

Анализ основных характеристик инфракрасной термографии и ультразвуковых методов диагностики технических объектов

¹*СНИЦАРЬ Лилия Ринатовна, докторант, lilek_mr@mail.ru,

¹ИСКАКОВ Казизат Такуадинович, д.ф.-м.н., профессор, kazizat@mail.ru,

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Диагностика строительных конструкций является трудоемкой работой, требующей использования методов неразрушающего контроля, одной из основных задач которых является улучшение использования методов для диагностических и контрольных исследований. Метод инфракрасной термографии и ультразвуковой метод диагностики технических объектов имеют особое значение в этом отношении. Использование метода инфракрасной термографии и ультразвукового контроля позволяет проводить оценку и мониторинг исторических и современных построек с точки зрения разрушения материалов и конструкций, в то время как сами здания остаются неповрежденными. Для каждого из этих методов используются различные измерительные приборы, оснащенные специальными датчиками для проведения качественного анализа. Достижения в области лабораторных испытаний с использованием этих методов и средств позволяют проводить исследования материалов на основе измеряемых параметров. Знания и опыт в области инфракрасной термографии и ультразвукового контроля являются актуальными для инновационных исследований в сфере современных технологий материалов, строительной науки и методов обслуживания. Такие исследования требуют междисциплинарного подхода, который позволяет объединить знания в области материаловедения и строительной науки.

Ключевые слова: приборы диагностики, измерительные приборы, датчики, неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, метод инфракрасной термографии, строительные конструкции, диагностика.

Введение

С течением времени в ходе эксплуатации зданий и сооружений происходит изменение их технического состояния. Это может отражаться в ухудшении как внешнего, так и внутреннего вида, что, безусловно, сказывается на их надежности. Физический износ неизбежен, поскольку он напрямую связан со свойствами материалов, используемых при возведении объектов. Также причинами изменения могут послужить разрушения, внутренние сплошности, еще на этапе строительства и пр. Конструкции теряют свои несущие способности, оборудование зданий ухудшается и стареет. Следует также отметить, что внешние факторы (например, природные явления) также оказывают свое воздействие на техническое состояние сооружений. Поскольку все перечисленные факторы впоследствии приводят к авариям и экономическим затратам, необходимо осуществлять мониторинг строительных конструкций, что позволит спрогнозировать нежелательные изменения и предпринять своевременные меры. Для выявления различных повреждений применяется множество методик, одной из которых является

метод неразрушающего контроля.

По мере того как здания стареют, их структурное состояние ухудшается, вызывая опасения по поводу непоправимого ущерба и безопасности конструкции [1]. Чтобы решить такие проблемы в старых или строящихся зданиях, необходимы регулярные проверки и оценка состояния с целью их диагностики.

В данной статье рассматриваются методы неразрушающего контроля, применяемые для диагностики технического состояния строительных объектов. А также по каждому из методов представлены к сравнению приборы, с помощью которых производится диагностика технических конструкций.

Анализ методов неразрушающего контроля

Неразрушающий контроль – это такой способ определения прочности материалов, при котором не нарушается целостность технических зданий и сооружений. Благодаря таким методам не нужно прибегать к демонтажу исследуемых объектов, но при этом выявить возможные отклоне-

ния от установленных нормативов.

Для повышения точности исследований неразрушающего контроля необходимо использовать более одного метода неразрушающего контроля и поддерживать исследование лабораторными испытаниями. Достижения в лабораторных испытаниях с использованием метода инфракрасной термографии и ультразвукового метода позволяют реализовать использование этих методов для количественного анализа, другими словами, проводить исследования на основе измеряемых параметров.

