

С. Є. Донець, старший науковий співробітник, к.т.н; В. В. Литвиненко, заст. директора, д.т.н.;
О. А. Мелякова, науковий співробітник; Є. М. Прохоренко, провідний науковий співробітник, д.т.н.;
В. В. Шатов, науковий співробітник (Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України,
м. Харків, Україна)

Особливості врахування фізичних ефектів при термографічному моніторингу стану гідротехнічних споруд

Розглянуто особливості проведення термографічного моніторингу гідротехнічних споруд енергетики. Показана доцільність узгодження процедури моніторингу за розташуванням реперних точок навантажених елементів та розподілу температурних полів на поверхні конструкції. Запропоновано підходи до термографічного моніторингу зони контакту залізобетонної конструкції з водоймищем на основі спостереження за характером турбулізації хвиль. Вказано на вплив внутрішньої структури природних матеріалів - наповнювачів бетону на режими вологонасичення та тепломасообміну

Ключові слова: термографія, гідротехнічні споруди, тепломасообмін, зсувонебезпека, внутрішня структура

Рассмотрены особенности проведения термографического мониторинга гидротехнических сооружений энергетики. Показана целесообразность согласования процедуры мониторинга по расположению реперных точек нагруженных элементов и распределения температурных полей на поверхности конструкции. Предложены подходы термографического мониторинга зоны контакта железобетонной конструкции с водоемом на основе наблюдения за характером турбулизации волн. Указано на влияние внутренней структуры природных материалов - наполнителей бетона на режимы влагонасыщения и тепломассообмена

Ключевые слова: термография, гидротехнические сооружения, тепломассообмен, оползнеопасность, внутренняя структура

The features of thermographic monitoring of hydrotechnical power buildings are considered. The expediency of coordinating the monitoring procedure for the location of the reference points of the loaded elements and the distribution of temperature fields on the surface of structures is shown. Approaches to thermographic monitoring of the zone of contact of the reinforced concrete structure with the reservoir based on the observation of the nature of wave turbulence are proposed. The influence of the internal structure of natural materials - concrete fillers on the modes of moisture saturation and heat mass transfer is indicated

Keywords: thermography, hydrotechnical building, heat and mass transfer, landslide, internal structure

Вступ

Одним з основних еволюційуючих процесів, що передують виникненню незворотніх деформацій (тріщини, сколи, руйнування) гідротехнічних споруд на об'єктах енергетики, таких як греблі, берегові укріплення водойм технічної води, комунікації бризкальних басейнів є осадки, зсуви та підйоми, зумовлені зміною режимів тепломасообміну в навантажених будівлями ґрунтах. Для оцінки стану крупних гідротехнічних споруд на стратегічних об'єктах енергетики, безпечно та стає функціонування яких є важливим не тільки для країни розташування але й для економік та довкілля суміжних країн, необхідно застосовувати системні спостереження. Застосування методів термографічного контролю в системі заходів спостереження дозволяє оцінювати особливості тепломасообмінних процесів, які відбуваються в ґрунтах на макрорівні а також більш коректно проводити моніторинг за осадами та зсувами на макрорівні. В основу багатьох методик для таких спостережень покладено нівелювання. Разом з тим в роботі [1] зазначається, що при проведенні нівелювання є необхідним оцінювати температуру споруди в точках встановлення реперів, оскільки це істотно впливає на точність проведення вимірювань. В роботах [2,3] було запропоновано підходи та методи до застосування засобів термографічного моніторингу при оцінці зсувонебезпеки гідротехнічних споруд. Також в роботі [2] зазначалась необхідність врахування особливості розподілу температури в окремих елементах ґрунту, які служать наповнювачами.

Постановка задачі

Таким чином, при спостереженнях за станом крупних гідротехнічних споруд енергетики постає задача створення методики, яка б поєднувала інструментарії нівелювання, термографічного контролю, структурних досліджень стану матеріалів.

Прилади та експериментальні методи.

Термографічні вимірювання проводились на гідротехнічних об'єктах України. Вимірювання теплових полів здійснювались термографічними камерами LAND-814 (температурне розрізнення 0,08 К) та Fluke 32 Ti (температурне розрізнення 0,05 К). Растрові електронні вимірювання зразків пісковика проводились на мікроскопі JEOL-840. З метою надання зразкам електропровідних властивостей на їх злами було нанесено вуглецеве покриття.

