливаются 2 датчика сейсмического типа с обеих сторон поврежденного трубопровода с помощью магнитов. Колебания стенок трубы преобразуются в электрический ток, усиливаются, фильтруются от промышленных помех и излучаются передающими устройствами, процессор вычисляет расстояние от датчика до места повреждения.

При первом способе необходимо точно знать местоположение трубопровода и обладать прибором с максимальной чувствительностью к колебаниям грунта. При втором - длину участка трубопровода, диаметр, материал стенок трубы и иметь прибор, обладающий максимальной чувствительностью и помехозащищенностью к внешним шумам. Основным недостатком акустического метода является обнаружение всех шумов, что иногда не позволяет отличить шум утечки от постороннего шума. Вместе с тем, более точный и более эффективный корреляционный метод в определённых случаях (полиэтиленовые трубы, резиновые уплотнения раструбов труб) не указывает повреждения. И, наконец, при работе с малыми уровнями утечек или с большими длинами участков трубопроводов величина уровня шума может

быть меньше порога чувствительности и акустического и корреляционного приборов.

Таким образом, в настоящее время не существует универсального метода поиска утечки, позволяющего определить потерю воды на трубопроводе из любого материала, поэтому только комплексное использование нескольких методов позволяет точно и быстро определять место утечки. Именно такой подход при оперативной работе по поиску утечек воды осуществляется в УП «Минскводоканал», где для этих целей применяют, главным образом, акустические приборы и телевизионные роботы. Эти методы являются основой мониторинга водопроводных сетей на предмет поиска скрытых утечек и позволяют с достаточной точностью определять потери воды на широком участке сети без его отключения. В производстве «Минскводопровод» мониторинг осуществляется, главным образом, с помощью системы поиска утечек Phocus.Sms и Phocus 3 и при необходимости корректируется системами: Enigma, Eureka3 и Micron3. Принцип работы этих систем основан на постоянном сборе информации об утечках в трубопроводах с помощью акустических датчиков-регистраторов (логгеров). При утечке вытекающая вода создает шумы (звуковые сигналы), которые фиксируются логгерами. Шум утечки постоянен, однако днем из-за высокого уровня помех (интенсивности уличного движения, высокого потребления воды) прослушивание не производится. Акустические датчики – регистраторы программируются таким образом, чтобы шумы утечек записывались ночью (обычно в 2:00; 03:00 и 4:00 ч).

Регистратор системы Phocus.Sms тестирует шум трубы с интервалом в одну секунду в течение каждого из трех периодов в течение ночи, когда внешние шумы наименьшие. Он выполняет статистический анализ каждого из трех периодов и если утечка обнаружена, регистратор посылает сигнал тревоги при помощи sms-сообщения. Сообщение содержит информацию о наименьшем измеренном (критическом) значении шума. Это значение показывает, как близко к утечке расположен регистратор. Дополнительно регистратор передает ежемесячный отчет о «состоянии бортовых систем». Этот отчет содержит график значений зафиксированных шумов и соответственно утечек за прошедший месяц, что позволяет отслеживать акустическую ситуацию в водораспределительной сети. Система состоит из регистраторов уровня шума, GSM-модема и компьютера со специализированным программным обеспечением.

Регистратор Phocus.Sms (рисунок 1) представляет собой цилиндр, высотой 135 мм и диаметром 59 мм. В основании цилиндра установлен магнит, который позволяет легко крепить регистратор на металлических предметах. На верхней части цилиндра расположено оптическое окно и два светодиода. Каждый регистратор снабжен встроенной батареей, которая обеспечивает работу регистратора в течение 5 лет.

Регистраторы устанавливаются на расстоянии не более 200 м друг от друга на стальных и чугунных трубопроводах. На пластмассовых трубах максимальное расстояние значительно уменьшается (обычно не более 50 м).

На каждый километр сети трубопроводов количество регистраторов выбирается в зависимости отряда параметров: напора, материала, из которого изготовлена труба и ее диаметра, наличия ответвлений. Чем выше уровень посторонних постоянных шумов (например, поблизости находятся метро, вокзал, повысительные насосные станции и т. д.), тем количество регистраторов увеличивается на исследуемом участке трубопровода.



**Рисунок 1** – Регистратор Phocus.Sms

Датчики-регистраторы при наличии подозрения на утечку после анализа ночных замеров, высылают предупреждение на компьютер и на телефон оператора. Через интерфейс программного обеспечения можно просмотреть результаты работы всей группы регистраторов.

