

ОСНОВЫ МЕТОДИКИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ РАСТЯНУТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕФОРМАЦИОННОГО ТЕПЛА

Basic methods of nondestructive testing of tension members of steel structures with the use of heat strain

Мойсейчик Е.А.
Moiseychik E.A.

Рассмотрены особенности измерения температур поверхностей стальных элементов по инфракрасному излучению, возникающему в процессе деформирования, основные источники погрешностей измерения температур и возможности их учета и снижения при разработке измерительных методик. Сформулированы этапы измерительных работ по неразрушающему тепловому контролю с использованием деформационного тепла и их основные структурные составляющие. Отмечается, что тепловой инструментальный контроль стальных конструкций следует выполнять в соответствии с утвержденными методиками и технологическими картами, разрабатываемыми на основе действующих технических нормативно-правовых актов, и содержащих технологию тепловых измерений и их анализа. Тепловой контроль необходимо дополнять фиксацией состояния конструкции и ее дефектов в видимом диапазоне, и, при необходимости, – с другими методами неразрушающего контроля.

The features of measuring surface temperature of the steel from the infrared radiation produced during deformation, the main sources of errors in the measurement of temperatures and the possibility of taking them into account and reduce the development of measurement techniques. Formulated the steps of measuring the work of non-destructive thermal control with the use of heat deformation and their main constituents. It is noted that the heat instrumental control of steel structures should be carried out in accordance with approved procedures and process maps are developed based on existing technical regulatory legal acts, and having the technology of thermal measurements and analysis. Heat control is necessary to complement the latching structure and its defects in the visible range, and, if necessary - with other NDT methods.

Введение. Многолетний опыт эксплуатации стальных конструкций в строительстве и промышленности показал, что часто они теряют работоспособность из-за зарождения и развития разрушения в зонах конструктивно-технологических дефектов в растянутых элементах. Экспериментальные испытания натуральных узлов и конструкций частично решают задачу обеспечения прочности таких конструктивных форм, однако они трудоемкие и дорогостоящие, требуют зна-

чительного расхода материалов. Возможности существующих расчетно-экспериментальных методов недостаточны для обеспечения безаварийной работы элементов при квазистатических нагрузках вследствие слабой изученности физической природы зарождения и развития разрушения в стальных конструктивных формах и сложностей раннего диагностирования разрушения. Традиционные методы контроля, как правило, выявляют существующие дефекты в элементах и узлах стальных конструкций и изделий, но не позволяют контролировать изменение деформированного состояния, наступление предельной стадии работы материала в опасных сечениях, точках, узлах, непосредственно предшествующей зарождению разрушения. Тепловые виды контроля выявляют дефекты в элементе конструкций на основании анализа теплового поля, возникающего как за счет внешних источников тепловой стимуляции (активные методы), так и в результате функционирования внутренних тепловых источников (пассивные методы) [1-3]. Для элементов конструкций, находящихся под нагрузкой, тепловые поля создаются в результате функционирования внутренних тепловых источников пассивного вида, возникающих в процессе физико-химических твердотельных реакций, инициированных изменением напряженно-деформированного состояния контролируемых объемов [4,5]. Деформационные тепловые источники действуют при различных стадиях работы материала (упругой, упруго-пластической, пластической, предразрушении, зарождении магистральной трещины и ее развитии). Это делает неразрушающий тепловой контроль на основе деформационного теплообразования достаточно эффективным и прямым методом выявления напряженно-деформированного и предельного состояний элементов и опасных зон с конструктивно-технологическими дефектами, зарождения и развития трещин. Применение современного компьютерного оборудования на основе инфракрасного излучения (теповизоры) для дистанционного (бесконтактного) измерения температур поверхности элементов стальных конструкций позволяет в экспресс-режиме получать исходные данные, необходимые для выявления дефектов и диагностики элементов конструкций различного назначения [6-10].

Практическое применение тепловизионного метода для теплового контроля стальных элементов с использованием деформационного тепла часто сдерживается недостаточным математическим моделированием процессов теплообразования и отсутствием аттестованных методик распознавания и идентификации дефектов в стальных

конструктивных формах. В статье рассмотрим основные подходы к разработке таких методик.