Метод инфракрасной термографии

Инфракрасная (ИК) термография базируется на методах и средствах бесконтактного анализа теплового излучения, используется для обнаружения строительных дефектов, таких как тепловые мосты, утечки воздуха или влажные пятна, особенно в контексте энергосбережения. Данный метод позволяет измерить тепловое излучение, испускаемое материалом, и отображает исследуемую область в виде изображения в цветах, соответствующих заданной шкале температур. Окончательные температуры поверхности различаются в зависимости от тепловых свойств, в частности, характеристик теплового сопротивления и тепловой инерции поверхностного и подповерхностного слоев. Например, влага, захваченная пористым материалом, увеличивает его теплопроводность, следовательно, снижает его тепловое сопротивление и создает своего рода мостик холода.

ИК-сканирование полезно и экономит время для проверки всей конструкции, особенно с акцентом на видимые и невидимые дефекты материалов, влаго- и тепловые повреждения, а также использование различных материалов. Однако при натурных исследованиях количественный анализ репрезентативных областей обязателен для правильной интерпретации проблемных зон, обнаруженных на одиночных ИК-изображениях [2]. Этот метод позволяет получать инфракрасные изображения в последовательности из целевой области в периоды, когда целевая область подвергается воздействию условий нагрева, а затем охлаждения, а также получать дифференциальные тепловые изображения, которые показывают разницу температур поверхности между начальным и последним ИК-изображениями для нагрева или периода охлаждения. Наклон линейной регрессии представляет скорость нагревания или скорость охлаждения для каждой целевой области [3]. Эти скорости являются измеряемыми параметрами, связанными с характеристиками тепловой инерции материалов.

Проще говоря, этот метод исследования чувствителен к тепловым характеристикам материалов. Поскольку тепловые характеристики тесно связаны с физическими, физико-механическими и/или механическими свойствами материалов, из-

менения этих свойств можно точно отслеживать с помощью количественной ИК-термографии.

Метод ультразвукового контроля

Ультразвуковой метод диагностики строительных материалов основан на измерении времени прохождения ультразвуковых волн, проходящих по твердому материалу через определенное расстояние между источником излучения и приемником. Измеряемым параметром ультразвукового контроля является скорость распространения ультразвуковых волн через строительный материал. Если для строительных материалов типа бетона функциональной зависимости нет, то между скоростью звука и прочностью материала имеется достаточно устойчивая статистическая связь: чем прочнее материал, тем выше скорость звука. Эта связь сокращенно обозначается как «корреляция-скорость-сила». Однако эта зависимость не отражает сложного понятия прочности бетона. Так, в сваях при распространении продольных волн возникают поперечные волны растяжения и радиальные волны. Поэтому скорость распространения продольных волн меньше, чем в неограниченной среде [4].

Измерения скорости ультразвукового импульса в режиме не прямой передачи дают точные данные для оценки глубины видимой трещины при исследовании поверхностей в слоях, доступных только с одной стороны [5]. Трудность доступа к взаимно перпендикулярным граням строительного элемента ограничивает применимость прямых измерений скорости ультразвукового импульса на месте. В таком случае необходимо установить эталонные данные, полученные из контрольных образцов, и соотнести данные скорости ультразвукового импульса, полученные при прямом и косвенном режимах передачи. Эта корреляция позволяет правильно интерпретировать данные скорости ультразвукового импульса, относительно контрольных данных.

Результаты сравнительного анализа методов неразрушающего контроля

В данной работе рассматривается применение методов неразрушающего контроля к бетонным объектам, благодаря которым можно выявить дефекты. Одним из приборов, используемых для ИК-термографии, является Fluke Ti480 PRO. Его основные характеристики приведены в таблице 1 [6].

Галогенные лампы располагались на расстоянии 0,5 м от образца и перемещались вверх и вниз каждые 15 секунд для создания равномерно теплого потока по всей поверхности образца [7]. Так, согласно испытаниям, проведенным в [7], можно увидеть, результаты лабораторных испытаний.

