

В.В. Коннов

(Научно-производственный центр "Молния", г. Москва; e-mail:molkon@bk.ru)

ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ВИДЕОТЕПЛОВИЗИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГАЗОПРОВОДОВ

Приводятся результаты исследования видеотепловизионного метода контроля газопроводов с применением малой авиации.

Ключевые слова: газопровод, утечки, видеотепловизионный метод, мониторинг.

V.V. Konnov

EQUIPMENT AND TECHNOLOGY FOR REMOTE DIAGNOSTICS OF GAS PIPELINES UNDER COMBINED THERMAL IMAGING AND VISUAL INSPECTION METHOD

The results of study of the combined thermal-imaging and visual inspection method of testing gas pipeline using small aircrafts are presented.

Key words: gas pipeline, leaks, thermal-imaging and visual method, monitoring.

Введение

В России создана и продолжает развиваться крупнейшая в мире система газоснабжения, в состав которой входят около 160 *тыс. км магистральных газопроводов (МГ)* и их отводов. По причине износа труб (более трети из них находятся в эксплуатации свыше 30 лет) происходят десятки аварий в год с выходом газа в атмосферу и, по мнению экспертов, их число может возрасти. Утечка газа является причиной серьёзных аварий – взрывов высвободившегося газа и разрывов трубопровода, сопровождающихся пожарами, повреждением сооружений, материальных ценностей, потерей огромных объёмов углеводородного сырья, негативным воздействием на окружающую среду и гибелью людей. Известны случаи аварий и катастроф, связанных с взрывами газопроводов в результате утечки газа из-за возникновения дефектов труб и другого оборудования, их повреждений в процессе хозяйственной деятельности и террористических акций. Возникновение утечек приводит к загрязнению атмосферы такими газами, как метан, пропан и другими. В связи с этим задача разработки методов, средств и технологий обеспечения техносферной безопасности при эксплуатации МГ имеет приоритетное значение.

Для своевременного обнаружения утечек, их локализации и общей оценки состояния газопроводов используются методы *наземной диагностики* с использованием газоанализаторов и ряд *дистанционных методов* мониторинга, таких как фото- и видеонаблюдение, а также тепловизионное, радиолокационное и лазерное зондирование [1-4].

Специалистами НПЦ "Молния" выполнены исследования и разработаны метод, оборудование и технологии **видеотепловизионного контроля (ВТК)** с целью обнаружения, распознавания и локализации мест утечек с размещением оборудования на вертолётах, **летательных аппаратах (ЛА)** малой авиации (дельталётах, беспилотных ЛА) и др.

Состояние проблемы обнаружения утечек газа из газопроводов

Вопросам диагностики МГ и **газопроводов-отводов (ГПО)**, в том числе обнаружения утечки газа, уделяется серьёзное внимание как исследователями и создателями систем технической диагностики, так и специалистами, обеспечивающими строительство и эксплуатацию газопроводов. Для решения этой проблемы применяются наземный и воздушный мониторинг с использованием акустических, ультразвуковых, лазерных и гелиевых течеискателей и детекторов утечки газов, газоанализаторов и **инфракрасных (ИК)** систем для **дистанционного обнаружения утечки газов** из наземных и подземных газопроводов. Основным методом обнаружения мест утечек в настоящее время является патрулирование газопроводов с применением **переносных газоанализаторов**. Этот метод связан с большими трудозатратами и отличается невысокой оперативностью. Более оперативным является **авиационное патрулирование**, включая использование беспилотных ЛА, оснащенных газоанализаторами или лидами, производящими **взятие проб воздуха или локацию газового облака** в районе предполагаемой утечки. Метод отличается низкой точностью определения местоположения утечки из-за возможного ветрового сноса облака газа. Перспективными представляются воздушные методы обнаружения утечек, основанные на анализе **тепловых изображений земной поверхности** в районе залегания трубопроводов тепловизорами.

В работе [5] представлен анализ новых методов расчёта проявления утечек газа из трубопровода в тепловом поле излучения земной поверхности. Показано, что даже малые трещины в трубах приводят к появлению на поверхности грунта **тепловых аномалий**, позволяющих локализовать место утечки беспилотным ЛА с установленным на борту ИК радиометром. Показано, что трещины в трубах размерами $(1 \times 0,1) \text{ мм}^2$ могут приводить к появлению на поверхности грунта тепловых аномалий с температурным контрастом более 10°C при размерах пятна порядка 10 м^2 .

