

УДК 620.179.13

## ОБНАРУЖЕНИЕ ЗОН НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ МОНОЛИТОВ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОЙ ИНФРАКРАСНОЙ СЪЕМКИ

С. Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия

*На примере водовода плотины ГЭС рассмотрены возможности применения тепловой ИК-съемки, как метода неразрушающего контроля бетонных монолитов. В результате проведенных исследований выявлена область аномальной тепловой инерции бетонного покрытия, которая связывается с зоной напряженно-деформированного состояния. Приведены результаты сравнительной оценки влаго-содержания в бетонном слое.*

В последние годы в различных областях производственной практики более широко стали применяться тепловые методы неразрушающего контроля, основанные на регистрации собственного излучения поверхности материала в средней (3—5 мкм) и дальней (8—14 мкм) инфракрасной (ИК) области [1, 2]. Обширный опыт применения тепловой ИК-съемки для исследования неоднородностей земной поверхности [3—5] может быть использован, в частности, для обнаружения зон напряженно-деформированного состояния (НДС) крупных строительных конструкций, имеющих бетонные монолитные элементы. Методики, основанные на активном тепловом воздействии, для решения подобного рода задач малоэффективны и практически не применяются ввиду сложности процесса искусственного нагрева объектов.

В настоящей работе предпринята попытка реализации возможностей дистанционной ИК-съемки как метода пассивного теплового контроля крупных бетонных монолитов. В задачу входило обнаружение и оконтуривание зон НДС, а также количественная оценка изменения свойств бетонного покрытия одного из водоводов плотины ГЭС. Метод основан на анализе пространственно-временных вариаций температурного поля поверхности водовода, подверженного воздействию суточных колебаний температуры. Работа выполнена при содействии АООТ "АРС" и коллектива Чиркейской ГЭС (Республика Дагестан).

### ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Строительный бетон, как любой пористый материал, представляет собой дисперсную среду с определенным объемно-весовым соотношением твердых частиц, жидкой и газообразной фаз. Изменение этого соотношения приводит к изменению теплофизических свойств материала, основными из которых

являются теплопроводность  $\lambda$ , теплоемкость  $C$ , плотность  $\rho$  и температуроводность  $\alpha$ . В совокупном виде свойство материала, определяющее интенсивность теплообменных процессов с окружающей средой, характеризуется тепловой инерцией (ТИ)

$$E = \sqrt{\lambda C \rho}.$$

Очевидно, что поверхность объекта из однородного (в приближении) материала, имеющего неизменную толщину в направлении нестационарного теплового воздействия, будет изотермична в любой момент времени. Поверхностное температурное поле в таком случае может отражать участки локального изменения тепловых свойств, которые могут быть охарактеризованы как зоны неоднородности материала. Для обнаружения неоднородностей среды по изменению ТИ более эффективно использование параметра  $\Delta T = T_1 - T_2$ , где  $T_1$  и  $T_2$  — температура поверхности в разных фазах теплового воздействия.

При таком подходе результирующее поле  $\Delta T$  не отражает влияния локальных источников стационарного (квазистационарного) теплового воздействия, соизмеримых с влиянием зон НДС, что не исключается при исследовании протяженных объектов.

Результаты математического моделирования показывают, что приращение температуры поверхности образца при нестационарном теплообмене зависит от ТИ материала следующим образом [2]:

$$T = \frac{2Q}{E} \sqrt{\frac{\tau}{\pi}}, \quad (1)$$

где  $Q$  — поглощенная энергия;

$\tau$  — время.

Одно из основных преимуществ теплового метода контроля заключается в возможности дистанционного (бесконтактного) измерения температуры поверхности объекта по его собственному излучению в средней и дальней ИК-областях. В расчетах используются значения радиационной температуры, которая является функцией термодинамической температуры, и коэффициента излучения поверхности. При оценке ТИ по данным разности температур поверхности применяют адекватный параметр — “кажущуюся тепловую энергию” (КТИ) [3, 5]

$$\text{КТИ} = K \frac{1-A}{\Delta T}, \quad (2)$$

где  $\Delta T$  — разность полуденных и ночных значений температуры поверхности;

$A$  — альbedo поверхности;

$K$  — постоянный коэффициент. При оценке КТИ по данным суточных колебаний температуры время между моментами измерения должно соответствовать 1/2 суток.