1. Особенности измерения температуры тел по их инфракрасному излучению

Измерение температуры поверхности твердого тела 1 компьютерной термографической системой 4 основывается на измерении его собственного инфракрасного излучения и производится дистанционно, в соответствии со схемой рисунка 1. Электрический сигнал, фиксируемый преобразователем термографической системы 4, пропорционален суммарному потоку излучения Φ , падающему на преобразователь: $\Phi = \Phi_1 + \Phi_{23} + \Phi_4$. Слагаемые Φ_1 , Φ_{23} , Φ_4 соответственно равны потоку излучения с контролируемой поверхности элемента 1; потоку фоновой засветки посторонними тепловыми излучателями 2, 3; потоку собственного излучения термографической системы 4. Поток Φ_4 стабилизируется разработчиками термографической системы 4 [3]. Поэтому основными причинами погрешностей при измерении температуры тел по инфракрасному излучению являются изменения собственного излучения контролируемой поверхности, определяемые изменением суммарного коэффициента излучения [11, 12], и фоновые помехи.

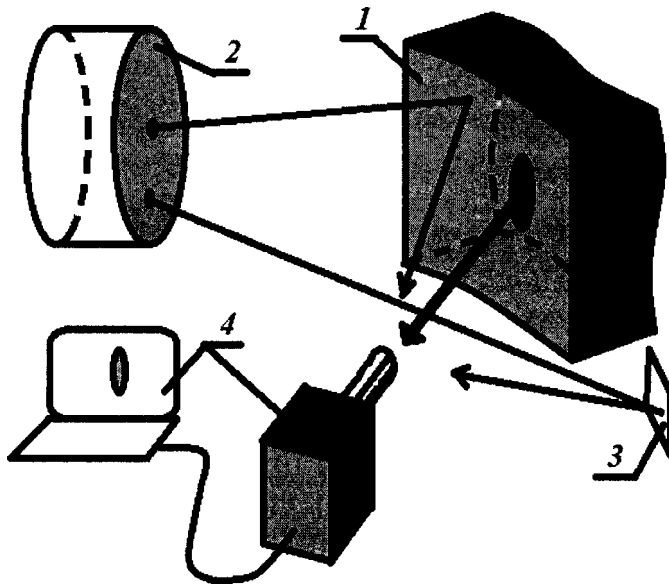


Рисунок 1. Схема измерения температуры точек поверхности тела компьютерной термографической системой по инфракрасному излучению

Точность измерения температуры контролируемой поверхности элемента, расположенного в воздушной среде, по инфракрасному излучению зависит от черноты излучения контролируемой поверхности тела в инфракрасной области спектра, фоновой засветки, поглощения инфракрасного излучения в воздухе, ослабления инфракрасного излучения оптической системой и чувствительности приемников излучения выбранной термографической системы.

1.1. Влияние изменения коэффициента теплового излучения

Коэффициент теплового излучения ϵ характеризуется отношением суммарного спектра излучения контролируемой поверхности к излучению абсолютно черного тела при заданной температуре [3]. Коэффициент ϵ связан с коэффициентом отражения ρ зависимостью $\epsilon + \rho = 1$, из которой следует, что при высоком коэффициенте отражения ($\rho \cong 1$) тепловизионные измерения температуры невозможны. В работе [3] измерение температуры по инфракрасному излучению рекомендуется для неметаллов и для черных металлов и сплавов, имеющих высокие коэффициенты излучения. Поверхность элементов стальных конструкций, как правило, покрыта окислами, антикоррозионными составами, слоем пыли, водяной пленкой и т.д. Коэффициенты теплового излучения защищенной такими слоями поверхности достаточно высокие (таблица). При необходимости черноту поверхности контролируемых элементов можно существенно повысить нанесением тонких равномерных слоев технологических покрытий. В качестве таких составов применяют «лаки, краски различных цветов и типов, суспензию графитового порошка в воде, гравировальную эмаль, сажевые эмульсии, воду, масло» [3]. Коэффициенты ϵ при этом можно поднять до 0,93-0,98 [7].

1.2. Влияние поглощения инфракрасного излучения воздухом

Основными компонентами воздушной среды, сильно поглощающими лучистую энергию инфракрасной части спектра, являются углекислый газ и водяной пар [11]. При этом в интервалах длин волн 1,0-1,1; 1,2-1,3; 1,6-1,75; 2,1-2,4; 9,0-11,0 мкм поглощение не превышает (20-30) %, а в интервале 3,5-4,2 мкм коэффициент пропускания достигает 90%. При измерениях с расстояния не больше 50 м измеряемая яркость объекта уменьшается не более чем на 0,5% [11].