В работе [3] выполнены исследования метода дистанционного зондирования **линейной части магистрального газопровода (ЛЧ МГ)**, разработано и испытано устройство дистанционного зондирования с применением лазерных локаторов для системы управления техническим состоянием ЛЧ МГ на основе измерения и оценки концентрации метана. Автором разработаны аппаратно-программный комплекс и методика дистанционного мониторинга ЛЧ МГ на основе измерения и оценки концентрации метана.

Для обнаружения утечек и их локализации компанией "Пергам" был предложен комплекс лазерно-тепловизионного контроля [4], представляющий собой вертолетную многофункциональную систему патрулирования трубопроводов. Принцип работы детектора утечки газа основан на диодно-лазерной спектроскопии, обеспечивающей, по мнению авторов, высокую надёжность, точность и селективность. Однако большинство предлагаемых на зарубежных и российском рынках подобного рода комплексов не имеют возможности автономного питания и установки на лёгкие и сверхлёгкие ЛА и обладают высокой стоимостью, в связи с чем их использование при обследовании малопротяжённых ГПО экономически неэффективно.

Физические основы видеотепловизионного контроля утечки газа

Основными признаками утечек газа являются *изменения температуры почвы* в местах средних и сильных утечек, наблюдаемые в ИК диапазоне излучения, и изменения в растительном покрове, наблюдаемые в видимом диапазоне излучения.

Локальное понижение температуры наблюдается в области выхода газа при его дросселировании к поверхности земли, так как при адиабатическом понижении давления газ охлаждает почву в зоне утечки (эффект Джоуля-Томсона). Величина температурной аномалии определяется состоянием газа при фильтрации через почву и внешними условиями, влияющими на обмен теплом между поверхностью земли и атмосферой. Количественно этот эффект характеризуется дифференциальным коэффициентом Джоуля-Томсона μ , который определяется отношением изменения температуры газа ΔT к вызвавшему его изменению давления Δp :

$$\mu = \Delta T / \Delta p. \quad (1)$$

Если давление газа меньше 10-20 МПа, то

$$\mu = (1/C_p)(2a/RT - b), \quad (2)$$

где a и b – постоянные из уравнения Ван-дер-Ваальса для реальных газов $(p + (a/V^2))(V - b) = RT$;

R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/моль);

C_p – молярная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(моль·К);

T – абсолютная температура, К;

V – объём газа, м³;

p – давление, Па.

В работе [5] в предположении, что грунт представляет собой однородную пористую среду и что скорость фильтрации газа через эту среду много меньше скорости звука во всей области течения, предложено решение задачи расчёта температурных аномалий при фильтрации природного газа через слой почвы.

В этих предположениях фильтрационный поток газа из трещины через слой почвы $\vec{J}$ определяется законом Дарси:

$$\vec{J} = \rho \vec{V} = (kv) \text{grad } P = (k\rho/\mu) \text{grad } P, \quad (3)$$

где P – давление;

v – кинематическая вязкость;

μ – динамическая вязкость;

ρ – плотность газа;

V – фильтрационная скорость течения;

k – проницаемость среды.

Скорость фильтрации определяется как расход газа через единичное сечение, отнесённый к этому сечению. Поток газа $\vec{J}$ должен удовлетворять уравнению непрерывности, которое для стационарного случая имеет вид

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = \text{div}(\vec{J}) = 0. \quad (4)$$

Вместе с уравнением (3) это соотношение позволило получить уравнение для давления газа [5]

$$\text{div}((k/\mu)\rho(P,T)\text{grad } P) = 0. \quad (5)$$

Температура грунта должна удовлетворять уравнению сохранения энергии с учётом обмена с газом:

$$\text{div}(k_s \text{grad } T_s) = -J \text{grad}(C_p(T_s - T_a)). \quad (6)$$

В этих уравнениях используются обозначения:

T_s – температура грунта;

T_a – температура газа, подверженного адиабатическому (без теплообмена с пористой средой) процессу Джоуля-Томсона.