Phocus3 – это регистратор данных с расширенными характеристиками, предназначенный для детектирования и локализации утечек воды. Беспроводная радиосвязь допускают возможность, как ручного периодического, так и постоянного контроля работы водопроводных сетей. Данные перегружаются локально в модуль связи. Затем выполняется детальный анализ данных с помощью программы в главном ПК. Принцип работы системы поиска утечек Phocus 3 похож на работу системы поиска утечек Phocus.sms. Преимуществом системы Phocus 3 являются: небольшой размер регистраторов; отображение на дисплее гистограммы данных по шуму; алгоритм обработки сигналов шума для снижения доли необнаруженных утечек; сохранение GPS-координат в регистраторе, возможность прослушивания утечек, как в реальном масштабе времени, находясь на объекте, так и регистрация данных с помощью удаленной идентификации утечек. При записи Phocus3 регистрирует 10-ти секундные "звуковые" снимки каждой ночью. Этот звуковой файл можно передать в модуль связи и ПК для прослушивания.

Программное обеспечение, установленное на ПК для обработки и анализа полученных данных, имеет очень удобный и многофункциональный интерфейс. Имеются два способа просмотра данных в программе для ПК: таб-

лица данных (DataTable) и карта (Map). Обе эти опции обеспечивают доступ к данным гистограммы шума.

**Корреляционно-акустический метод.** По результатам обследования логгерами системы поиска утечек Phocus.sms и Phocus 3 для определения точного места повреждения водопроводная сеть в районе, где был установлен сработавший логгер, обследуется корреляционным течеискателем Eureka 3 или системой поиска утечек Enigma и далее уточняется акустическим течеискателем MicronSystem.

Корреляционные течеискатели работают путем сравнения шума в двух различных точках на трубе. Шум распространяется от места утечки в обоих направлениях вдоль трубы с постоянной скоростью. Датчики расположены в точках А и С (рисунок 2). Через какое-то время шум утечки достигнет датчика А, и за это же время этот шум распространяясь в направлении датчика С, дойдет только до некоторой точки утечки Х. Расстояние от точки Х до датчика С создает задержку времени  $t$  прихода шума к датчику С. Если скорость звука  $v$ , а расстояние между датчиками  $D$ , то расстояние  $L$  от ближайшего датчика до места утечек можно определить по формуле:

$$L = \frac{D - (vt)}{2} \quad (1)$$

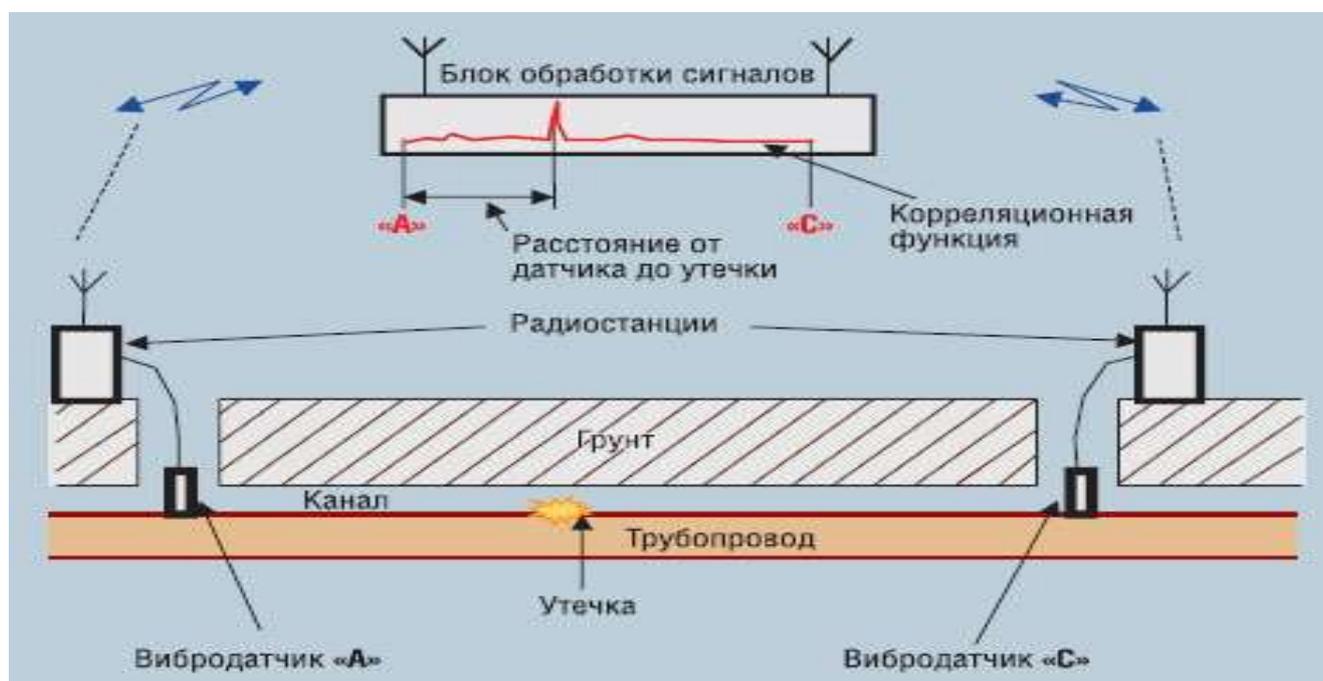


Рисунок 2 – Схема работы корреляционного метода

Перед выполнением работ по корреляции в блок управления вносятся данные об обследуемом участке трубопровода. После ввода всех необходимых данных запускается процесс корреляции. Процесс корреляции может продолжаться максимум 5 минут. Весь процесс корреляции мы можем наблюдать на