Таблица. Коэффициенты теплового излучения железоуглеродистых сплавов с различным состоянием поверхности при направлении излучения, совпадающем с нормалью к контролируемой поверхности [7]

| Железоуглеродистый сплав | Температура, °С | ϵ |
|---------------------------------|-----------------|-------------|
| Сталь | | |
| -листовая, прокатанная | 50 | 0,56 |
| -прокатанная, со слоем окиси | 25 | 0,82 |
| -с шероховатой поверхностью | 50 | 0,55...0,98 |
| -ржавая, красная | 20 | 0,69 |
| -легированная | 500 | 0,35 |
| -после пескоструйной обработки | 700 | 0,70 |
| -сильно окисленная | 50 | 0,88 |
| -окисленная, шероховатая | 40...370 | 0,94...0,97 |
| -оксидированная | 200...600 | 0,8 |
| Чугун | | |
| -шероховатый, сильно окисленный | 40...250 | 0,95 |
| -чугунное литье | 50 | 0,81 |
| Железо | | |
| -литое, необработанное | 900...1100 | 0,87...0,95 |
| -окисленное | 100 | 0,74 |
| горячекатанное | 20 | 0,77 |

1.3. Влияние угла между нормалью к поверхности и направлением измерений

Контролируемые элементы поверхности стальных конструкций могут иметь различную ориентацию относительно приемника теплового излучения термографической системы. Стальные элементы конструкций за счет естественных и технологических покрытий имеют коэффициенты излучения не ниже 0,70–0,98. Для таких поверхностей обеспечивается достаточно равномерная величина коэффициента излучения при произвольной ориентации излучающих поверхностей [11].

1.4. Влияние фоновой подсветки

Фоновая подсветка может возникать от предметов, расположенных сбоку от контролируемого элемента (2, рисунок 1) и быть отраженной другими предметами (3, рисунок 1). Источники засветки (лампы, солнечное освещение, приборы отопления, нагретые элементы оборудования, люди и т.д.) вносят существенные погрешности в

измеряемые величины температур. Так тепло, излучаемое человеком, находящимся на расстоянии (1-4) м от контролируемого элемента, вносит погрешность в тепловизионные измерения соответственно в пределах (6,7-0,4)%, лампы накаливания, расположенные на таком же расстоянии, дают погрешность в интервале (3,1-0,2)% [3]. В справочнике [3] рекомендуется набор мер, позволяющих устранить или снизить до приемлемых величин погрешности измерений от фоновой засветки (ограничение расстояний между контролируемым элементом и теплоизлучающими предметами, уменьшение отражения с контролируемой поверхности «чернением», использование экранов, выполнение измерений при отсутствии солнечного и другого теплового излучения). Методы «отстройки от влияния фонового излучения» подробно, с практическими рекомендациями, рассмотрены в монографии В.Б Ранцевича [12].

1.5. Об оценке погрешности измерения температуры поверхности стальных элементов с использованием инфракрасного излучения

В монохроматическом интервале длин волн от λ до $\lambda + \Delta \lambda$ величина плотности потока энергии черного тела с температурой T определится законом Планка [11, 12]:

$$E_{\lambda}^0 = c_1 \cdot \lambda^{-5} \left(\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right) \cdot d\lambda, \text{ Вт/м}^3, \quad (1)$$

где $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}\cdot\text{м}^2$; $c_2 = 1,438 \cdot 10^{-2} \text{ м}\cdot\text{К}$.

Если $\exp \frac{c_2}{\lambda T} \gg 1$, то выражение (1) можно представить формулой Вина:

$$E_{\lambda}^0 = c_1 \cdot \lambda^{-5} \exp \frac{c_2}{\lambda T} \cdot d\lambda, \text{ Вт/м}^3. \quad (2)$$

Учитывая, что яркостную температуру $T_{\text{я}}$ серого тела ($\epsilon_{\lambda T} < 1$) определяют такой температурой T абсолютно черного тела ($\epsilon_{\lambda T} = 1$), при которой их яркости равны в условиях облучения обоих тел лучами с длиной волны λ , и используя формулу (2) для обоих тел, несложно получить выражение, связывающее яркостную $T_{\text{я}}$ и действительную T температуры реального тела:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{\text{я}}} = \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \epsilon_{\lambda, T}. \quad (3)$$

Правая часть' выражения (3) для реальных тел, у которых $\varepsilon_{\lambda T} < 1$, будет всегда отрицательной. Поэтому действительная температура таких тел больше их яркостной температуры.