Термографічний моніторинг берегових конструкцій

Беручи до уваги, що ознакою найбільшої небезпеки, є саме анізотропність переміщень елементів споруди, виникає задача оцінки суцільного поля температури спостережуваного об'єкту, оскільки через можливу нерівномірність зволоження виникають відмінності температурних характеристик. З подальшим проведенням кореляційного співставлення для заданого часу спостереження t зміщень i -го репера $\Delta L(x, y, t)$ в просторі з відмінностями в значенні температури $\Delta T_i^R(t) = T_i^R(t) - T_i^R(t_0)$ в околі встановлення репера, які зафіксовано порівняно з часом t_0 , який відповідає попередньому спостереженню. Окрім визначення температури в зоні вертикалі встановлення реперів необхідно визначати відмінності температури ґрунту $\Delta T_i^G(t) = T_i^G(t) - T_i^G(t_0)$, його зволоженість P_i , фізико-хімічні властивості Q , рівень розташування ґрунтових вод H . Таким чином, в результаті системних спостережень одержується залежність осадки або зсуву спостережуваного об'єкту від низки факторів в тому числі абсолютних значень температури T_i^R , значень їх динамічної зміни від спостереження до спостереження ΔT_i^R , значень роз-

біжностей температури між реперами ΔT_{Δ}^R , температури ґрунту, градієнтів розподілу температури на поверхні об'єкту $\nabla T(x,y)$, які можуть бути оперативно одержані з термограм. Тепловізійний прилад при цьому має встановлюватись на точках, з яких здійснюється нівелювання, фіксуючи при цьому також азимутальний кут з якого одержується термограма. Оскільки одержувані дані містять як системні так і випадкові похибки, до їх оцінки доцільно застосовувати елементи математичної статистики, такі як математичне очікування M та дисперсія D .

Здійснивши n циклів вимірювань для параметрів p , знаходяться коефіцієнти парної кореляції $K_{p_1 p_2}$ вимірюваних величин [4].

$$K_{p_1 p_2} = \frac{\sum_{n=1}^N (p_{1n} - \bar{p}_1)(p_{2n} - \bar{p}_2)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (p_{1n} - \bar{p}_1)^2 \sum_{n=1}^N (p_{2n} - \bar{p}_2)^2}},$$

$$\bar{p}_1 = \sum_{n=1}^N \frac{p_{1n}}{N} \quad \bar{p}_2 = \sum_{n=1}^N \frac{p_{2n}}{N}$$

Встановивши кореляційний зв'язок між вказаними вище параметрами визначається вплив кожного з них на виявлене зміщення репера. Наявність кореляційного зв'язку визначається з умови $\rho \geq 3 \frac{1-\rho^2}{\sqrt{n-1}}$, де $\rho = \frac{K_{p_1 p_2}}{\sqrt{D_1 D_2}}$.

Необхідність застосування інструментів дистанційного температурного контролю підтверджується проведеними польовими дослідженнями. На рис.1 зображена термограма споруди на каналі технологічної води. Термограма зроблена восени в сонячний день.

Як видно, розподіл температурного поля на поверхні аналогічних елементів споруди не є однаковим, отже можлива реалізація термопружного ефекту [5, 6], який в даному випадку становить інтерес як механізм деформації арматури в бетоні та прояву між ними можливих відшарувань. Як зазначається в [7] термографічні методи застосовуються саме для оцінки стану бетонних споруд атомних електростанцій.

Окремого розгляду потребує питання періодичності здійснення тепловізійної зйомки. Відомо, що сучасні методи аналізу термограм передбачають проведення частотного аналізу теплових хвиль, які відтворюють в поверхневому шарі просторово-часове коливання температури, зумовлене зовнішнім модульованим впливом.

Проведення пошарового аналізу досліджуваного об'єкту забезпечується можливістю управління довжиною теплової хвилі $\lambda = 2\pi\mu$ [5], де μ - довжина теплової дифузії, яка визначається виразом

$$\mu = \sqrt{2k / 2\pi f \rho C} = \sqrt{2\alpha / \omega}, \quad (1)$$

де k - коефіцієнт теплопровідності;

ρ - густина;

C - питома теплоємність;

α - коефіцієнт температуропровідності;

$\omega = 2\pi f$, f - частота зовнішніх температурних коливань.

Оскільки основним джерелом коливань теплових впливів є добові та річні коливання температури оточуючого середовища, періодичність термографічних спостережень доцільно узгоджувати саме з цими циклами.

Опосередкований термографічний моніторинг стану підводних конструкцій.