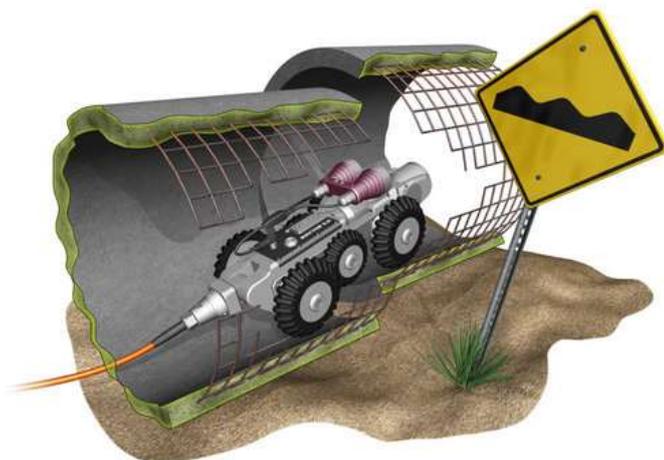
экране онлайн и можем по ходу корреляции применять различные фильтры, прослушивать звук, а также подавлять мешающий шум. По окончании процесса мы видим на экране расстояние предполагаемой утечки к ближайшему датчику. Отчёт о выполненных замерах мы можем сохранить в память блока.

Кроме корреляционного течеискателя Eureka3 в производстве «Минскводопровод» для локализации мест скрытых повреждений используется система поиска утечек Enigma. Enigma – это компактная система обнаружения и определения местоположения утечек в подземном водопроводе. Последние достижения в области цифровых акустических технологий позволили объединить запись шума (обнаружение утечки) и его корреляцию (определение местоположения утечки) в одну простую операцию. Шум фиксируется системой регистраторов Enigma, которая разворачивается, как правило, на трубопроводах, запорной арматуре и гидрантах в конце дня. После считывания записей с регистраторов звуковые файлы анализируются программой, и выявляется местонахождение источников шума.

Enigma не имеет радиоканала и проводов, а, значит, нет потери информации, которая снимается с трубы. Результатом является высокая эффективность обнаружения утечек. Течеискатель состоит из 8 герметичных датчиков, которые установлены в водонепроницаемом кейсе. Enigma осуществляет связь с ПК при помощи оптронной связи, что резко увеличило скорость считывания информации.. Так же к преимуществам системы можно отнести, что корреляция выполняется одновременно восемью регистраторами, что даёт возможность обнаружения сразу нескольких скрытых повреждений за один сеанс.

Для уточнения мест скрытых повреждений перед раскопкой в УП «Минскводоканал» используется также акустический течеискатель MikronSystem, который предназначен для оптимального точного определения утечек и их подтверждения. Сочетание чувствительных датчиков с электронной обработкой низких шумов обеспечивают превосходные акустические параметры. Электронный датчик и поверхностный микрофон, сочетающие в себе сенсорные технологии, позволяют определять шум утечки вне пределов слышимости человеческого уха.

**Телеинспекция трубопроводов.** Телевизионные роботы представляют собой перемещающиеся внутри трубопровода транспортные модули на колесном, гусеничном ходу, салазках или плавающие [2,3,4]. Они управляются по кабелю длиной до 500 м. Аппаратура управления и пост оператора находятся в специальном микроавтобусе. Телероботы способны осуществлять сбор данных о состоянии трубопровода и передачу изображения с камеры на видеомонитор, отображать и сохранять фото- и видеоизображение внутренней поверхности трубопровода (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Телеробот внутри трубопровода

Телеинспекция позволяет обнаружить небольшие трещины, течи, деформацию, засоры и посторонние предметы, установить причину снижения пропускной способности, определить точное местоположение и характер дефекта, определить состояние трубопровода для принятия решения о локальном ремонте, санации или о замене участка трубопровода.

Наряду с диагностической функцией имеются роботы, которые могут использоваться для местного ремонта участков подземных трубопроводов диаметром от 150 до 800 мм. Они комплектуются специальным оборудованием (фрезерной, заделочной, бандажной и другими головками) и цветной камерой [2,4].

Работы по телеинспекции трубопроводов с внутренним диаметром 100–150 мм и более в УП «Минскводоканал» выполняются при помощи специализированного автомобиля телеинспекции, укомплектованного комплексом оборудования ИВАК (модификации: ИВАКТ66, ИВАКТ76, ИВАКРАНОРАМО2).

