

**М.І. БАЗАЛЄСВ¹, Б.Б. БАНДУРЯН¹, В.Ф. КЛЕПІКОВ¹, О.Г. ЛИСИЧЕНКО²,
В.В. ЛИТВИНЕНКО¹, І.Б. ВОРОБІЙОВ¹**

¹ Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, м. Харків

² ДУ Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України, м. Київ

ТЕПЛОВІЗІЙНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ЗСУВОНЕБЕЗПЕКИ В ЗОНІ РОЗТАШУВАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

Охарактеризовано тепловізорний метод оцінки стану безпеки зсуву ґрунтових масивів гідротехнічних споруд, доведено його ефективність, а також визначений порядок виявлення зсувонебезпечних зон за даними тепловізійного обстеження.

Вступ

Інтеграція української енергетичної системи до європейської енергетичної мережі висуває вимогу до підвищеного рівня безпеки експлуатації, надійності та безпечності впливу на довкілля. Гідротехнічні споруди (ГТС), як важлива ланка в генерації, розподіленні та маневруванні енергетичними потоками, є складним об'єктом, у якому взаємопов'язані технологічні, геологічні, кліматичні та метеорологічні чинники, кожен з яких здатен бути визначальним у забезпеченні безпеки експлуатації. Наявний доробок у сфері стандартів, що регулюють різні аспекти експлуатації гідротехнічних споруд [1], свідчить про те, що застосовуваний перелік методик та контрольно-вимірювальної апаратури не є вичерпним, а до кожного гідротехнічного об'єкту складається програма спостережень, якою визначається перелік і схема розміщення контрольно-вимірювальних приладів, методики обробки здобутих результатів. Виконання робіт з оцінки стану гідротехнічних споруд в нестандартних ситуаціях, наприклад, на стадії пускових робіт, надлишкового повеневого навантаження, інтенсивних опадів, різких перепадів температури тощо передбачає залучення науково-дослідних установ. Слід зазначити, що проведення робіт зі спостереження за станом устаткування та капітальних споруд в таких умовах передбачає необхідність високої експресності та оперативності проведення вимірювальних робіт і обробки здобутих результатів. Важливою умовою є узгодженість та доповнюваність застосовуваних методик з вимогами до проведення обов'язкових спостережень.

На теперішній час одним з напрямків проведення діагностики та контролю за станом технологічного обладнання, довкілля, геофізичних та геологічних процесів є інфрачервона (ІЧ) радіометрія. Інтенсивний розвиток цієї методики зумовлений високою інформативністю діапазону (3-5 мкм та/або 8-14 мкм), що реєструється, і безконтактністю вимірів, можливістю вибору масштабу спостережень (регулюється зміною просторового розрізнення від десятків мікрометрів до сотень метрів), а також створенням в останні роки чутливих неохолоджуваних детекторів ІЧ – діапазону з високою температурною чутливістю (близько 0, 025 К) та наявністю стандартних пакетів програм для аналізу одержаних вимірювань. Застосування технологій контролю на основі ІЧ-радіометрії в тій чи іншій галузі стримується відсутністю напрацьованої науково-методологічної бази, яка ґрунтується на знаннях теплофізичних процесів, що відбуваються в об'єкті контролю під впливом техногенних та природних чинників, а також чітко сформульованих рекомендацій і алгоритмів проведення моніторингу в умовах експлуатації об'єктів.

Технологія тепловізійної ІЧ-радіометрії набула найбільшого поширення в галузі

діагностики електротехнічного обладнання, разом з тим перелік її використання для контролю об'єктів гідроенергетики є значно ширшим. Так, можливість використання тепловізійної техніки для оцінки стану земляних гребель (плотин) вказується в роботах [2,3], зокрема, для виявлення в них місць напірної фільтрації. Для ідентифікації місць напірної фільтрації в залізобетонних конструкціях нами було запропоновано метод [4], в якому описана процедура проведення зйомок, запису та збереження інформації і її подальшого аналізу. Істотним залишається конкретизація та деталізація особливостей проведення тепловізійного моніторингу стосовно виявлення місць потенційних зсувів ґрунтів, ділянок ерозії ґрунтів, дефектних зон в залізобетонних конструкціях, усунення фільтрації тощо. Суттєво інформативним вимірювання розподілу температурного поля стає в режимі встановлення кореляційних залежностей між процесами, що спостерігаються, наприклад, розкриттям деформаційних швів в залізобетонних конструкціях, інтенсивності фільтраційного потоку, розподілу температури в потоці води, рівня води тощо.

