



## ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ДНЕПРОВСКОЙ ГЭС

С. Н. МЕШКОВ, Р. П. ОРЕЛ, В. А. МАСЛОВА

*Приведены методики и результаты наружного и внутреннего термографирования гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС. Показано, что исследованные тепловые поля объектов существенно неоднородны. При обследовании верхней потерны обнаружены участки с повышенной температурой, что свидетельствует о наличии фильтрации воды. Подтверждено, что температурное поле может служить диагностическим признаком оценки состояния гидросооружений. Показана высокая эффективность применения термографии и намечены пути развития температурного мониторинга гидросооружений.*

*The paper presents the procedures and results of outer and inner thermography of hydraulic engineering facilities of Dneprovsky HPS. It is proved that the studied thermal fields of the objects are significantly non-uniform. Regions of increased temperature are found at examination of the upper gallery, which is indicative of water filtration. It is confirmed that the temperature field may be a diagnostic indication for evaluation of the condition of hydraulic facilities. A high effectiveness of thermography application is shown and directions of development of temperature monitoring of hydraulic facilities are outlined.*

Большая часть гидротехнических сооружений (плотин) в Украине эксплуатируется уже много десятилетий и нуждается в тщательном контроле технического состояния. Для проведения такого контроля наряду с традиционными (регламентированными) средствами и методами целесообразно рассмотреть возможность применения современных средств и методов, к числу которых относится термография. Термография в настоящее время является наиболее перспективным и динамически развивающимся направлением неразрушающего контроля (НК) и технической диагностики (ТД) [1].

При возведении гравитационных плотин экзотермия, а также колебания температуры наружного воздуха вызывают в бетонном массиве значительные температурные напряжения, в результате чего возникают трещины, которые могут значительно изменить схему статической работы сооружения и понизить его несущую способность [2]. Поэтому неравновесное температурное поле тела плотины является одним из информативных признаков, используемых для оценки прочностных свойств гидротехнических сооружений.

Информация о температуре в различных точках тела плотины позволяет проводить теплофизическое моделирование, которое широко используется в мировой практике как при проектировании различных плотин, так и при их эксплуатации. При этом оказывается возможным прогнозировать как динамику развития температурного поля в теле плотины, так и рассчитывать карту напряжений, вызванных температурными перепадами [3]. Если реальные значения температуры, полученные от термопар, значительно отличаются от расчетных, то это позволяет сделать вывод о том, что в структуре тела плотины произошли изменения, вызванные либо распределенными дефектами типа выщелачивания бетона либо локальными неоднородностями типа трещин.

Измерение теплового поля до настоящего времени осуществляется контактным методом с помощью датчиков, размещенных в теле плотины [3]. Реализация контактного метода требует значительных материальных затрат и времени. Термографический метод позволяет регистрировать температурное поле гидротехнических объектов бесконтактным путем, что делает контроль оперативным, информативным и экономичным [4].

**Объекты термографирования.** Специалистами НТЦ «Термоконтроль» было проведено термографическое обследование комплекса гидросооружений Днепровской ГЭС. Обследования состояли в проведении наружного и внутреннего термографирования. Такое разделение связано с отличиями термографических ситуаций, которые возникают при обследовании объектов снаружи и внутри. Все работы были выполнены за три дня.

Объектами внутреннего термографирования являлись: верхняя потерна водосливной плотины; галерея щитовой стенки ГЭС-1; галерея машинного зала ГЭС-2.

Особенностями термографической ситуации на указанных объектах являлись: существенное отличие средней температуры объекта от температуры окружающей среды; повышенная влажность (на некоторых участках до 100 %); наличие на обследованных поверхностях стен кабелей, измерительных приборов, распределительных щитов, осветительной техники; наличие на стенах белых выделений (продукты разложения бетона), которые наблюдались визуально.

Анализ термограмм и соответствующих им видимых изображений показал, что в целом уровень освещенности существенно не влиял на результаты термографирования. При относительно малых расстояниях до обследуемых объектов повышенную влажность также не следует считать влияющим фактором. Белые выделения на стенах не давали

заметного отличия от сухих или влажных участков бетона с той же температурой.

Объектами наружного термографирования являлись: щитовая стенка ГЭС-1; водосливная плотина; водоводы ГЭС-2.

**Методика термографирования.** Основой методики являлся ГОСТ 26629–85 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля теплоизоляции ограждающих конструкций» и накопленный авторами опыт термографического обследования крупногабаритных объектов энергетики и строительства.