Длина обследуемого участка до 500 м. Робототехнический комплекс состоит из следующих основных элементов: поста управления, самоходной тележки с роботом, барабана с кабелем. ИВАКТ76 – это управляемый комплекс с камерой для осмотра трубопроводов диаметром 150 мм и выше, оснащенный функцией электронной стабилизации.



**Рисунок 4** – Общий вид модуля ИВАКРАНОРАМО2

Наиболее информативным является транспортный (самоходный) модуль ИВАКРАНОРАМО2, который может свободно перемещаться по трубопроводу без ограничений, останавливаясь в любом положении. Все объекты, такие как смещенные стыки, выступающие соединения труб, можно детально рассмотреть со всех сторон. ИВАКРАНОРАМО2 оснащен двумя цифровыми камерами высокого разрешения спереди и сзади с 185-градусным объективом «рыбий глаз», который может делать снимки с интервалом в 5 см. Данные, полученные в разрезе трубы, отправляются на компьютерный блок управления в специализированном автомобиле, а программное обеспечение РАНОРАМО создает полное 3D-изображение трубы. В процессе работы он создает вспышку с непрерывной подсветкой, что позволяет трубе быть хорошо освещенной, а камера захватывает высокоточные кадры по мере движения, создавая четкое изображение. Ксеноновая вспышка отражает лампу с постоянной яркостью. Общий вид ИВАКРАНОРАМО2 приведен на рисунке 4.

Для обследования трубопроводов большого диаметра (500 мм и более) эффективно использование плавающего модуля ИВАКАРГО2 (рисунок 5). Одной из главных особенностей плавающего модуля является высокая проходимость в трубах, где много посторонних предметов.

Несмотря на высокую информативность, недостатком метода телеинспекции является необходимость приостановки подачи воды и вырезка в трубопроводе (или снятие задвижки) для ввода телероботов.



Рисунок 5 – Плавающий модуль ИВАКАРГО2

**Заключение.** Для диагностики водопроводной сети широко используются акустический, корреляционно-акустический и телеробототехнический методы. Надежное определение мест повреждений трубопроводов достигается комбинацией указанных методов. На основе применения акустических приборов и телевизионных роботов различной модификации в УП «Минскводоканал» создан мониторинг водопроводных сетей на предмет поиска скрытых утечек, который позволяют с достаточной точностью определять потери воды на широком участке сети без его отключения, что в свою очередь позволяет производить своевременный ремонт трубопроводов, на которых возникает утечка, и сократить неучтенные расходы воды в системе водоснабжения г. Минска.

### Список цитированных источников

1. Михневич, Э. И. Водопроводные сети: учебное пособие / Э. И. Михневич, С.В. Андреюк. – Минск: ИВЦ Минфина, 2021. – 156 с.
2. Орлов, В. А. Водоснабжение: учебник / В.А. Орлов, Л.А. Квитка.–М.: ИНФРА-М, 2017. – 441 с.
3. Орлов В.А. Строительство, реконструкция и ремонт водопроводных и водоотводящих сетей бестраншейными методами / В.А. Орлов, Е.В. Орлов. –М.: ИНФРА, 2007.
4. Храменков, С.В. Стратегия модернизации водопроводной сети / С.В. Храменков. – М.: Стройиздат, 2005. – 398 с.

УДК 556.18 + 626/627

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. АЛУШТАЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА *И. В.Николенко<sup>1</sup>, Н. С. Мельникова<sup>2</sup>, Э. А Каримов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Профессор, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», Институт «Академия строительства и архитектуры», Симферополь, Россия, nikoshi@mail.ru

<sup>2</sup>Аспирант кафедры водоснабжения, водоотведения и санитарной техники института «Академии строительства и архитектуры ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»»

<sup>3</sup>Директор Симферопольского филиала ГБУ РК «Крымское управление водного хозяйства и мелиорации»

### Аннотация

В статье рассматривается понятие устойчивости в контексте систем водоснабжения. Оцениваются различные аспекты устойчивости, такие как качество воды, доступность водных ресурсов и способность системы противостоять различным видам воздействия. На примере разработанной модели определения устойчивости выявлены характеристики, на основе которых можно описать режимы функционирования системы, с выделением устойчивых или неустойчивых состояний. Выполнен анализ годового баланса Изобильненского водохранилища естественного стока Республики Крым, которое является источником водоснабжения г. Алушта. Проанализирована степень наполнения Изобильненского водохранилища за 2020-2022 гг. и определены значимые факторы, определяющим устойчивостью системы водоснабжения г. Алушта Южного берега Крыма .

**Ключевые слова:** устойчивость, антропогенное воздействие, водохранилище, система водоснабжения, приток.