Невід'ємною частиною тепловізійного моніторингу є глибокий системний аналіз впливу різних техногенних і геологічних процесів на стан ГТС і умов виникнення екологічної погрози, факторів зміни ІЧ-випромінювання в області зон підвищеної фізико-хімічної активності, обводненості, аномалій сполучень ґрунтів, матеріалів споруд та ін., які повинні ґрунтуватися на тісному зв'язку і взаємозумовленості випромінюючих і відбивних характеристик поверхні об'єкта контролю з його поверхневою та внутрішньою будовою і станом.

Методологія застосування тепловізійного моніторингу доповнює наявні стандартні підходи до спостереження за станом гідротехнічних споруджень енергетичного комплексу, узгоджується з ними та забезпечує в комплексі з ними істотно більшу безпечність споруди, експлуатація якої відбувається в умовах процесів зниження міцності та стійкості елементів конструкції. Контроль температурного режиму ГТС спрямований на вирішення таких задач, як визначення температурної складової (температурного градієнту) в розкритті міжсекційних будівельних швів (деформаційних швів) і тріщин, переміщень і напруг в основі і тілі споруджень, процесів консолідації ґрунту і напруг у кістяку ґрунту, укосах і гребні греблі, виявлення виходів фільтраційних вод на низовому укосі греблі і у нижньому б'єфі з підстави греблі, у примиканні до бетонних споруджень і в берегових примиканнях, стану ущільнення між плитами кріплення, а також вимиву ґрунту з-під плит, їхнє осідання і т.п.

Окрім вибору оптимальних умов для тепловізійної зйомки і формування пошукових критеріїв, необхідно на момент обстеження визначити конструкційні температурні неоднорідності споруди і її "еталонне" теплове зображення, яке відповідає проектним даним тепловізійного обстеження. Опорні теплотехнічні виміри і тестування в декількох аномальних і нормальних зонах підсилюють достовірність і інформативність результатів тепловізійного обстеження.

Тепловізійний метод оцінки стану безпеки зсуву ґрунтових масивів гідротехнічних споруд

Однією з причин та ознак виникнення аварійної ситуації на ГТС є можливі обвали та зсуви схилів у водосховище з утворенням високих хвиль, виникнення надмірної фільтрації в районі розташування гідровузла, фундаментів та з'єднань гідротехнічних споруд.

Перспективність застосування тепловізійного контролю для оцінки міцнісних властивостей ґрунтів та одержання інформації про їх стан на основі спостереження рослинного покриву зумовлена засадами, викладеними в роботах [5,6]. Вимірювання

розподілу температури на поверхні ґрунтового масиву може виявитись вельми інформативним параметром, який дасть змогу, наприклад, оцінити водомісткість ґрунтового масиву або спрогнозувати координати локалізації внутрішніх механічних напружень і в подальшому оцінити їх тиск на розташовані всередині масиву конструкції. Застосування тепловізійного спостереження необхідно проводити в узгодженості з візуальними спостереженнями, які є невід'ємною складовою експлуатаційного контролю. Ділянки схилів, які містять ознаки ерозійних процесів фіксуються фотоапаратурою із застосуванням геодезичної апаратури (дальноміри, теодоліти тощо), яка дозволяє створювати карту потенційно небезпечних ділянок. На рис. 1 наведено фотографію схилу над технологічним тунелем при будівництві Новодністровської гідроакумулюючої станції. Візуально достатньо добре простежуються ознаки оголеного від рослинного покриву ґрунту.