Інформативність тепловізійного зображення зумовлена можливістю виявлення місць більш об'ємного зволоження прибережної ділянки, яка виникає внаслідок руйнування підводної частини або ж втрати захисної здатності конструкціями. Зазначимо, що хоча підводний огляд і передбачений правилами експлуатаційного контролю, але його проведення здійснюється значно рідше, з причин очевидної складності до того ж його наочність є об'єктивно обмеженою. Однак тепловізійний контроль дає можливість здійснювати також спостереження за особливостями гасіння кінетичної енергії води при контакті з береговою або водоприймальною спорудою. Так, зокрема, зазначається, що поява крупних всплесків та бурунів в певному місці може служити ознакою пошкодження поверхні, яку обтікає вода. Додатковою тепловою ознакою порушення є порівняння різниці температур дзеркальної поверхні води – до зіткнення з перешкодою і після зіткнення, коли вона стає насиченою повітрям – «аерується», що природно призводить до зміни її радіаційної температури. Причинами цієї зміни можуть виступати дві складові - це зміна коефіцієнта випромінювання внаслідок аерації та більш інтенсивного перемішування з глибинними шарами внаслідок кавітації. Саме останнє явище є відповідальним за руйнівні процеси гідротехнічних споруд і його ідентифікація є однією з задач неруйнівного експлуатаційного контролю.

Так, наприклад, як видно з термограми (рис.3), аерація води в місці биття об берегову лінію водосховища, укріплену бетонними плитами має досить виразний те-

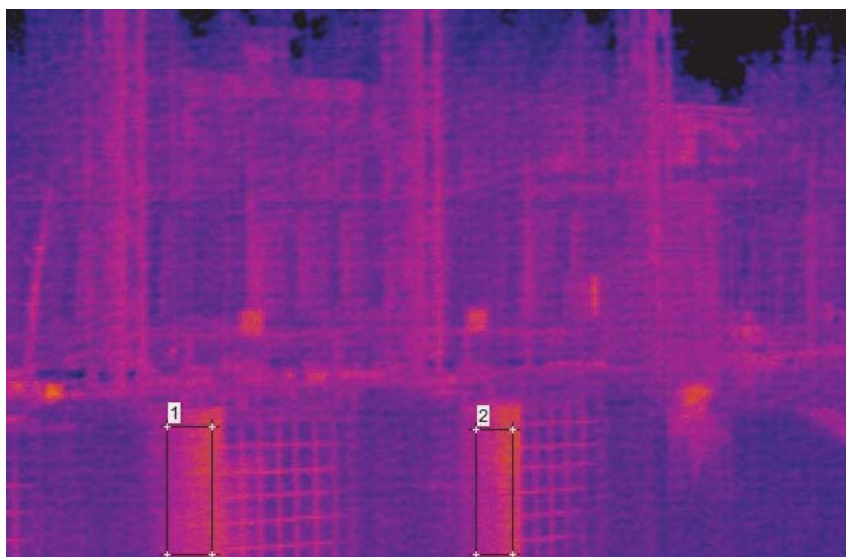


Рис. 1. Термограма греблі каналу технологічної води. температура на виділені ділянки 1 і 2.

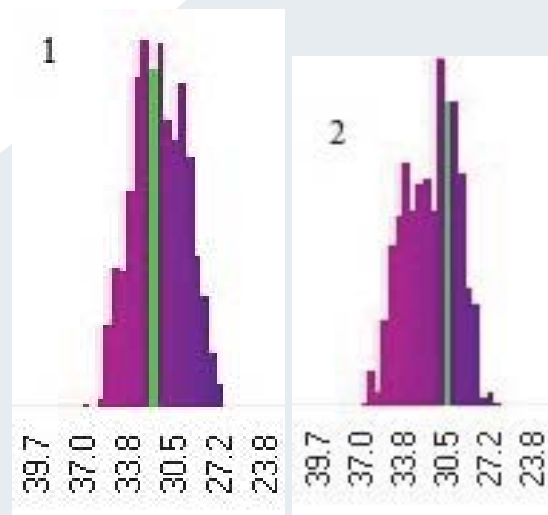


Рис. 2. Статистичний розподіл поля температури на виділені ділянки 1 і 2.