В качестве источника нестационарного теплового воздействия использовались суточные колебания температуры воздуха. Процессы теплообмена в этом случае описываются простым уравнением теплопроводности. Эффективная глубина проникновения синусоидальной тепловой волны характеризует активную толщину материала, участвующего в суточной передаче тепла, и может быть вычислена по формуле [6]:

$$d = \sqrt{\frac{\lambda t}{\pi C \rho}},$$

где  $d$  — глубина, на которой тепловой поток ослабевает в  $e$  (основание натурального логарифма) раз от значения у поверхности для сухого бетона, согласно (3),  $d = 0,115$  м;

$t$  — период колебаний.

В ряде случаев активная толщина материала приравнивается к глубине затухания амплитуды температурной волны до значения погрешности (методической, инструментальной). Логика такого подхода заключается в том, что неоднородность в слое может быть обнаружена по минимальным изменениям температурной волны на этой глубине. Для вычислений используется уравнение [7]:

$$d = \frac{\ln\left(\frac{T}{T_n}\right)}{\sqrt{\frac{\pi}{t - a}}},$$

где  $T$  — амплитуда колебаний на поверхности;

$T_n$  — значение погрешности в единицах температуры.

Зоны НДС монолитных бетонных элементов характеризуются в первую очередь повышенной трещиноватостью (пористостью), что в условиях высокого влагосодержания в воздухе и конденсации приводит к заполнению трещин водой и образованию участков повышенной влажности. Тепловая инерция воды существенно выше тепловой инерции сухого бетона, в связи с чем зона НДС достаточно уверенно может быть обнаружена по относительному изменению температуры.

При отсутствии суточных колебаний в качестве источника теплового воздействия могут быть использованы сезонные колебания температуры (годовой период). Сложность в данном случае заключается в определении амплитуды сезонных колебаний.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА, АППАРАТУРА И ТЕХНОЛОГИЯ СЪЕМКИ

Объектом исследований являлась верхняя часть одного из четырех водоводов плотины Чиркейской ГЭС. В целом ГЭС представляет собой уникальное инженерное сооружение, построенное на реке Сулак, в сложных горных условиях, в сейсмически активном регионе. Плотина ГЭС (высотой более 200 м) соединяет скалистые массивы узкого горного ущелья. Прямые солнечные лучи не попадают на поверхность водовода.

Водовод выполнен в виде металлической трубы, охваченной снаружи сплошным бетонным монолитом, имеющим выпуклую граненую форму полуцилиндра. Поверхность бетона однородна, без видимых изменений цвета, что позволяет считать неизменной спектральную характеристику отражения. Схематическое изображение исследуемого участка водовода в масштабе, с места проведения измерений, дано на рис. 1. Размеры участка в данной проекции составляют 50 м по вертикали и 12 м по горизонтали.

По уровню 265 м водовод опоясан металлическим балконом с ограждением высотой около 1,5 м. На этом уровне службами контроля ГЭС были выявлены отдельные микротрещины поверхности бетонной обшивки, что послужило основанием для проведения дополнительных диагностических работ.

Температуру поверхности водовода измеряли с помощью модифицированной ИК-системы дистанционного термопрофилирования, состоящей из приемного радиометра и накопителя данных на магнитную ленту, объединенного с устройством управления и контроля [8]. Обработка результатов осуществлялась на ЭВМ РС/АТ после ввода данных с накопителя.