Выбор точек съемки определялся на основании предварительного осмотра объектов и технической документации.

При обследовании потерн и галерей гидросооружений затруднено применение метода «одного репера» [4], где в качестве реперной температуры выбиралась наименьшая средняя температура фрагмента обследуемого объекта. При обследовании этих объектов в качестве реперной температуры была условно выбрана точка, соответствующая середине выбранного температурного диапазона работы тепловизора.

Для получения видимых изображений исследуемых объектов совместно с тепловизором применялась цифровая камера. При анализе полученных термограмм использовалось стандартное программное обеспечение V.01-07-02 тепловизора IRTIS-200. По термограмме определялось значение средней температуры в кадре ( $T_{cp}$ ). Средняя температура определялась по выбранной площадке, в области кадра, свободной от посторонних предметов (осветителей, приборов и другого оборудования). Расположенные на мультискринах в порядке возрастания номеров контрольных точек (меток) термограммы давали полную картину о тепловом режиме всего объекта обследования. В итоге строилось распределение средней температуры  $T_{cp}$  вдоль потерны.

**Внутреннее термографирование.** Обследования показали, что температурное поле в верхней потерне и галереях гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС неоднородное. Все участки потерн и галерей имеют свои отличные тепловые картины, которые могут служить их характеристикой или своеобразным паспортом.

**Верхняя потерна** представляла собой коридор длиной 611 м и размерами 3,5×3,5 м. Полная площадь поверхности оценена в  $S = 8600 \text{ м}^2$ . По длине потерны на табличках были расположены 47 указателей, соответствующих водосливным пролетам плотины. При термографировании место установки тепловизора привязывалось к положению указателей.

В верхней потерне выделено несколько участков с аномальной температурой. Причиной повышенной температуры на этих участках является более высокая температура фильтрующейся воды. На рис. 1 показано распределение температуры по длине верхней потерны.

В процессе термографирования были более детально исследованы несколько участков потерны. Были измерены температуры водонапорной стенки

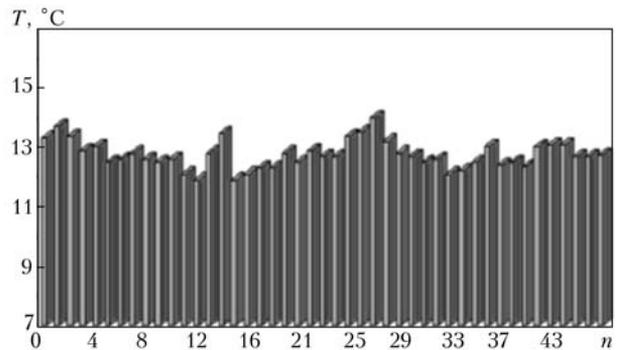


Рис. 1. Распределение температуры по длине верхней потерны ( $n$  — номер водосливного пролета)

**Температура фильтрующейся воды на различных участках верхней потерны**

Объект	$T_{ст}, °C$	$T_{в}, °C$
Водонапорная стенка у метки 1	13,2	14,9
Водонапорная стенка у метки 27	14,2	18,9
	13,6	16,4
Шов на водонапорной стенке у метки 44	13,7	16,5

и фильтрующейся воды на участках: 1, 27, 44 водосливных пролетов. Результаты проведенных измерений приведены в таблице.

Выяснилось, что фильтрующаяся вода имеет разную температуру на разных участках. Может возникать ситуация, когда на одном и том же участке из разных швов и трещин выходит вода разной температуры (пролет 27). На всех участках с повышенной средней температурой обнаружена фильтрация «горячей» воды. Температура такой воды на 1...4 °C отличается от «холодной» воды, которая постоянно фильтруется по всей длине потерны. Отличия температур воды на разных участках можно объяснить различной скоростью ее фильтрации. Следовательно, обнаруженные тепловые аномалии указывают на некоторый уровень нарушения целостности тела плотины в указанных местах. На рис. 2 показана термограмма с фильтрацией «горячей» воды.