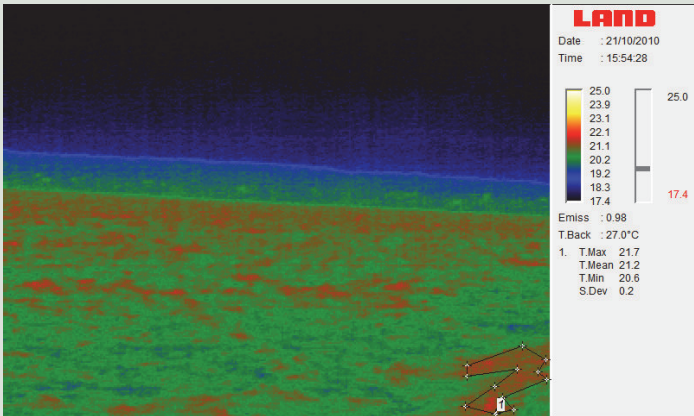


Рис. 3. Термограма (зліва) та відео зображення (справа) водної поверхні водоймища.

температурний прояв (виділений на рисунку контуром).

Такий самий температурний прояв мають гребні хвиль. На рис.4 наведено термограму, що містить три температурних діапазони: 19,6–20,0 °С – зелений колір; 20,1–21,0 °С – бузковий колір; 21.1–21.8 °С – бірюзовий колір.

Слід очікувати, що кавітація зумовлена руйнуванням схованої під водою частини матиме також явний температурний прояв, і, таким чином, доцільно вести як візуальне спостереження за наявністю бурунів, як на це вказує документ [8], так і з застосуванням засобів ІЧ-радіометрії. Спричинена руйнуванням підводної частини б'єфу шорсткість зумовлює виникнення турбулентності в потоці водної маси а отже більш інтенсивне руйнування укріплюючою споруди. Вплив шорсткості δ , (фактично глибини виникаючих каверн та западин) на втрату кінетичної енергії потоку визначається також товщиною в'язкого підшару d . Внесок шорсткості у втрати кінетичної енергії потоку стають визначальними коли величина шорсткості перевищує товщину в'язкого підшару. Доцільність застосування ІЧ-радіометричних методів до оцінки інтенсивності тепломасообміну на поверхні поділу вода-повітря підтверджується результатами робіт [9,10], де з застосуванням примусового нагрівання поверхні води лазером, спостерігали за просторовим розподілом поля швидкостей води в околі гребня хвилі. Температура поверхні води визначалась авторами [9], виходячи з виразу

$$T(x, y, t) = T_0 \int_0^{\infty} e^{-\beta \frac{((x-x_0)-Gz)^2}{\sigma^2}} dz,$$

де β - коефіцієнт проникнення нагріваючого випромінювання,

$G = dU / dz$ - градієнт поля швидкостей рідини,

σ - член, що враховує ширину кривої Гаусса точкового джерела нагрівання.

Задача оцінки ознак теплового прояву на поверхні водного дзеркала кавітаційних процесів повинна також враховувати аналіз особливостей масо переносу в прибережній зоні басейну а також в його об'ємі. Найбільш інтенсивно це відбувається в умовах збільшення різниці донної температури та температури довкілля. Так за даними роботи [11] при описі гідрофізичних характеристик водоймищ необхідно враховувати ефекти вертикального пе-

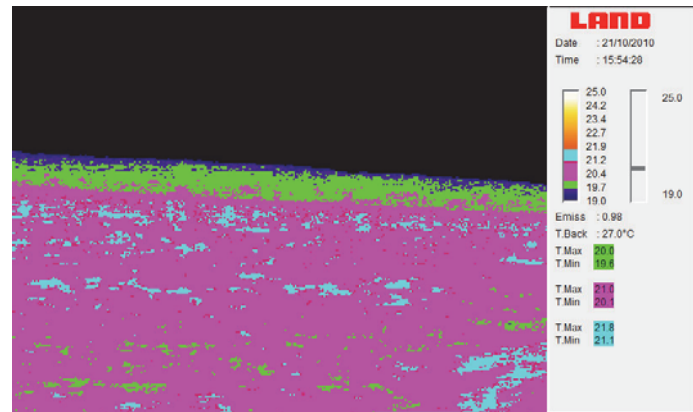


Рис. 4. Термограма водоймища з розбивкою на температурні інтервали.

ремішування та оцінки просторового розподілу вертикальної структури потоку.

Урахування структури матеріалів будівельних конструкцій

Здійснюючи термографічний моніторинг стану конструкцій, що споруджені в береговій зоні водойм або безпосередньо контактують з вологою слід розуміти, що вони не є гомогенними і складаються з цементу, наповнювача, як правило щебеню різної фракції та арматури. Оскільки для матеріалів цих споруд є властивими інтенсивні процеси тепломасопереносу, для коректності інтерпретації досліджень, що проводяться, доцільно знати особливості теплофізичних властивостей складових матеріалу конструкції.