Рис. 1. Відеозображення схилу ґрунтового масиву, всередині якого розташовані водоводи гідроакумулюючої електростанції

Так, особливу увагу викликає ділянка над склепінням технологічного тунелю, оскільки вона підпадає під дію стискаючих напружень, та може бути місцем локалізації вологи, яка витискається з об'єму розташованої вище ґрунтової маси. Оскільки теплофізичні характеристики більш зволоженого ґрунту будуть відрізнятись від сухої породи, це буде проявлятись на теплових картах при проведенні тепловізійної зйомки в періоди зміни температури довкілля, наприклад, у ранішній або у вечірній час, якщо досліджується схил, орієнтований на схід або на північ. Одержувана послідовність термограм дає можливість аналізу динаміки температурного поля із застосуванням стандартних програмних пакетів, якими комплектуються тепловізори. Так, на рис. 2 наведено дві термограми, що були одержані в різний час протягом однієї доби, причому в проміжку часу між їх одержанням не спостерігалось зміни швидкості вітру та випадання осадів. На термограмах видно, що вже згадувана ділянка над склепінням технологічного тунелю містить зони з відмінними значеннями температури. Так, ділянка з більш низькою температурою виділена контуром 1, тоді як решта площі на ділянці 2 має більш високу температуру. При цьому слід зазначити, що рослинний покрів однаково відсутній в обох зонах, тобто коефіцієнт випромінювання і альbedo є однаковими на досліджуваних ділянках. Разом з тим методологія застосування тепловізійної техніки має передбачати співставлення проявів рослинності при візуальному та тепловому спостереженні, оскільки наявність або відсутність рослинності є ознаками ерозійних процесів.