**Галерея щитовой стенки ГЭС-1** представляла коридор длиной 250 м и размерами 2,5×2,5 м. Полная площадь поверхности оценена в  $S = 250 \text{ м}^2$ . Ори-

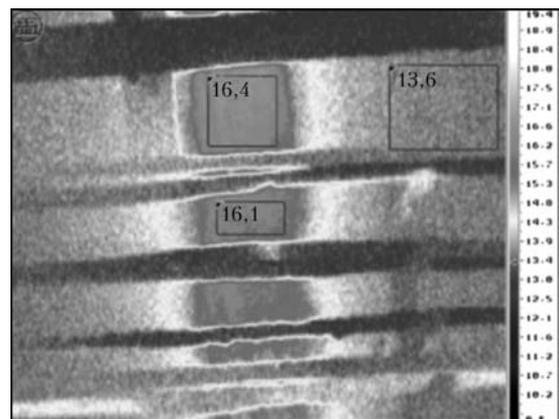


Рис. 2. Термограмма фрагмента водонапорной стенки у пролета 27 с фильтрацией «горячей» воды — разность между температурой воды и стенки составляет 2,8 °C



ентирами при проведении съемки являлись вертикальные технологические швы. По длине галереи было 20 швов.

Распределение температуры по длине галереи щитовой стенки ГЭС-1 от глухой щитовой стенки до сопряжения с водосливной плотиной имеет тенденцию к повышению и показано на рис. 3. На конечном участке (сопряжения с плотиной) влажность достигала 100 % и затрудняла проведение термографирования.

Отличие между температурой на начальном и конечном участках составляет порядка 3 °С.

**Галерея машинного зала ГЭС-2** имела длину 200 м, размеры составляли 2,5×2,5 м, полная площадь поверхности  $S = 2000 \text{ м}^2$ . Ориентирами при проведении съемки являлись секции, соответствовавшие агрегатам ГЭС-2. По длине галереи было 8 секций.

В галерее машинного зала ГЭС-2 температурное поле равномерное. Средняя температура составляет примерно 21 °С. Измерения температуры фильтрующей воды на участке 5 секции показали, что температура воды практически не отличается от температуры стенок галереи. На рис. 4 показано полученное распределение температуры.

Полученные результаты позволяют рассматривать термографический метод как эффективное средство для фильтрационных исследований гидросооружений.

**Наружное термографирование.** Особенности наружного термографирования являлись влиянием окружающей среды и неоднородностей на поверхности объектов (наличие растительности, отслоений покрытия и т. д.).

**Щитовая стенка ГЭС-1** — бетонное, частично железобетонное сооружение с девятью напорными трубопроводами. Размеры объекта составляли: длина 216 м, высота 38 м. Полная площадь была оценена в 8200 м<sup>2</sup>. Тепловизионная съемка щитовой стенки ГЭС-1 проводилась согласно схеме, изображенной на рис. 5.

В ходе сплошного мониторинга с помощью тепловизора осмотрена вся поверхность щитовой стенки ГЭС-1 (вертикальная и наклонная) и получено 40 термограмм и такое же число видимых изображений фрагментов щитовой стенки. Ориентирами при съемке служили мачты линии электропередач, установленные по всей длине стенки.

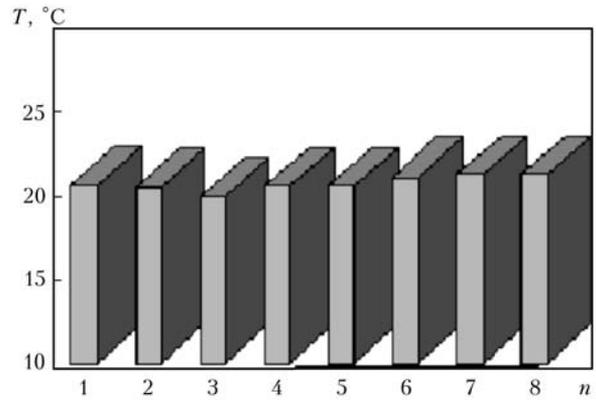


Рис. 4. Распределение температур по длине галереи машинного зала ГЭС-2 (n — номер секции)

Согласно рекомендациям [4, 5], тепловизионная съемка проводилась в вечернее время после захода солнца. На крыше машинного зала ГЭС-1 были выбраны 10, точек из которых проводилась съемка (по четыре термограммы с каждой точки со взаимным перекрытием, которое составляло 25 %).

Состояние поверхности щитовой стенки ГЭС-1 (наличие мест без наружного покрытия, фильтрация) сильно искажает термограммы (рис. 6), однако границы фильтрации определяются достаточно четко. Увлажнения швов, незаметные на видимых изображениях, хорошо видны на термограммах, что позволяет использовать полученные сведения для разработки системы противофильтрационных мероприятий. Повторное термографирование после ремонта может оценить качество проведенных ремонтных работ.