Часть этого падающего теплового потока поглощается образцом бетонного объекта. Этот поглощенный тепловой поток необходим для срав-

Таблица 1 – Основные характеристики прибора Fluke Ti480 PRO

Характеристики	Значение
Рабочая температура	от –10°С до +50°С
Погрешность измерения температуры	±2°С или 2% (при номинальной температуре 25°С, в зависимости от того, что больше)
Инфракрасный спектральный диапазон	от 7,5 мкм до 14 мкм (длинноволновый)
Частота кадров	Исполнение с 60 Гц или 9 Гц
Работа от сети переменного тока	Возможна работа от сети переменного тока (от 100 до 240 В, 50/60 Гц) с входящим в комплект блоком питания
Способ заряда батареи	Зарядное устройство для двух батарей или заряд батареи в тепловизоре. Дополнительное зарядное устройство от бортовой сети автомобиля (12 В)
Габаритные размеры прибора	
– высота	277 мм
– ширина	122 мм
– длина	167 мм
Масса (с батареями)	1,04 кг

нения с результатами моделирования. Градиенты температуры по толщине можно рассчитать по температуре этих двух поверхностей. Температуры на передней и задней поверхностях можно измерить с помощью инфракрасной тепловизионной камеры. Затем градиент температуры по толщине можно использовать из уравнения (1) для определения поглощенного теплового потока [8]. Для конечно-элементного моделирования используется среднее значение теплового потока.

Компоненты теплового потока можно выразить с помощью закона Фурье следующим образом [9]:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

где q_x , q_y и q_z – составляющие теплового потока на единицу площади;

T – температура;

k – коэффициент теплопроводности.

Недостатки тепловизионного контроля как метода НК связаны в основном с условиями окружающей среды [10]. Проанализировав данную методику в качестве диагностики строительных сооружений и конструкций, авторы пришли к выводу, что на получение результатов с низкой погрешностью оказывает влияние слишком много внешних факторов, связанных в основном с условиями окружающей среды. А это значит, что для полевых испытаний такой метод уступает в сравнении с акустическими.

Относительно испытания ультразвуковым методом следует отметить, что принцип его основан на регистрации параметров упругих волн, вызываемых в испытуемом объекте, в нашем случае – в свае.

Применяя второй закон Ньютона, перемещение упругой волны можно определить скоростью

звука, которая зависит от свойств среды и определяется по формуле (в данном примере рассматривается бетон класса В35):

$$c = \frac{E_d}{\rho}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где E_d – модуль упругости бетона ($34,5 \cdot 10^9$ Па);

ρ – плотность среды (2500 кг/м^3).

Для тяжелого бетона класса В35 естественного твердения, согласно табличным значениям, скорость распространения продольной волны будет составлять 3700 м/с. Так, в сваях при распространении продольных волн появляются волны поперечного растяжения и радиальные волны. Поэтому скорость распространения продольных волн меньше, чем в неограниченной среде.

Дефекты свай можно характеризовать изменением площади сечения от А1 до А2 или свойств материала E и ρ . Когда волна встречает неоднородность, она частично отражается назад, частично проходит вперед.

Авторами был проведен эксперимент с помощью прибора ПДС-МГ-4, предназначенный для выявления дефектов в бетонных сваях. В результате испытаний были определены следующие параметры: скорость распространения волны в объекте, длина исследуемого объекта, определены имеющиеся дефекты по отраженным сигналам, а также расстояние до трещины с точностью в 2 мм [11]. С основными характеристиками данного прибора можно ознакомиться в таблице 2 [12].

Ультразвуковой контроль полезен для прогнозирования глубины трещин в бетоне и состояния прочности/повреждения строительных материалов. Этот метод также можно использовать для обнаружения невидимых отказов на более глубоких уровнях. Тем не менее, измерения ультразвукового импульса действительно сложны,

Таблица 2 – Основные характеристики прибора ПДС-МГ4	
Характеристики	Значение
Диапазон измерений интервалов времени	от 500 мкс до 50000 мкс
Пределы допускаемой относительной погрешности измерения интервалов времени, %	
– в диапазоне от 500 до 5000 мкс	±5
– в диапазоне св. 5000 до 50000 мкс	±1
Диапазон показаний длины сваи (при скорости звука 4000 м/с)	от 1 до 100 м
Частота дискретизации	62,5 кГц
Параметры электрического питания:	
– напряжения постоянного тока	от 11,0 В до 13,5 В
Потребляемая мощность	Не более 3,6 Вт
Габаритные размеры прибора в кейсе	
– высота	150 мм
– ширина	350 мм
– длина	400 мм
Масса	не более 6 кг

поскольку сбор данных ограничен уровнями, доступными для человеческого организма, и требует много часов работы из-за многократного повторения измерений ультразвукового импульса для получения надежных данных.