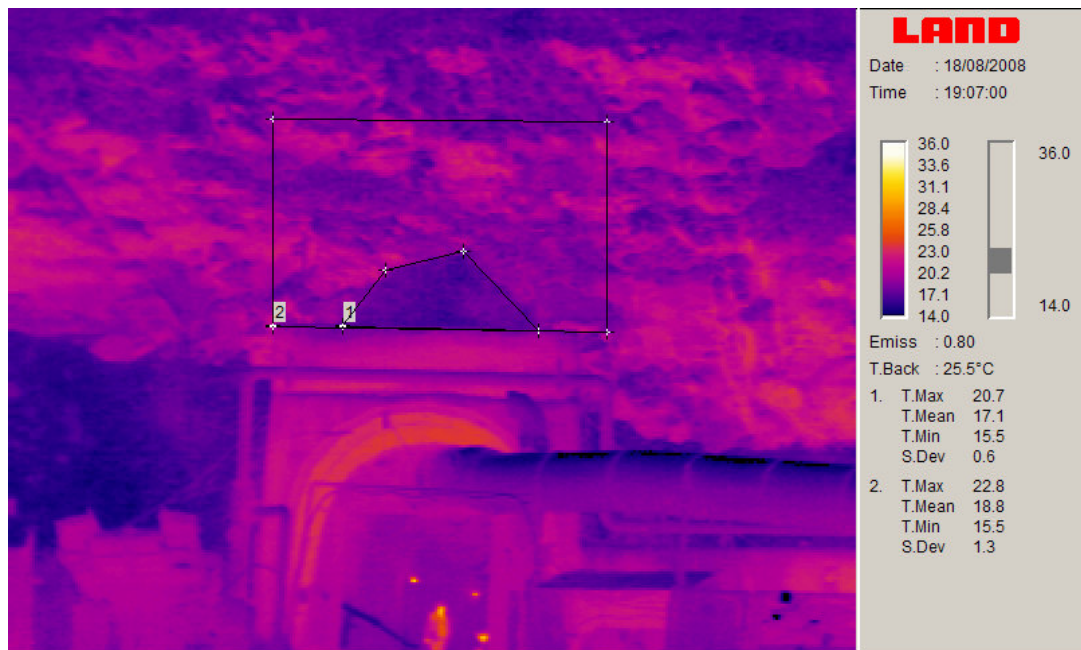


Рис. 2. а) Термограма схилу, одержана за київським часом в 19-07

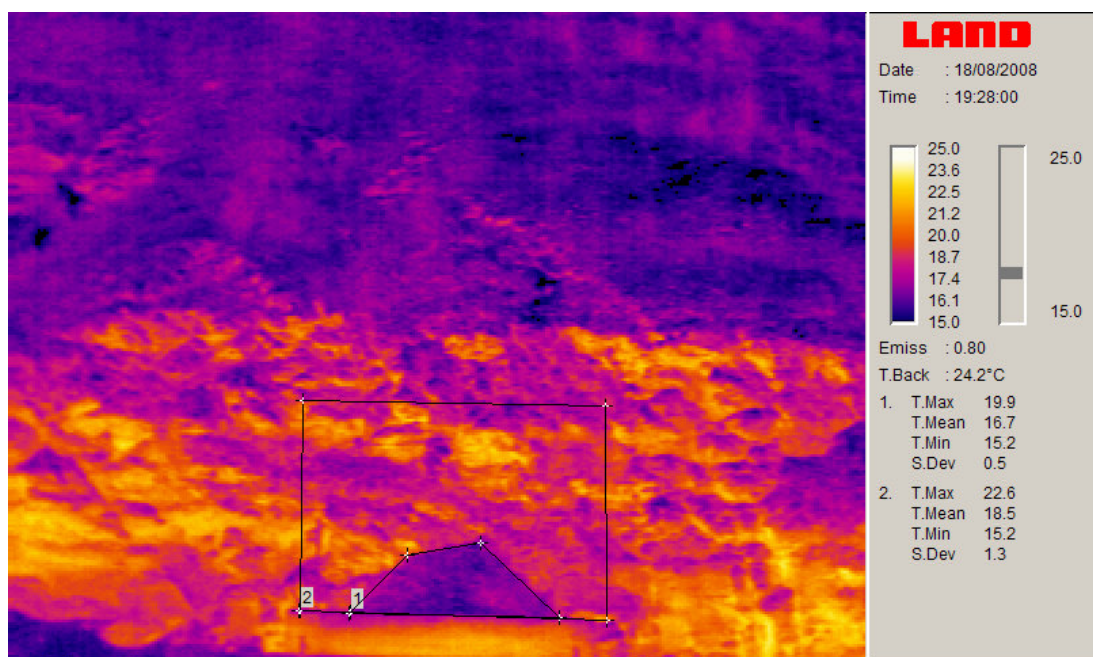


Рис. 2. б) Термограма схилу, одержана за київським часом в 19-28

Відомо, що ерозійні процеси та порушення рівноваги внаслідок збільшення діючих навантажень та зменшенні внутрішнього опору є причинами порушення стійкості ґрунтів [7]. Для ерозійних процесів властива повільність протікання та залежність від геофізичних та метеорологічних факторів. В умовах експлуатації суттєву роль мають також техногенні фактори. Не зважаючи на те, що місця переважного протікання ерозійних процесів є достатньо очевидними при візуальному огляді, карти розподілу температурного поля на поверхні та, зокрема, гістограми розподілу температур на ділянках, що аналізуються, можуть дати додаткову інформацію при проведенні оціночних розрахунків. Місця впливу механічних навантажень на схили, зумовлені надлишковим вмістом накопичуваної води візуально не ідентифікуються, але їх можна виявити шляхом аналізу термограм. Для прикладу розглянемо гістограми розподілу температури (рис. 3.) на ділянці 1 рисунку 2.

Як видно зі значень мінімальної, максимальної та переважаючої температури, за проміжок часу в 21 хвилину відбулось охолодження ділянки приблизно на 0,4 °С, що є цілком природнім, оскільки знижувалась температура довкілля (зміни напрямку вітру або випадання осадів за цей проміжок часу не відбувалось). Дати висновок про відмінність процесів теплообміну на ділянці 1, а отже про ймовірну перенасиченість вологою и схильністю до зсуву можна на підставі порівняння з гістограмами розподілу температури на ділянці 2. В першу чергу необхідно співставити значення переважаючих температур на досліджуваних ділянках. Наступним кроком є оцінка рівномірності розподілу температур по поверхні, що видно по величині питомої ваги переважаючої температури у гістограмі. Більш високе значення питомої ваги переважаючої температури може свідчити про перевагу механізмів охолодження шляхом випаровування надлишкової вологи на зсувонебезпечній ділянці.