**Водосливная бетонная гравитационная плотина разрезного типа**, расположенная по окружности радиусом 600 м, разбита на 47 водосливных пролетов, шириной до 13 м. Длина водосливного фронта 611 м, высота плотины 60 м. Полная площадь была оценена в 36700 м<sup>2</sup>. Тепловизионную съемку водосливной плотины проводилась согласно схеме, показанный на рис. 7. В ходе термографирования осмотрены шесть фрагментов плотины и помимо термограмм получены видимые изображения обследуемого объекта.

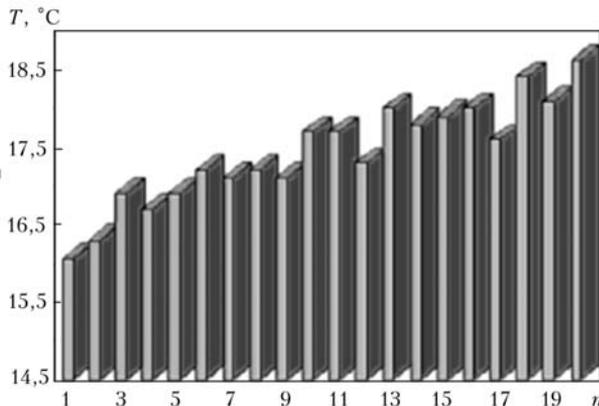


Рис. 3. Распределение температур по длине галереи щитовой стенки ГЭС-1 (n — номер шва)

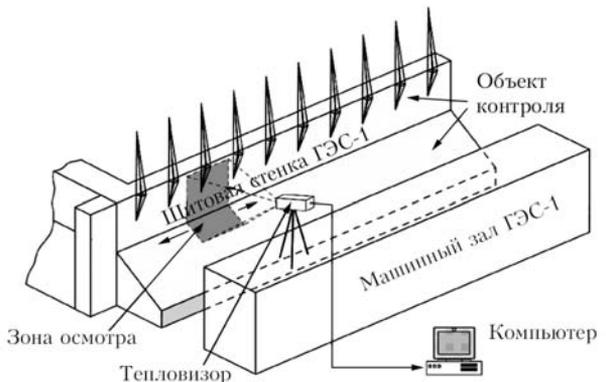


Рис. 5. Схема наружного термографирования щитовой стенки ГЭС-1

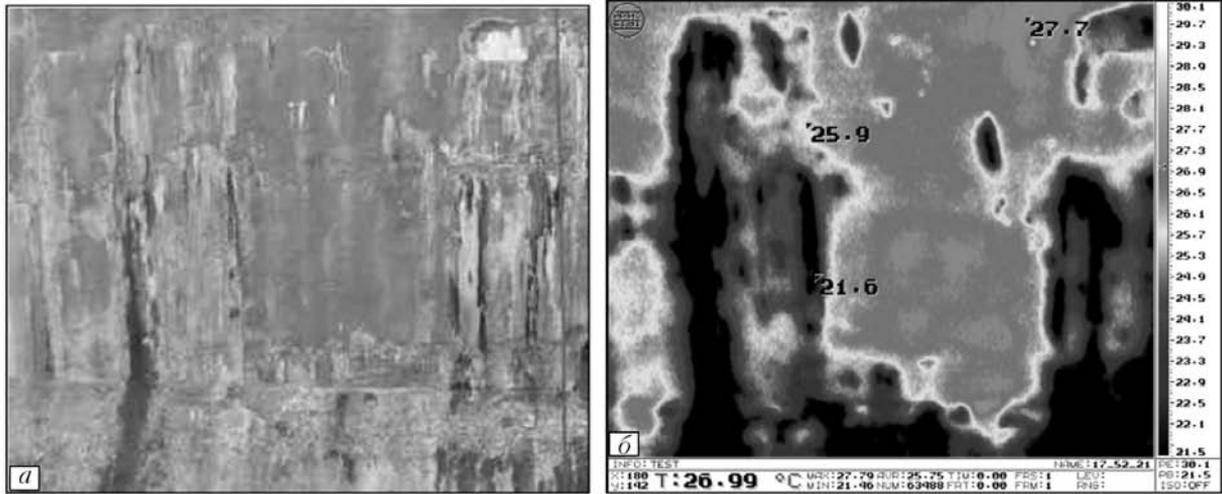


Рис. 6. Видимое изображение (а) и термограмма (б) части щитовой стенки ГЭС-1 (секция 1-го агрегата)