Выводы

Согласно [13], тепловидение является наглядным методом исследования механических напряжений при диагностике строительных объектов, благодаря которому можно составить карту дефектов. Однако на сегодняшний день сделать прогноз о несущих способностях конструкций является достаточно проблематичным. Тепловизоры в основном применяются для диагностики мест разрывов подземных теплотрасс, водопровода, канализации, а также могут осуществлять неразрушающий контроль сварных соединений. С их помощью возможно проверить состояние износа механических деталей станков, механизмов и агрегатов [14].

Относительно результатов анализа ультразвукового метода исследования можно выделить следующее. С помощью данного метода можно измерить время или скорость распространения ультразвукового механического импульса в мате-

риале исследуемых объектов. Эта скорость очень высока и пропорциональна плотности материала [15].

По завершении проведенных испытаний и исследований было сделано заключение о необходимости разработки уникального прибора диагностики дефектов бетонных конструкций на казахстанском рынке. Начата работа по созданию прототипа устройства с конфигурируемыми датчиками и реализацией ПО, которое позволит избежать больших погрешностей при испытаниях в полевых условиях.

Работа выполнена в рамках проекта, согласно конкурсной заявке на тему «Создание научно-технических основ по выявлению неоднородностей и дефектов для исследования грунтовых оснований и конструкций» по направлению «3. Геология, добыча и переработка минерального и углеводородного сырья, новые материалы, технологии, безопасные изделия и конструкции. «3.15 Подземные сооружения, грунтовые основания и фундаменты», подаваемой на конкурс грантового финансирования молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2023-2025 годы, объявленный МОН РК 11.10.2022 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баснукаев И.Ш., Исмаилова З.Х., Мовсулов М.М. Основы мониторинга зданий и сооружений // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XVI. № 2 (20), 2020, DOI: 10.34708/GSTOU. 2020.40.43.002.
- Хан Ф., Болхасани М., Концос А., Хамид А., Бартоли И. Моделирование и экспериментальная реализация инфракрасной термографии на бетонных каменных конструкциях // Infrared Physics & Technology, 2015 (февраль).
- Сиухин Р.В. Оценка состояния оборудования подстанции с использованием ИК-термографии // Научный журнал молодых ученых № 1 (8) 2017.
- Мангушев Р.А., Конюшков В.В., Дьяконов И.П. Анализ практического применения винтовых набивных свай // Фундаменты,