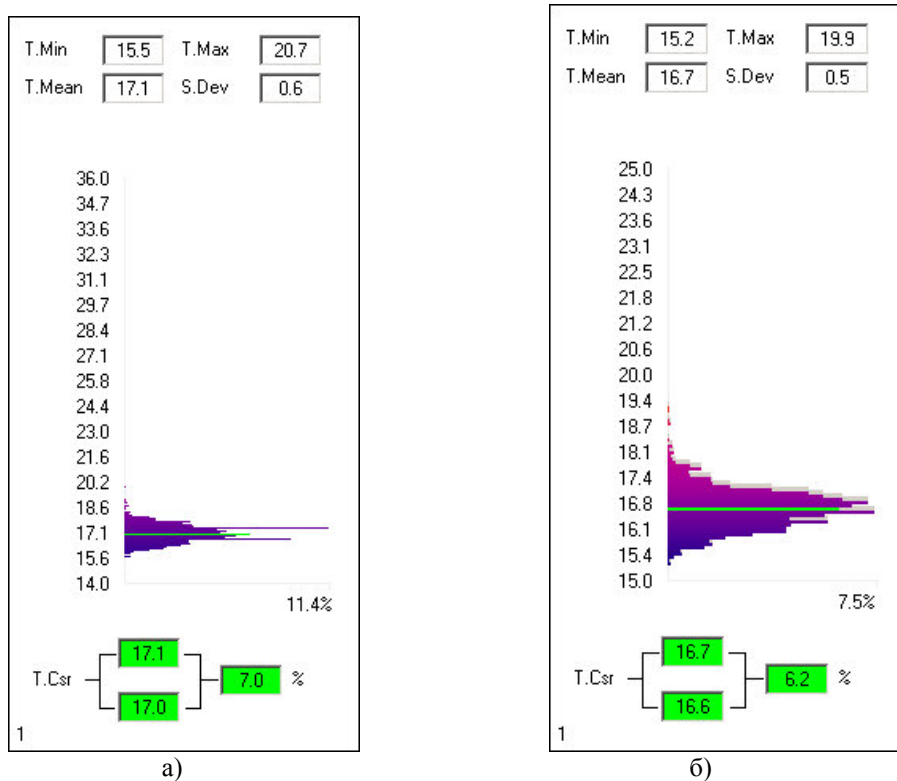


Рис. 3. Гістограма розподілу температури на ділянці 1 поверхні схилу: а) значення для часу 19-07; б) значення для часу 19-28

Порівнюючи гістограми ділянки 2 (рис. 4.), бачимо, що значення переважаючої температури змінилось на меншу величину, ніж на ділянці 1. Тоді як питома вага переважаючої температури є на ділянці 2 значно меншою, до того ж для неї властивий більш широкий діапазон розкиду значень температури, що говорить про нерівномірність процесу охолодження, зумовленою неоднаковими режимами природного теплообміну поверхневих шарів з основним масивом ґрунту. Порівняння значень гістограм ділянки 2 на рис. 4.(а) та 4 (б) показує, що мінімальна, максимальна та переважаюча температури змінились майже на одну й ту саму величину, тобто динаміка зміни температури на ділянці 1 виявилась дещо знівельованою помітнішими швидкостями охолодження при її включенні до площі ділянки 2.

З'ясовані шляхом аналізу термограм контури ділянок схилу з відмінними режимами теплообміну дають підставу розглядати їх такими, де більш ймовірно очікувати зсуву. В разі доступності згаданої ділянки, доцільно також провести безпосереднє вимірювання вологості, оскільки її величина дасть змогу оцінити навантаження на небезпечній ділянці схилу.