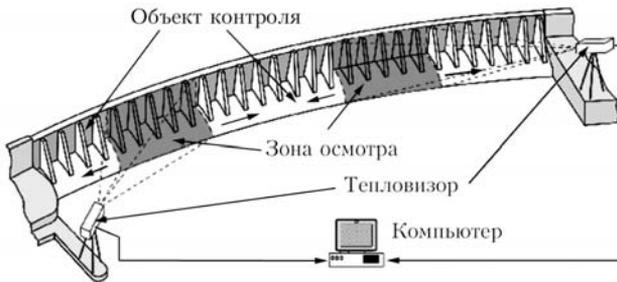


Рис. 7. Схема наружного термографирования водосливной плиты

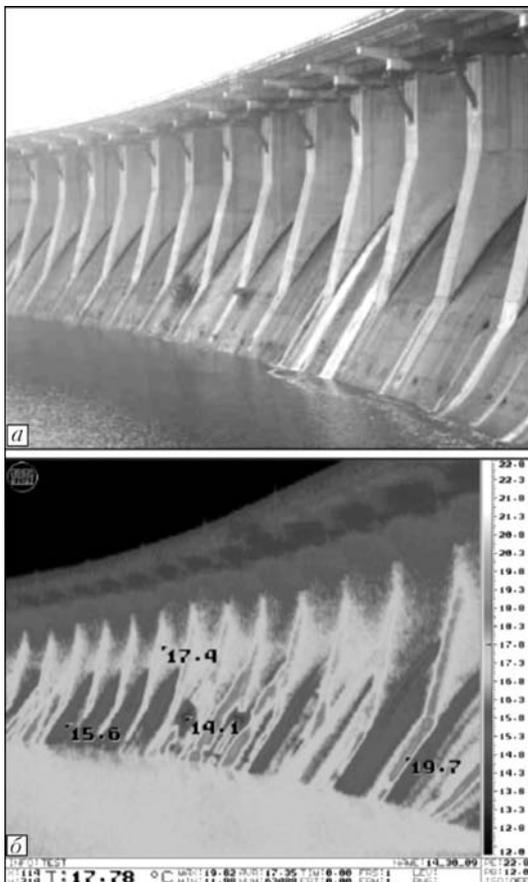


Рис. 8. Видимое изображения (а) и термограмма (б) водосливной плиты со стороны ГЭС-2 (12... 24 пролеты)

Тепловизионная съемка проводилась с крайней точки пирса со стороны ГЭС-1 в вечернее время после захода солнца (четыре термограммы с взаимным перекрытием), а также со стороны ГЭС-2 в облачную погоду в дневное время (две термограммы с взаимным перекрытием). На рис. 8 показаны результаты термографирования.

Одноразовая съемка не позволяет определить наличие трещин в объекте. Для обнаружения трещин в зданиях и сооружениях термографическим методом необходимы многократные наблюдения в разное время суток [4, 5].

Тепловизионная съемка **водоводов ГЭС-2** проводилась согласно схеме, изображенной на рис. 9. В ходе мониторинга с помощью тепловизора осмотрена вся поверхность водоводов ГЭС-2, и записаны термограммы восьми фрагментов водоводов с соответствующими фотографиями видимых изображений фрагментов обследуемого объекта. Фрагменты выбирались, исходя из наличия температурных неоднородностей на поверхности обследуемого объекта.

Тепловизионная съемка проводилась с точек, находящихся непосредственно перед водоводами в дневное время в облачную погоду.

Полученные термограммы как и в случае с защитной стенкой ГЭС-1 дополняют визуальные наблюдения.

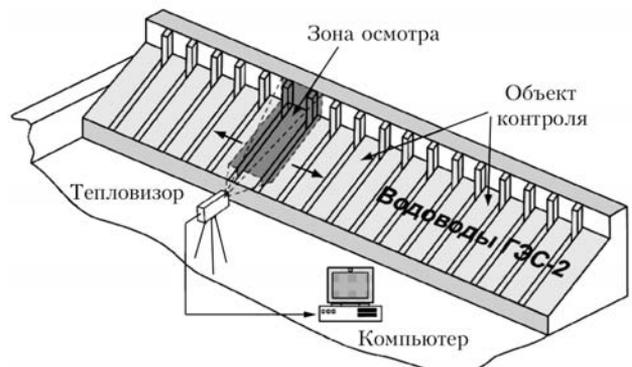


Рис. 9. Схема наружного термографирования водоводов ГЭС-2



## Выводы

В результате проведенного термографического обследования получена новая важная информация о температурных режимах гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС.