Для перевірки впливу цих відмінностей на процеси теплообміну нами були вибрані пластини двох зразків пісковика. Відмінність їх внутрішньої будови була як наочною, так і підтверджена результатами растрової електронної мікроскопії рис. 5. Видно, що на зразку зліва будова є більш пластинчастою, тоді як зразок справа має більш виразну зернисту будову.

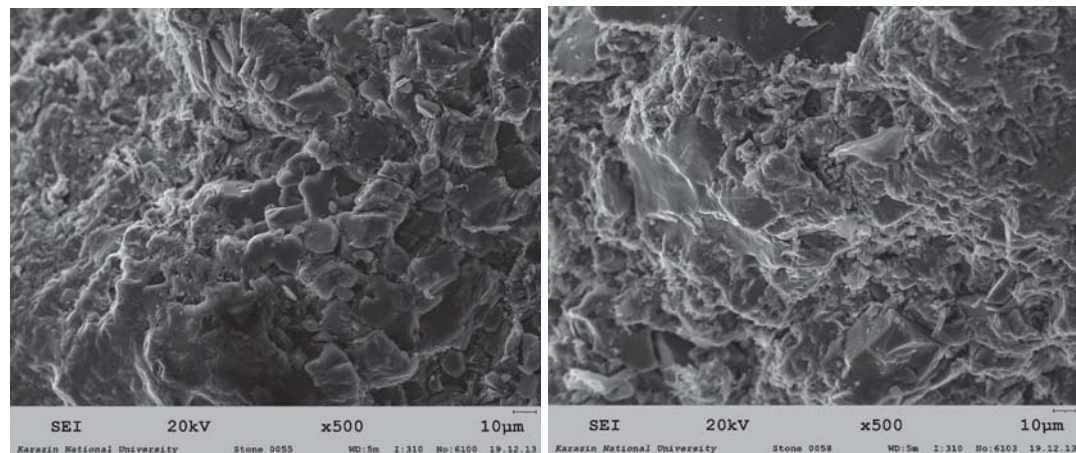


Рис. 5. Структура зламів двох зразків пісковика.

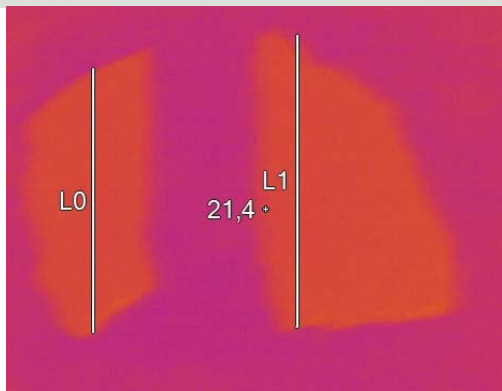


Рис. 6. Термограма пластин пісковику (зліва) з розподілом температури вздовж ліній (справа).

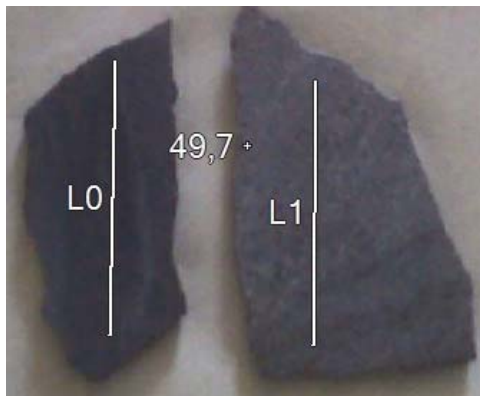
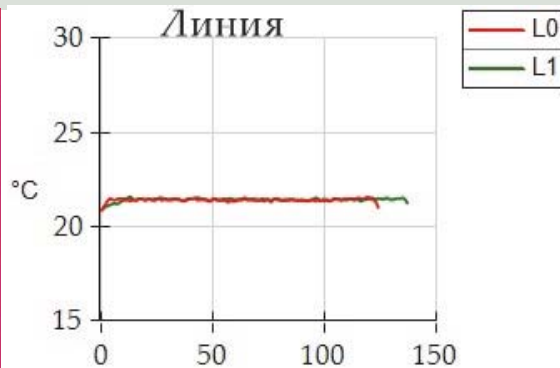
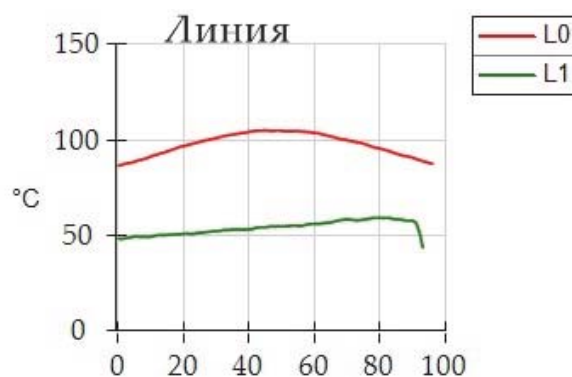