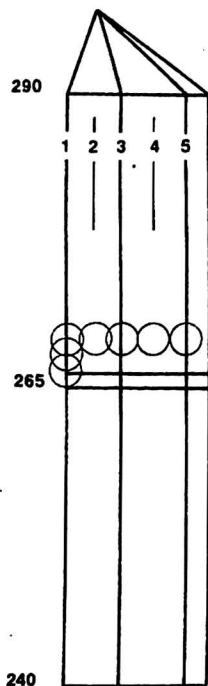


Рис. 1. Схематическое изображение водовода

### Основные характеристики системы

Спектральный диапазон, мкм .....	2—20
Диапазон измеряемых температур, °С .....	-10 ÷ +40
Основная погрешность, °С .....	0,1
Пороговая чувствительность, °С .....	0,05
Постоянная времени, мс .....	50
Поле визирования .....	1 : 25
Напряжение питания, В .....	12
Потребляемая мощность, Вт .....	7
Габаритные размеры, мм:	
приемного модуля .....	∅ 75x280
накопителя .....	70x300x400

Радиометр системы жестко крепится на оптической головке теодолита и юстируется по ее оптической оси. Сканирование осуществляется путем последовательного наведения оптической оси теодолита на точку вертикального профиля с выбранным шагом. В системе предусмотрена синхронизация вращения радиометра с записью данных, что обеспечивает равномерное распределение точек измерения независимо от скорости поворота.

Съемку проводили по пяти вертикальным профилям (см. рис. 1) от уровня 290 м до 240 м. Первый профиль проведен с наведением на линию стыка водовода с плотиной, третий и пятый — на ребра, а второй и четвертый — на середину соответствующих граней. Измерения проводили с одной точки, с расстояния 67 м от водовода, у выхода на уровень 265 м. Диаметр пятна поля обзора с данной дистанции составлял ~ 2,7 м. Расстояние между точками наведения по вертикали 1,3 м. Таким образом, измерения проводились с перекрытием поля обзора. На рис. 1 кружками показаны участки наведения радиометра по вертикали и горизонтали.

Работы на объекте выполнялись в относительно теплый период октября, в отсутствие осадков и пасмурных дней. Дистанционные измерения температуры поверхности водовода осуществлялись дважды в течение получаса; первый цикл — после захода солнца, с 17 ч по местному времени, второй — перед восходом, около 6 ч утра. Выбор времени съемки обусловлен тем, что в дневное время не исключено влияние переотраженных солнечных бликов. Их вклад в прогрев бетонной обшивки незначителен, однако весьма ощутим в суммарном излучении с поверхности. Дополнительно в течение суток проводили измерения температуры воздуха.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИК-СЪЕМКИ

После обработки данных ИК-съемки результаты представлялись в виде графиков распределения температуры и разности температур по отдельным профилям, а также карты  $\Delta T$  по всей поверхности.

На рис. 2 и 3 в качестве иллюстраций приведены графики  $T_B$ ,  $T_U$ ,  $\Delta T$  (в  $^{\circ}\text{C}$ ) по профилю 2. Некоторый тренд температуры, отмечаемый по всем профилям, объясняется неидентичными условиями прогрева верхней и нижней частей водовода (см. рис. 2), а слабая положительная аномалия в центре обеих кривых отражает влияние металлического заграждения. Тот факт, что аномалия по размеру больше ширины самого заграждения объясняется перекрытием поля обзора при съемке.

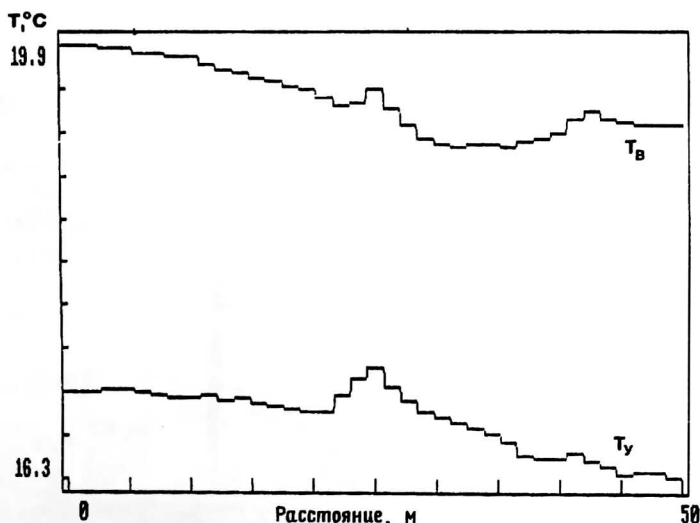


Рис. 2. Кривые распределения температуры вдоль профиля 2 по данным вечерних ( $T_B$ ) и утренних ( $T_U$ ) измерений