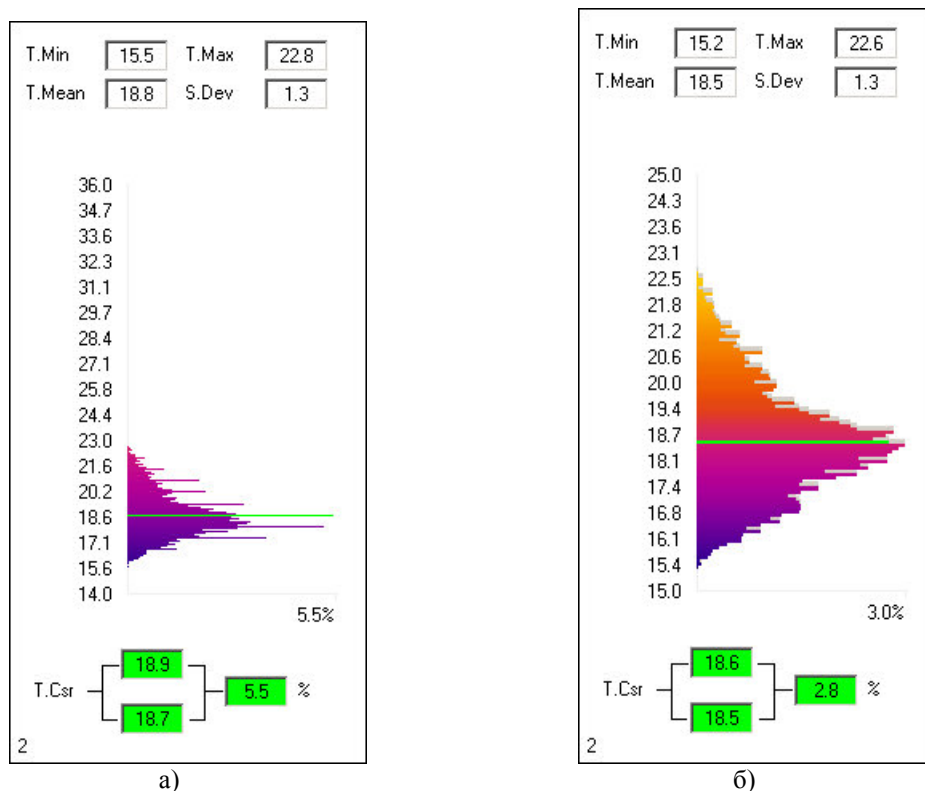


Рис. 4. Гістограма розподілу температури на ділянці 2 поверхні схилу: а) значення для часу 19-07; б) значення для часу 19-28

За даними роботи [7] рівняння рівноваги ґрунту записується як умова рівності нулю моменту утримуючих сил $F_k = P \sin \alpha_k$ та зсовуючих сил $N_k = P \cos \alpha_k$, P - значення ваги умовного вертикального k -го відсіку ґрунту, α_k - кут між напрямком P та нормаллю до радіуса дуги ковзання.

$$\sum F_k R - \sum N_k \operatorname{tg} \varphi R - cLR = 0,$$

де R - радіус дуги ковзання, φ - кут внутрішнього тертя, c - питоме зчеплення ґрунту, L - довжина дуги ковзання.

Так, при застосуванні до визначення стійкості ґрунту методу круглоциліндричних поверхонь ковзання [7], необхідно передбачити координати дуги ковзання. Оскільки зсув, що спричиняється опадами, відбувається по межі поділу зволжених і не зволжених ґрунтів, саме аналіз гістограм в часі може допомогти встановити межі площини ковзання та інші розрахункові параметри, адже теплофізичні характеристики водонасичених шарів будуть відмінні від «сухого» ґрунту. Тобто ми можемо розглядати динаміку температурного поля на поверхні, яка буде відображати особливості структури ґрунтів вглибині масиву.