Скорость фильтрации на поверхности почвы при расходах газа через трещину, классифицируемых как малые утечки (0,3 кг/с), составляет $5 \cdot 10^{-2}$ м/с. При средних (3 кг/с) и больших (30 кг/с) утечках скорость фильтрации будет соответственно на порядок и на два порядка больше указанной величины. Решению рассматриваемой задачи посвящён ряд работ других авторов. Выполненные нами расчёты подтвердили полученные результаты.

Приборный комплекс ВТК-1

Опыт работы НПЦ "Молния" показал, что для своевременного определения утечек, их локализации и общей оценки состояния газопроводов наиболее приемлем метод ВТК, отличающийся простотой и оперативностью применения.

На базе выполненных исследований в НПЦ "Молния" создан приборный комплекс – ВТК-1 (рис. 1), в котором тепловизионное изображение создаётся одновременно с видеоизображением. В его состав входят тепловизор ThermaCAM E2, видеокамера NV-GS15, GPS-навигатор GARMIN GPSMAP 276C, выносной дисплей оператора, блок памяти и монитор Prology HDTV-7075. Комплекс содержит источник автономного питания и обеспечивает автоматическую регистрацию результатов обследования.

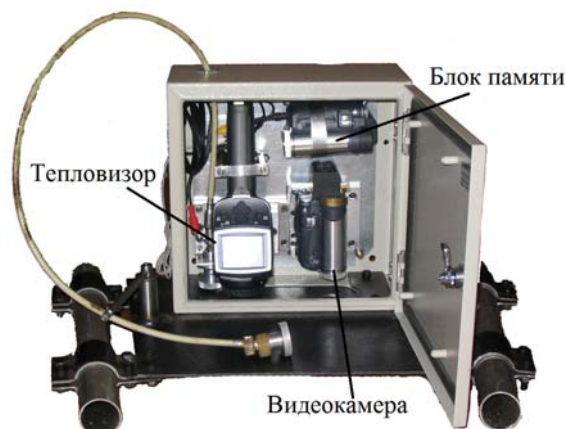


Рис. 1. Общий вид приборного комплекса ВТК-1

Для исключения воздействия на аппаратуру вибраций при полете и посадке аппаратура комплекса размещается в корпусе, изготовленном в виброзащищенном исполнении. Универсальность конструкции корпуса обеспечивает его крепление к различным типам носителей – вертолётам, дельталётам и др. (рис. 2). Комплекс ВТК-1 обеспечивает измерение температуры поверхности почвы (если трубопровод расположен под землёй) или соответственно поверхности трубы (если трубопровод надземный), размер и координаты температурных аномалий.



Рис. 2. Приборный комплекс ВТК-1 на несущих летательных аппаратах:
а – вертолёт Ми-4; б – вертолёт Robinson; в – дельталёт "Форсаж"

Условия эксплуатации комплекса: температура окружающей среды от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, влажность воздуха до 100 %, скорость полёта 50-120 км/ч, давление 760 ± 40 мм рт. столба, высота полёта 55-200 м.

Технические характеристики средств наблюдения: угол поля зрения 25-40°; погрешность измерения температуры не хуже 2 °С; быстродействие тепловизора – 25 кадров в секунду, видеокамеры – 50 кадров в секунду; пространственное разрешение ~ 10'; спектральный диапазон ИК фотоприемника 8-14 мкм, потребляемая мощность не более 100 Вт, габариты комплекса 300×500×200 мм, масса ~ 8 кг.

Для проверки тепловизора применяются специальные контрольные образцы, для видеокамер – стандартные штриховые тесты или люксметры. Комплекс обеспечивает непрерывную запись видео и тепловых изображений на цифровой носитель блока памяти в течение не менее 2-х часов, имеет каналы передачи данных Firewire, IEEE-1394 или USB.

В связи с тем, что контроль ГПО (их средняя протяженность составляет от 10 до 50 км) с использованием вертолёта невыгоден с экономической точки зрения, так как час полета на вертолёте без аппаратуры стоит 30 тыс. рублей, а средняя стоимость часа полёта дельталёта составляет 3 тыс. рублей, сопоставив технические характеристики различных ЛА и моделей дельталётов, а также учитывая факторы экономичности эксплуатации, специалисты НПЦ "Молния" остановили выбор в качестве основного несущего ЛА на дельталёте "Форсаж" отечественной компании "Воздушный мост" (<http://www.3dway.ru/Equipment/RTE-Forsazh-1-main.html>).