Из рис. 2 видно, что неоднородность бетонного покрытия не проявляется в температуре поверхности однозначно. В то же время, кривая разности температур (см. рис. 3) фиксирует отрицательную аномалию  $\Delta T$ , отражающую участок высокой ТИ.

По данным профильных измерений была построена карта изолиний разности температур (рис. 4), на которой зона высокой ТИ проявляется в виде продольного пятна с аномально низкими значениями  $\Delta T$  (изолиния  $2,2^{\circ}\text{C}$ ) между вторым и третьим профилем на уровне 265 м.

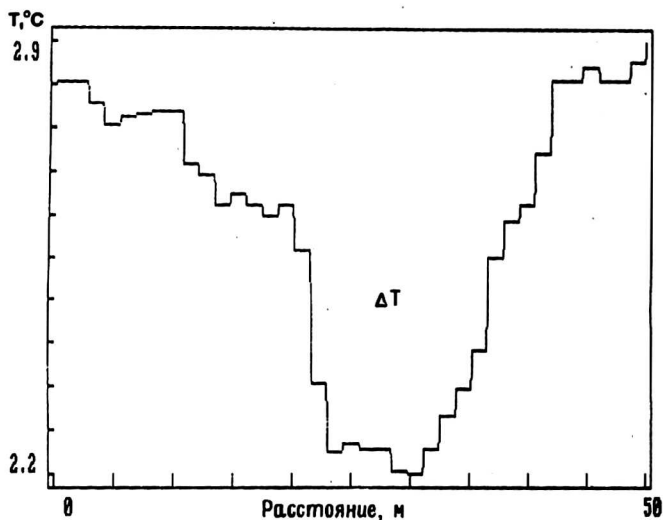


Рис. 3. Кривая разности температур  $\Delta T$  вечерних и утренних измерений по профилю 2

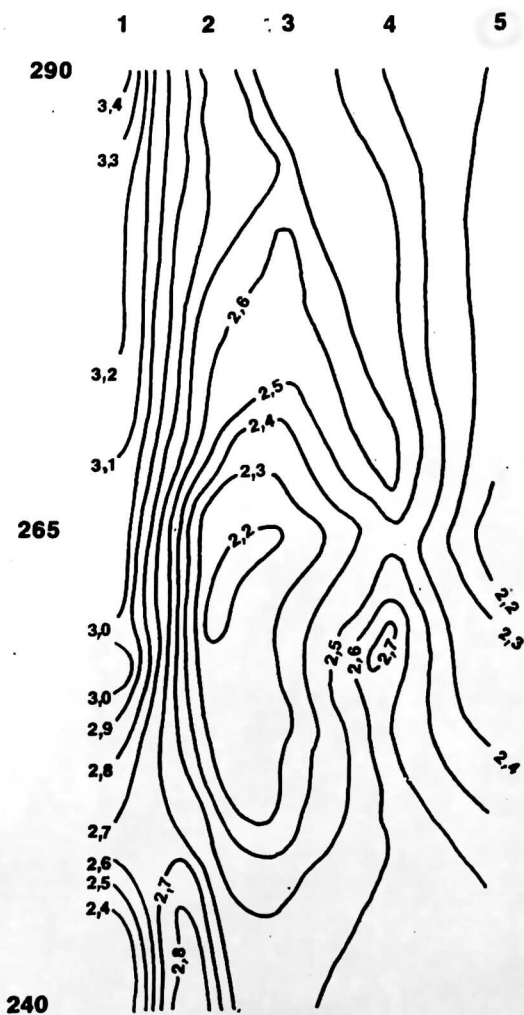


Рис. 4. Картина пространственного распределения  $T$  поверхности водовода

Для удобства восприятия карты отношение размеров по вертикальной и горизонтальной осям 5:1 изменено на 2,5:1.