Температурное поле в верхней потерне и галереях гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС неоднородное. Фильтрация через бетон и швы сооружений носит в разных местах различный характер и данные для одного участка неприменимы для другого.

В верхней потерне выделено пять участков с повышенной температурой: *1-й участок* — район 1 водосливного пролета; *2-й участок* — район 13-14 водосливных пролетов; *3-й участок* — район 25-28 водосливных пролетов; *4-й участок* — район 36 водосливного пролета; *5-й участок* — район 42-44 водосливных пролетов.

Причиной повышенной температуры на участках верхней потерны является более высокая температура фильтрующейся воды, что говорит о том, что на этих участках вода быстрее проникает сквозь тело плотины и не успевает охладиться до средней температуры потерны. Температура фильтрующейся воды может превышать температуру стенки на 3...4 °С.

Распределение температуры по длине галереи щитовой стенки ГЭС-1 от глухой щитовой стенки до сопряжения с водосливной плотиной имеет тенденцию к повышению. Отличие между температурой на начальном и конечном участках составляет порядка 3 °С.

В галерее машинного зала ГЭС-2 температурное поле равномерное. Средняя температура составляет примерно 21 °С. Температура фильтрующейся воды не отличается от температуры стенок галереи.

Состояние поверхности щитовой стенки ГЭС-1 (наличие мест без наружного покрытия, фильтрация) сильно искажает термограммы, однако гра-

ницы фильтрации определяются достаточно четко. Увлажнения швов, незаметные на видимых изображениях, хорошо видны на термограммах, что позволяет использовать полученные сведения для разработки системы противофильтрационных мероприятий. Повторное термографирование после ремонта может оценить качество проведенных ремонтных работ.

Термограммы водоводов ГЭС-2 дополняют визуальную информацию. Регулярный мониторинг позволил бы определять динамику развития дефектов швов и места проведения ремонтных работ.

Для выявления аномалий тепловой картины (и возможных нарушений) в гидротехнических сооружениях одной серии измерений недостаточно. Мировой опыт применения термографии в строительстве показывает, что для выявления скрытых дефектов необходимы регулярные наблюдения в различное время года и суток.

Производительность термографического метода и его информативность позволяет создать тепловые паспорта гидросооружений Украины и проводить их регулярный температурный мониторинг.

Дальнейшими направлениями исследований могут являться совершенствование аппарата обработки термограмм с целью повышения их информативности и создание базы данных по каждому из обследованных объектов.

1. *Маслова В. А., Стороженко В. А.* Термография в диагностике и неразрушающем контроле. — Харьков. — Компания СМИТ, 2004. — 160 с.
2. *Исследование сооружений и оборудования гидроэлектростанций // Сб. статей под ред. Ф. Ф. Губина.* — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 119 с.
3. *Maisano P. A., Forbes B. A., Miskel O. A., Taylor M. J.* Cadiangullong RCC Dam: Monitored Performance Versus Design Expectations. — Abstracts of 4-th International Symposium on RCC Dam, 17-19 November 2003, Madrid.
4. *Дроздов В. А., Сухарев В. И.* Термография в строительстве. — М.: Стройиздат, 1987. — 238 с.
5. *Неразрушающий контроль / Справ. Под ред. В. В. Клюева.* — Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль / В. П. Вавилов. — М.: Машиностроение, 2004. — 679 с.

Харьков. ун-т техн. электроники

Поступила в редакцию  
17.02.2005



## IX ЕВРОПЕЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

25-29 сентября 2006

г. Берлин

Со всеми подробностями о конференции и выставке  
можно ознакомиться на сайте [www.ronktd.ru/text/news/?id=47](http://www.ronktd.ru/text/news/?id=47)

### Контактные лица:

По вопросам участия в конференции:  
Steffi Schaeske  
Тел.: +49 30 678 07 120  
Факс: +49 30 678 07 129  
E-mail: [mail@ecndt2006.info](mailto:mail@ecndt2006.info)

По вопросам участия в выставке:  
Hannelore Wessel  
Тел.: +49 30 678 07 106  
Факс: +49 30 678 07 129  
E-mail: [exhibition@ecndt2006.info](mailto:exhibition@ecndt2006.info)