Дельталёт "Форсаж" относится к классу сверхлёгких моторных ЛА с балансирующим управлением и состоит из следующих основных частей – крыла "Атлет" (площадь крыла – 16,5 м², размах крыла – 10,14 м), винтомоторной установки (двигатель SUZUKI G-13BB, 4-тактный, максимальная мощность 100 л.с., воздушный винт R-102 компании "LugaProp" с 3 лопастями) и мототележки, в состав которой входит приборное оборудование, средства спасения, лыжное шасси, поплавковое шасси. Максимальный взлётный вес дельталёта – 500 кг, максимальная скорость – 125 км/ч, минимальная скорость – 55 км/ч, длина разбега – 90 м. Назначенный ресурс дельталёта – 3 тыс. лётных часов, календарный срок службы – 25 лет.

Мототележка (рис. 3) предназначена для размещения экипажа, силовой установки, оборудования и багажа. На дельталёте установлена быстродействующая парашютная система спасения ЛА массой до 500 кг – БПС-КОБРА-500. Система предназначена для спасения экипажа вместе с дельталётом при возникновении в полёте аварийной ситуации.

Приборное оборудование дельталёта включает в себя оборудование контроля параметров полёта и параметров работы двигателя, навигационное, коммуникационное и связное оборудование. На дельталёте предусмотрена установка спутниковых навигационных систем Garmin GPS-276 и Garmin GPS-296.



Рис. 3. Мототележка

Достоинством использования в качестве несущего ЛА дельталёта является удобство в эксплуатации (простота транспортировки, скорость сборки, неприхотливость требований к взлётно-посадочной полосе, возможность неоднократного пролёта над газопроводом на различных высотах), экономичность, компактность, высокая оперативность, наличие системы спасения экипажа и самого дельталёта и возможность выбора скорости полёта с учётом оптимизации работы ВТК-1. Сбор, обработка и регистрация результатов мониторинга обеспечивается блоком памяти под управлением специальной программы.

Технология видеотепловизионного обследования газопроводов с применением ЛА

Важным элементом обследования газопроводов является предполетная подготовка приборного комплекса ВТК-1 и ЛА, требования к которой содержатся в соответствующих документах и подлежат неукоснительному исполнению. Полет над обследуемым участком газопровода осуществляется в прямом и обратном направлениях. Это обеспечивает возвращение дельталёта в исходную точку полёта и повышает надёжность результатов. Параметры полёта автоматически записываются в память компьютера и дополнительно расшифровываются оператором на земле при совмещении кадров видеотепловизионной съемки. Полет осуществляется с использованием GPS-навигатора, привязывающего обнаруженные аномалии к местности. По результатам диагностирования назначается *шурфовое обследование* для подтверждения наличия утечки в газопроводах и их ликвидации.

Результаты видеотепловизионного обследования сопоставляют с результатами наземного диагностического обследования газопроводов электрометрическим и магнитометрическим методами и уточняют исследованиями состояния изоляционного покрытия и металла газопровода в шурфах. Видеотепловизионный мониторинг следует проводить в погодных условиях, обеспечивающих максимальный тепловой контраст, при дальности видимости не менее 1000 м. Основные рекомендуемые параметры обследования: скорость полёта – 80-120 км/час, высота полёта – 50-200 м, скорость ветра не более 6-10 м/с.

Расшифровку результатов визуального и тепловизионного цифрового обследования производят специалисты в лабораторных условиях при анализе видео- и ИК изображений на дисплее компьютера. При этом оператор может применять процедуры компьютерной обработки изображения, повышающие контрастность тепловых и оптических аномалий на трассе для их количественной оценки. Для повышения достоверности обнаружения, классификации и распознавания оптических и тепловых аномалий и принятия решений о связи их появления с наличием дефектов металла и утечек газа рекомендуется сопоставить результаты обследования одного и того же участка трассы ГПО, полученные в различное время, но в идентичных погодных условиях.