Рис. 7. Термограми зразків пісковику після НВЧ нагріву та розподіл температури вздовж ліній.



Нами було зроблено низку термограм цих пластин в термодинамічно рівноважних умовах рис.6. Як видно пластини мають однаковий коефіцієнт випромінювання і однакові значення радіаційної температури.

З метою створення умов тепловобміну зразки витримувались протягом години у воді після чого піддавались рівномірному НВЧ опроміненню протягом 30 сек і одержувались термограми рис. 7.

Як видно з рис. 7 температура зразків є відмінною, що може пояснюватись різними значеннями водомісткості, адже діелектрична проникність води значно більша за проникність пісковику. Це в свою чергу свідчить про те, що за сприятливих умов для зволоження, ми можемо спостерігати різну динаміку зміни температурного поля на об'єкті контролю. Для реалізації термографічних методик це є важливим з точки зору необхідності урахування відмінностей процесу тепло масообміну в матеріалах, що контактують з ґрунтовими водами, безпосередньо занурені в воду та зволожуються осадами.

Висновки

Під час проведення спостережень за зсувами та переміщеннями гідротехнічних споруд доцільно застосовувати термографічні прилади, що дозволить більш коректно урахувати вплив температурних полів на переміщення реперних точок та більш об'єктивно і оперативно встановлювати механізми виникнення руйнівних процесів. При цьому важливим чинником також є інформація про мікроструктуру будову природних та насипних ґрунтів, яка впливає на режими волого переносу. Істотним активуючим чинником також виступають природні температурні цикли – добові та сезонні, які також доцільно враховувати як інструмент модуляції температурного поля.

Література

1. В.Н.Ганьшин, Стороженко, Гуньков и др.. Геодезические методы измерения вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов.-М.Недра-

1991.-190 с

2. М.І.Базалеев, Б.Б.Бандурян, С.С.Донець, В.Ф.Клепиков, В.В.Литвиненко, О.Г.Лисиченко Є.М.Прохоренко / Розробка термографічних методів діагностики та контролю стану матеріалів гідро технічних споруд // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист.-в.12.-2017.-с.38-43

3. М.І.Базалеев, Б.Б.Бандурян, І.Б.Воробйов, В.Ф.Клепиков, О.Г.Лисиченко / Тепловізійний метод оцінки зсувонебезпеки в зоні розташування гідротехнічних споруд енергетичного комплексу // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист.- в.5.-2012.-с.88-94

4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976.

5. W.Thomson (Lord Kelvin): "On the dynamical theory of heat". Trans.Roy.Soc. Edinbourg, 20. 1853

6. Favro L.D., Hav X., Thermal wave Material Characterization and Thermal Wave Imaging in Sensing for Materials Characterization, Processing and Manufacturing, Birnbaum G., Auld B.A. eds., ASNT TONES 1:399-415,1998.

7. Naus, Dan J. (May 2009). Inspection of Nuclear Power Plant Structures - Overview of Methods and Related Applications (ORNL/TM--2007/191). United States

8. Стандарт ОАО РАО "ЕЭС России" СТО 17330282.27.140.003-2008 "Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования".

9. C. S. Grabe, A.Heinlein Friction velocity from active thermography and shape analysis // Fdvanced Measuring Technics.-2011.p.535-543

10. C.S.Garbe, H.Spies, B.Jahne Estimation of surface flow and net heat flux from infrared image sequences// J.Math.Imaging and vision.-2003.-19(3).-p.159-174.

11. Шлычков В.А. Исследование вертикального переноса плавучей примеси в водоеме с помощью вихре-разрешающей модели. Оптика атмосферы и океана, 2001. Т.14. N 6 7. С.633-636.