Обрахунки поширення теплових хвиль всередині неоднорідних ґрунтових масивів здійснено в роботі [8], а внесок у виникнення температурних градієнтів в при перетині тепловою хвилею поверхні поділу двох шарів визначається коефіцієнтом відбиття теплової хвилі, який залежить від значень теплоємності та теплопровідності суміжних шарів. На рис. 1 а, б видно, що місця вздовж проміїни на схилі відрізняються більш високою температурою, таким чином даним ділянкам будуть властиві інші режими вологонасичення та випаровування а, отже, ці ділянки можна віднести до таких, що становлять потенційну загрозу локальних зсувів.

Порядок виявлення зсувонебезпечних зон за даними тепловізійного обстеження

- 1) Виділити на досліджуваній поверхні ділянки з ознаками ерозії, зокрема,

відсутнім рослинним покривом.

2) Провести в нічний або вечірній час спостереження за динамікою температурного поля на ділянках, зазначених у п.1.

3) Виділити на зазначених у п.1. ділянках зони з відмінними значеннями температури.

4) Провести на потенційно зсувонебезпечних ділянках вимірювання значень вологості.

5) З використанням лазерного дальноміру визначити кут нахилу та обчислити об'єм ґрунту, що становить небезпеку зсуву.

6) Обчислити величину збільшення зсовуючих сил внаслідок перезволоження зсувонебезпечної ділянки

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

2. Канарчук В.Е. Бесконтактная диагностика машин. /В.Е. Канарчук, А.Д. Чигринец / М: Машиностроение. – 1987. – 160 с.

3. Жуков А.Г. Тепловизионные приборы и их применение / А.Г. Жуков, А.Н. Горюнов, А.А. Кальфа: под. ред. Н.Д. Девятова – М.:Радио и связь, 1983. – 216 с.

4. Пат. на корисну модель №40608, Україна Спосіб діагностики стану бетонних гідротехнічних споруджень, які знаходяться під впливом напірної фільтрації / Базалєєв М.І., Клепиков В.Ф., Литвиненко В.В., Лисиченко О.Г. та ін. – опубл. 2009. Бюл 8.

5. Базалєєв Н.И. Дистанционное ИК-радиометрическое исследование открытых кимберлитовых тел. / Н.И. Базалєєв, Г.Д. Балакшин, Б.И. Веркин и др. – (Препринт ФТИНТ АН УССР). – 1980. – 12 с

6. Базалєєв Н.И. / Применение дистанционной ИК-съёмки для геологического картирования, поисков нефтегазоносных структур, кимберлитовых тел и экономическая оценка перспектив ее применения / Н.И. Базалєєв, Б.И. Веркин, А.Г. Андреев и др // Сборник «Тепловое поле Земли».-Махачкала. – 1979. – 234 с.

7. Цытович Н.А. Механика ґрунтов .-М. «Высшая школа». – 1979. – 272 с.

8. Karam M.A.A Thermal wave approach for heat transfer in a nonuniform soil// Soil.Sci.Soc.Am.J. 64:1219-1225 (2000)

М.И. Базалєєв, Б.Б. Бандурян, В.Ф. Клепиков, А.Г. Лисиченко, В.В. Литвиненко, И.Б. Воробьев

ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ОПОЛЗНЕВОЙ ОПАСНОСТИ В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Охарактеризован тепловизорный метод оценки состояния безопасности смещения ґрунтовых массивов гидротехнических сооружений, доказана его эффективность, а также определен порядок выявления оползневых зон по данным тепловизионного обследования.

M. Bazalieiev, B. Bandurian, V. Klepikov, O. Lysychenko, V. Lytvunenko, I. Vorobiov

THERMAL OBSERVATION METHOD FOR ESTIMATION OF LANDSLIDE DANGER IN THE AREA OF HYDROTECHNICAL CONSTRUCTIONS OF ENERGY COMPLEX

It is characterized thermal observation method for estimation danger state of hydrotechnical constructions ground masses landslide and its effectiveness is shown. It is also determined the order of zones with potential landslide danger evidentiatioon based on thermal observation data.