При выполнении каждого полёта производится обязательная регистрация условий его проведения с указанием даты выполнения полёта, местонахождения конкретного ГПО, геолого-почвенных условий на трассе, особенностей рельефа, наличия ориентиров на маршрутах, метеоусловий, высоты и скорости

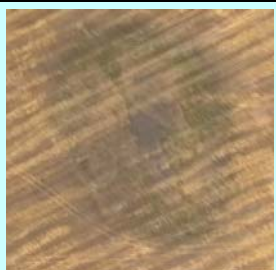
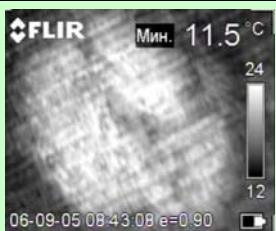
полета, масштаба съемки и других необходимых сведений об операторе, типе ЛА, характеристиках аппаратуры.

По материалам исследований и результатам обследования значительного количества участков газопроводов в различных географических районах и климатических зонах, сопровождавшегося применением арбитражных методов диагностики, специалистами НПЦ "Молния" и Управления по транспортировке газа и газового конденсата ОАО "ГАЗПРОМ" разработана "Методика надземного комплексного технического диагностирования отводов магистральных газопроводов", М., 2007, один из разделов которой посвящён видеотепловизионному обследованию. В соответствии с "Методикой" полёт над газопроводом осуществляется по маршруту, предварительно установленному в GPS-навигатор, при подтверждении утечки представитель организации, производящей обследование, незамедлительно уведомляет об этом официальных представителей эксплуатирующей организации. В целях безопасного проведения полетов должно быть обеспечено строгое выполнение требований безопасности применения ЛА. Полет и работу по видеотепловизионному мониторингу, как правило, выполняют два обученных специалиста, имеющие соответствующие удостоверения: пилот и специалист по тепловому и визуальному методам НК II уровня.

В течение нескольких лет специалистами НПЦ "Молния" были выполнены большие объёмы обследований с применением видеотепловизионного комплекса на несущих ЛА различного типа. Обследования проводились в различных географических и климатических условиях, в разное время года. При проведении обследования в утренние часы в сентябре 2006 г. на участке ГПО в районе Западной Сибири в зоне с/х поля были выявлены визуальная и температурная аномалии, свидетельствующие о наличии выхода газа. Температурная аномалия имела форму эллипса с большей диагональю над осью трубы и размером 77×56 м (табл. 1), максимальный градиент поверхностной температуры фона составил 3 °C/м, а на аномалии – 6 °C/м.

Таблица 1

Типы обнаруженных утечек

Диапазон	Дефект трубопровода			Дефект кранового узла
Видимый диапазон				
ИК диапазон				

Обнаруженные визуальные аномалии соответствовали слабо-выявляемой деградации развития растений (рис. 4). Полное совпадение мест и типов визуальной и тепловой аномалий указывает на высокую вероятность обнаружения утечки.

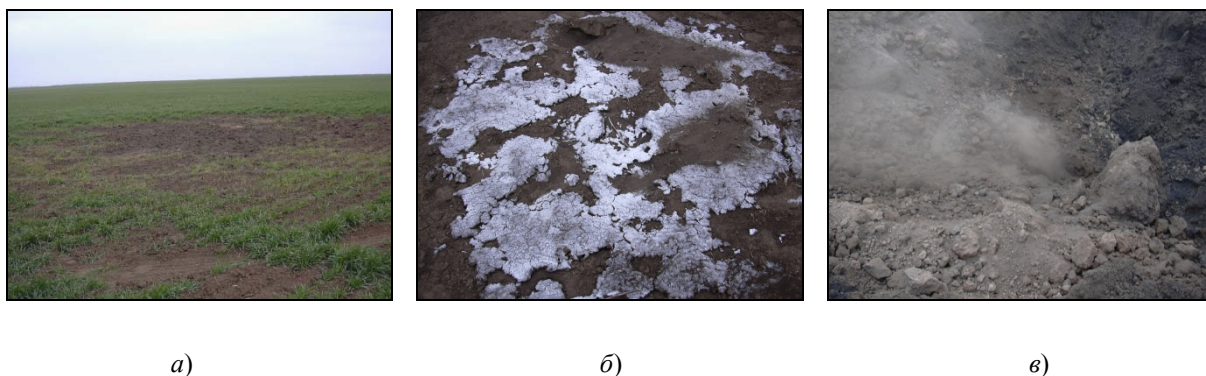


Рис. 4. Проявления утечек в виде:
а – угнетения растительного покрова; *б* – появления следов изморози
в – выброса газа при вскрытии участка газопровода с утечкой