- фундаменты и механика грунтов. – 2014. – № 5.
5. Иванчев И.Ю., Славчев В.С. Экспериментальное определение однородности, прочности на сжатие и модуля упругости бетона в железобетонных элементах неразрушающим ультразвуковым методом скоростей импульсов // Материалы 16-й Международной конференции по новым направлениям в статике и динамике зданий. Братислава, Словакия, Строительный факультет ГТУ Братислава, Словацкое общество механиков SAS, 2018 (октябрь).
 6. Корпорация Fluke «Руководство пользователя» Fluke Ti480 PRO Ноябрь 2017, Изд. 3, 9/19.
 7. Ху Ю., Тран К.Х., Ли Д.-Х., Хан Д.Е., Ан Д.-Х., Йим С. Экспериментальное исследование по обнаружению износа бетона с использованием метода инфракрасной термографии // Достижения издательства Hindawi в области материаловедения и инженерии. Том 2016. ID 1053856, 12 с.
 8. Райхельт Л., Мейнгаст У., Ренц У. Расчет нестационарного теплового потока через стенку по измерениям температуры поверхности // Международный журнал Heat Mass Transfer 45 (3), 2002, 579-584.
 9. Хан Д.В., Озисик Н., Теплопроводность // Wiley 2012 (май).
 10. Антонов, А.А. Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Методы неразрушающего контроля состояния оборудования НГП»: Учебно-методическое пособие / Антонов А.А., Певнев В.Г., Диденко Е.В. – Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2022 – 104 с. – EDN UUKRKC.
 11. Сницарь Л.Р. Алгоритмы и технология использования аппаратного комплекса диагностики дефектов строительных свай // 2022 Международная конференция по Smart-информационным системам и технологиям (SIST), 28-30 Апрель 2022, DOI: 10.1109/SIST54437.2022.9945728.
 12. Гулунов В.В. Прибор диагностики свай ПДС-МГ4. – Челябинск, 2020. – 39 с.
 13. Вавилов В.П. Диагностика строительных конструкций методом инфракрасной термографии // В мире неразрушающего контроля № 2 (8), июнь 2008.
 14. Желтов М. Неразрушающий тепловой контроль // Аква-Терм. № 5 (69). 2012.
 15. Кван А.К.Х., Нг П.Л. Методы диагностики зданий и диагностика зданий: путь вперед // Управление инженерными активами – системы, профессиональные практики и сертификация, 2015 (ноябрь), С. 849-862.

Инфрақызыл термографияның негізгі сипаттамаларын және техникалық объектілерді диагностикалаудың ультрадыбыстық әдістерін талдау

¹*СНИЦАРЬ Лилия Ринатовна, докторант, lilek_mr@mail.ru,

¹ИСКАКОВ Казизат Такуадинович, ф.-м.ф.д., профессор, kazizat@mail.ru,

¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Сәтпаев көшесі, 2,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Құрылыс конструкцияларын диагностикалау – бұзылмайтын бақылау әдістерін қолдануды талап ететін, еңбекті қажет ететін жұмыс, оның негізгі міндеттерінің бірі диагностикалық және бақылау зерттеулерінің әдістерін қолдануды жақсарту болып табылады. Бұл тұрғыда инфрақызыл термография әдісі мен техникалық объектілерді диагностикалаудың ультрадыбыстық әдісі ерекше маңызға ие. Инфрақызыл термографияны және ультрадыбыстық сынауды пайдалану ғимараттардың өзі бұзылмаған күйде қалған кезде тарихи және заманауи ғимараттарды материалдар мен құрылымдардың бұзылуы тұрғысынан бағалауға және бақылауға мүмкіндік береді. Осы әдістердің әрқайсысы үшін сапалы талдау үшін арнайы сенсорлармен жабдықталған әр түрлі өлшеу құралдары қолданылады. Осы әдістер мен құралдарды қолдану арқылы зертханалық сынақтардағы жетістіктер өлшенетін параметрлер негізінде материалдарды сынауға мүмкіндік береді. Инфрақызыл термография және ультрадыбыстық сынақтар саласындағы білім мен тәжірибе заманауи материалдар технологиясы, құрылыс ғылымы және техникалық қызмет көрсету әдістері саласындағы инновациялық зерттеулер үшін өзекті болып табылады. Мұндай зерттеулер материалтану және құрылыс ғылымы білімдерін біріктіретін пәнаралық тәсілді қажет етеді.

Кілт сөздер: диагностикалық құрылғылар, өлшеу құралдары, сенсорлар, бұзбайтын бақылау, ультрадыбыстық әдіс, инфрақызыл термография әдісі, құрылыс құрылымдары, диагностика.

Analysis of the Main Characteristics of Infrared Thermography and Ultrasonic Methods for Diagnosing Technical Objects

¹*SNITSAR Liliya, Doctoral Student, lilek_mr@mail.ru,

¹ISKAKOV Kazizat, Dr. of Phys. and Math. Sci., Professor, kazizat@mail.ru,

¹NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2,

*corresponding author.