Для определения границ выявленной депрессионной зоны по модульному значению распределения  $\Delta T$  был установлен уровень фона, лежащий между 2,5 и 2,6 °С. Таким образом, контур выявленного участка условно соответствует изолинии 2,4 °С.

Отрицательная аномалия  $\Delta T$  связана с увеличением любого из параметров  $\lambda$ ,  $C$ ,  $\rho$  и в итоге ТИ. Наиболее вероятной причиной возникновения аномалии ТИ может быть увеличение пористости (трещиноватости) бетона и соответственно увеличение массы инфильтруемой или конденсированной из воздуха влаги. Контуры аномалии, в виде стекающего вниз пятна, позволяют предположить инфильтрацию воды с внутренней части водовода по участку повышенной трещиноватости. Выявленная аномалия отражает зону НДС, что впоследствии было подтверждено результатами сейсмоакустического зондирования.

В период проведения съемки температура воздуха в тени достигала днем 24 °С, а ночью опускалась до 16 °С. Для определения глубины проникновения суточных колебаний, согласно (4) для каменистого бетона были взяты значения:  $\sigma = 0,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [6];  $T_n = 0,1 \text{ °С}$ ;  $T = 4 \text{ °С}$ ,  $t = 24 \text{ ч}$ . В результате подсчета  $d = 34 \text{ см}$ . Для бетона с гравием:  $\sigma = 0,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [1];  $d = 43 \text{ см}$ .

Для количественной оценки относительной увлажненности зоны НДС было использовано аналитическое соотношение, основанное на предположении, что для низкого влагосодержания теплопроводность слабопористых тел не изменяется с влажностью [2]:

$$W = \frac{C}{C_b} \left( \frac{\Delta T^2}{\Delta T_b^2} - 1 \right), \quad (3)$$

где  $\Delta T$  и  $\Delta T_b$  — повышение температуры сухого и влажного материала соответственно;

$C$  и  $C_b$  — теплоемкость сухого материала и воды соответственно.

Анализ проводится по данным профилей 2, 3 и 4.

Отсутствие эталонного участка сухого бетона позволяет провести лишь оценку относительного увеличения влажности, в связи с чем в качестве “сухих” были взяты участки с максимальными значениями  $\Delta T = 2,8 \text{ °С}$ . В этом случае, согласно (3), фоновый уровень увлажнения не превышает 1,5 %, а увлажнение по изолинии 2,2 °С чуть более 3 %.

Существование тренда температурного распределения вдоль профилей (см. рис. 2) свидетельствует о том, что интенсивность поступающего теплового потока в верхней и нижней частях водовода различна. При допущении равенства этих потоков на близлежащих участках фоновых  $\Delta T_\phi$  и аномальных  $\Delta T_a$  значений постоянства альбедо по поверхности, согласно (1) и (2), выражаются так:

$$E_a / E_\phi = \Delta T_\phi / \Delta T_a. \quad (4)$$

Известна зависимость теплопроводности бетона от влажности [9]. Весьма близки к свойствам бетона теплофизические свойства цементированного песчаника, известняка и глины, с известной зависимостью от влажности [10]. При нормальных условиях и слабом влагосодержании (до 10 %) все эти зависимости аппроксимируются линейной функцией. На основе комплексного анализа этих зависимостей было выведено эмпирическое соотношение  $E_b/E = f(W)$ , учитывающее, в том числе, связь теплопроводности бетона с влажностью. В итоге,

с учетом (4), было получено уравнение для определения относительной влажности бетона ( $w$  %) по значениям  $\Delta T$ :

$$W = 25 \left( \frac{\Delta T}{\Delta T_B} - 1 \right). \quad (5)$$

Расчеты по формуле (5) показывают, что фоновый уровень влажности составляет 3 %, а по изолинии 2,2 °С — порядка 7 %. Таким образом, величина относительной влажности, полученная по (5), приблизительно в два раза выше, чем рассчитанная согласно (3).