В полёте от 6 октября в том же регионе в дневное время обнаружена тепловая аномалия овальной формы с осью симметрии вдоль оси трубы, размер которой $13 \times 2,8 \text{ м}^2$, с $\Delta T = 4^\circ\text{C}$, визуально она оценивается как слабо выявляемая, что соответствует температурному контрасту величиной 3°C . Длина аномалии (13 м) связана, по-видимому, с действием ветра и особенностями почвы. Данные по обнаруженной визуальной аномалии свидетельствуют о том, что в режиме полёта можно обнаружить незначительную деградацию растительного покрова, обычно не различимую при наземном проходе по трассе газопровода. Результаты обследований (табл. 1 и рис. 4) подтвердили надёжность проведённых теоретических оценок и работоспособность приборного комплекса видеотепловизионного диагностирования подземных газопроводов.

Распознавание мест утечек газа и выявление других аномалий автоматизированной системой связано с использованием целого ряда процедур, подробно рассмотренных в докладе [6].

По результатам видеотепловизионного обследования установлено, что изменения температуры фона подстилающей поверхности составляют $2\text{--}3^\circ\text{C}$, что соответствует нормальной разности температур почвы и растительности с учётом разницы излучательной способности при данной температуре. В месте утечки максимальный градиент температуры поверхности земли может составлять до $6^\circ\text{C}/\text{м}$. Отмечено, что при длительном выбросе метана из трубы на поверхность земли происходит потемнение почвы и угнетается растительный покров.

Проведённые работы в шурфах подтвердили наличие утечки газа. Практический опыт НПЦ "Молния" показал, что в большинстве районов России применение сверхлёгких ЛА для видеотепловизионного обследования ГПО гораздо целесообразнее применения вертолётов и других ЛА.

Эффективность проведения видеотепловизионного обследования на МГ и их отводах подтверждается выявлением мест утечек, необнаруживаемых другими методами дистанционного неразрушающего контроля.

Заключение

1. Исследована и экспериментально подтверждена возможность выявления видеотепловизионным методом утечек газа в диапазоне ИК-излучения с расходом газа 0,05 кг/с и более по охлаждению грунта над газопроводом и в оптическом диапазоне по изменению цвета растительности и грунта.

2. Разработан и изготовлен экономичный приборный видеотепловизионный комплекс ВТК-1 для мониторинга газопроводов, предназначенный для базирования на дельталёте, вертолёте или других легких ЛА.

3. В процессе воздушного мониторинга с применением дельталёта марки "Форсаж" выявлены утечки газопроводов как по охлаждению грунта, так и по изменению цвета растительности и грунта. Размеры этих зон составили 2,8 м и более, что соответствует ожидаемым размерам аномалии.

5. Разработана и внедрена технология видеотепловизионного мониторинга, вошедшая в "Методику надземного комплексного технического диагностирования отводов магистральных газопроводов".

Литература

1. *Natural Gas Leak Detection in Pipelines*. http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Status_Assessments/scanner_technology_0104.pdf.

2. **Вавилов В.П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. Изд. дом "Спектр". 2009. 544 с.

3. **Плюснин И.И.** Устройство дистанционного зондирования для системы управления техническим состоянием линейной части магистрального газопровода. Диссертация. М., 2009. 231 с.

4. *Диагностика трубопроводов*. www.pergam.ru.

5. *Расчёт температурных аномалий при фильтрации природного газа через слой почвы*: научное издание / Семенов В.Н., Филиппов А.С., Моисеев В.Н. и др. // Известия РАН. Сер. Энергетика. 2004. № 5. С. 88-94.

6. **Белокопытов А.С., Коннов В.В., Коннов А.В.** Проблемы распознавания мест выхода газа на подземных газопроводах по результатам видеотепловизионного обследования. // Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций. Третья Российская научно-техническая конференция (г. Екатеринбург). – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2007. <http://www.imach.uran.ru/conf/rkd/rim15.htm>.

Статья опубликована 25 февраля 2013 г.