Abstract. Diagnostics of building structures is a painstaking work that requires the use of non-destructive testing methods, the main task of which is the use of research methods for diagnostic and control studies. The method of infrared thermography and the ultrasonic method of diagnostics of technical objects are of particular importance in this regard. The use of the methods of infrared thermography and ultrasonic control makes it possible to carry out observations and

monitoring of historical and modern buildings in terms of the destruction of materials and structures, while the buildings themselves remain intact. For each of these methods, different measuring instruments are used, equipped with special sensors for qualitative analysis. Achievements in laboratory testing using these methods and devices allow materials to be tested based on measurable parameters. Knowledge and experience in the field of infrared thermography and ultrasonic testing are relevant for innovative research in the field of modern materials technology, building science and maintenance methods. Such research requires an interdisciplinary approach that combines the knowledge of materials science and building science.

Keywords: *diagnostic devices, measuring instruments, sensors, non-destructive testing, ultrasonic method, infrared thermography method, building structures, diagnostics.*

REFERENCES

1. Basnukaev I.Sh., Ismailova Z.Kh., Movsulov M.M. Fundamentals of monitoring buildings and structures. Vestnik GGNTU. Engineering Sciences. Volume XVI. No. 2 (20), 2020, DOI: 10.34708/GSTOU. 2020.40.43.002.
2. Khan F., Bolhassani M., Kontsos A., Hamid A., Bartoli I. Modeling and experimental implementation of infrared thermography on concrete masonry structures // Infrared Physics & Technology, 2015 (February).
3. Siukhin R.V. Assessment of the condition of substation equipment using IR thermography // Scientific journal of young scientists No. 1 (8), 2017.
4. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., Dyakonov I.P. Analysis of the practical application of screw piles // Foundations, foundations and soil mechanics. – 2014. – No. 5.
5. Ivanchev I.Y., Slavchev V.S. Experimental determination of homogeneity, compressive strength and modulus of elasticity of concrete in reinforced concrete elements by non-destructive ultrasonic pulse velocity method // Proceedings of the 16th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings. Bratislava, Slovakia, Faculty of Civil Engineering STU. Bratislava Slovak Society of Mechanics SAS, 2018 (October).
6. Fluke Corporation Users Manual Fluke Ti480 PRO November 2017 Rev. 3, 9/19.
7. Huh J., Tran Q.H., Lee J.-H., Han D.Y., Ahn J.-H., Yim S. Experimental Study on Detection of Deterioration in Concrete Using Infrared Thermography Technique // Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2016. Article ID 1053856, 12 p.
8. Reichelt L., Meingast U., Renz U. Calculating transient wall heat flux from measurements of surface temperature // Int. J. Heat Mass Transfer 45 (3), 2002, 579-584.
9. Hahn D.W., Ozisik N. Heat Conduction // Wiley 2012 (May).
10. Antonov, A.A. Guidelines for the implementation of laboratory work on the course «Methods of non-destructive testing of the state of equipment in the NGP»: Educational and methodological manual / Antonov A.A., Pevnev V.G., Didenko E.V. – Moscow: Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkina, 2022 – 104 p. – EDN UUKRKC.
11. Snitsar L. Algorithms and technology for using a hardware complex for diagnosing defects in construction piles // 2022 International Conference on Smart-Information Systems and Technologies (SIST), 28-30 April 2022, DOI: 10.1109/SIST54437.2022.9945728.
12. Gulunov V.V. PDS-MG4 pile diagnostic device. – Chelyabinsk, 2020. – 39 p.
13. Vavilov V.P. Diagnosis of building structures by infrared thermography // In the world of non-destructive testing No. 2 (8), June 2008.
14. Zheltov M. Non-destructive thermal control // Aqua-Term. No. 5 (69). 2012.
15. Kwan A.K.H., Ng P.L. Building diagnostic techniques and building diagnosis: the way forward // Engineering Asset Management – Systems, Professional Practices and Certification, 2015 (November), pp. 849-862.