Расхождение может быть связано с погрешностями определения влажности, относительная величина которых достигает 50 % для любого из принятых методов оценки. Для решения подобного рода задач это вполне приемлемое значение. В целом оба результата могут свидетельствовать о корректности используемых методов оценки. Если принять, что образование трещин обязательно сопровождается заполнением их водой, то полученные значения  $W$  по изолиниям могут характеризовать относительное увеличение трещиноватости (пористости).

### Заключение

Результаты исследований на плотине Чиркейской ГЭС свидетельствуют о перспективности применения ИК-съемки как пассивного теплового метода обнаружения зон напряженно-деформированного состояния крупных бетонных монолитов, подверженных воздействию суточных колебаний температуры. Метод исключает необходимость проведения съемки в дневное время, что существенно упрощает обработку данных. Зона неоднородности (НДС) в виде аномалии тепловой инерции бетонного слоя проявляется по разности вечерних и утренних измерений. Глубина зондирования при суточном перепаде температуры 5—10 °С имеет порядок первых десятков сантиметров, что позволяет решать широкий круг практических задач. Кроме качественных выводов о наличии и расположении зон НДС, метод позволяет дать количественную оценку относительной влажности бетонного слоя.

Полученный результат, а также опыт современных разработок в области интерпретации данных ИК-съемки, позволяют надеяться на развитие метода для решения более сложных задач неразрушающего контроля крупных строительных сооружений. Эффективность и конкурентоспособность метода несомненна, учитывая такие его достоинства, как оперативность проведения работ и относительно невысокая их стоимость.

### Литература

1. Вавилов В. П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. — М.: Машиностроение, 1991. — 240 с.
2. Активный тепловой контроль влажных пористых материалов. В. П. Вавилов, П. Бизон, К. Брессан, Э. Гринцато, А. И. Иванов, О. Ковалева, С. Маринетти, О. И. Надавиний // Дефектоскопия, 1991. № 5. С. 80.
3. Kahle Anne B., Alley Ronald E. Calculation of Thermal Inertia from Day-Night Measurements Separated by Days or Weeks // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. January 1985. V. 51. № 1. P. 73.
4. Gauthier F., Tabbagh A. The use of thermal airborne remote sensing for soil identification: a case study in Limousin (France) // Proceedings of IGARSS' 86 Symposium, Zurich, 8—11 Sept. 1986. Ref. ESA SP-254. P. 1231.
5. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съемка. — М.: Недра, 1993. — 128 с.
6. Справочник по инфракрасной технике / Ред. У. Волф, Г. Цисис. В. 4-х т. Т. 1. Физика ИК-излучения // Пер. с англ. — М.: Мир, 1995. — 606 с.
7. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Управления математической физики. Уч. пособие для университетов. — М.: Наука, 1972. — 735 с.

8. Корниенко С. Г., Осипов В. Г. Инфракрасная система экспрессной термосъемки // Приборы и техника эксперимента, 1991. № 4. С. 251.

9. Дульнев Г. Н., Волков Д. Л., Уткин А. Б. Исследование эффективной теплопроводности влажных пористых материалов // Теплофизические свойства индивидуальных веществ и смесей. — г. Махачкала, Даг. ФАН СССР, 1989. С. 51.

10. Тепловой режим осадочных толщ / Х. И. Амирханов, В. В. Суетнов, Р. А. Левкович, Х. А. Гаирбеков. — г. Махачкала. Даг. книжн. изд-во, 1972. — 125 с.

## A DETECTION OF CONCRETE MONOLIT STRAIN ZONES BY THE THERMAL INFRARED SURVEY

*S. G. Kornienko*

Oil and Gas Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*The potentialities of IR-survey as a nondestructive thermal monitoring of concrete monoliths has been demonstrated with dam's water-pape of hydroelectric station. The observations have reveled an area of anomalous thermal inertia, which may be linked to strain zone of concrete layer. The results of a comparison estimation of moisture content within concrete water-pape are given.*