Дифференцируя выражение (3) находим:

$$\Delta T = \frac{\lambda}{C_2} \cdot T^2 \cdot \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda T}}{\varepsilon_{\lambda T}} \quad (4)$$

Из формулы (4) с учетом [13] получим выражение для относительной ошибки определения действительной температуры реального тела:

$$\left| \frac{dT}{T} \right| = \frac{\lambda \cdot T}{C_2} \cdot \left(\frac{1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right)}{\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right)} \right) \cdot \left(\left| \frac{dE_{\lambda T}}{E_{\lambda T}} \right| + \left| \frac{d\varepsilon_{\lambda T}}{\varepsilon_{\lambda T}} \right| \right) \quad (5)$$

Выражение (5) выявляет структуру относительной ошибки для действительной температуры T тела. Определить расчетным путем правую часть выражения (5) затруднительно из-за неопределенности относительных величин монохроматической плотности $\left(\left| \frac{dE_{\lambda T}}{E_{\lambda T}} \right| \right)$, излучательной способности $\left(\left| \frac{d\varepsilon_{\lambda T}}{\varepsilon_{\lambda T}} \right| \right)$ и их изменений при нагружении стальных элементов выше предела текучести. На поверхности стального проката, в зонах дефектов, разрушается и отслаивается окисная пленка, и коэффициент излучения $\varepsilon_{\lambda T}$ изменяется при дальнейшем развитии деформаций. При измерениях температуры стальных поверхностей элементов по инфракрасному излучению повышения точности измерений можно добиться методом вычитания нулевого кадра [7] или сравнением яркостной температуры с температурой тела в реперной зоне, определяемой контактным методом [14].

2. Основные требования к измерительному оборудованию

Характеристики современных термографических систем, применяемых для измерения температуры поверхности стали и других материалов при статических и более быстрых процессах, приведены в приложениях коллективной монографии [8]. Тепловизор для конкретных измерений обычно выбирают, руководствуясь техническими данными прибора, приводимыми изготовителями (угол обзора по горизонтали и вертикали, частота кадров, диапазон измеряемых температур, возможности программного обеспечения и другие). При измерении небольших температур поверхности с точностью, сопоставимой

с чувствительностью прибора, иногда приходится обращать внимание на способ температурной стабилизации приемника излучения (термоэлектричество или жидкий азот). Для измерений деформационной температуры стальных элементов следует учитывать при выборе требуемой частоты кадров время выравнивания температуры по поперечному сечению контролируемого элемента. По данным работы [7] совпадение величин температуры поверхности, средней температуры поверхности и температуры в середине пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 5, 10, 20мм изменяется от 0,25 секунд (5мм) до 1 секунды (10мм) и 4 секунд при толщине пластины 20мм. Отсюда следует, что для часто используемых в стальных конструкциях толщин проката в интервале 8–25мм приемлемым является время формирования кадра термофильма в течение 0,5–2,0 секунд. Кроме этого, нагрузка в элементах стальных конструкций изменяется с конечной скоростью. В работе [2] по данным испытаний стальных цилиндрических образцов показано, что «адиабатичность процесса нагружения выполняется при скорости деформирования равной или выше $2,36 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ». Механические испытания стальных образцов в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ1497-84 проводятся со скоростью деформирования выше указанной, а элементы стальных конструктивных форм при их «квазистатической» работе имеют тот же порядок скорости нагружения.

3. Основные требования к методикам исследования с использованием деформационного тепла

В соответствии с ГОСТ 8.010-99 методики выполнения измерений (МВИ) должны включать совокупность операций и правил, которые обеспечивают получение результатов измерений с установленной точностью. МВИ содержат ряд разделов, определяющих область их применения; требования к точности измерения; условия выполнения измерений (номинальные значения влияющих факторов и допустимые отклонения от них); измерительное оборудование; требования к параметрам измеряемой величины (в том числе ее допускаемые значения) и другие требования. Методики исследования стальных конструкций конкретных зданий и сооружений могут содержать математические модели, конечно-элементный анализ напряженно-деформированного и энергетического состояния, экспериментальные исследования образцов, моделей, конструктивно-технологических форм, натуральных конструкций и сооружений, требования к приборному, программному обеспечению, к квалификации исполнителей, тех-

нологическим и отчетным документам и другие. В отдельных отраслевых нормативных документах и стандартах предприятий детализированы основные требования к методикам. В МВИ, разработанных под руководством профессора О.Н. Будадина [8], проанализированы основные методические принципы автоматизированного теплового неразрушающего контроля стального проката в технологическом цикле работы прокатного стана и соответствующие принципы диагностики технического состояния строительных сооружений по анализу температурных полей их характерных поверхностей. В работе [9] сформулированы основные принципы методики оценки напряженно-деформированного состояния стальных резервуаров и трубопроводов с использованием тепловизионных измерений, а технология выявления дефектов в стальных строительных конструкциях с использованием инфракрасного излучения деформированных участков изложена в [15]. Работы [8, 9, 15] показывают, что МВИ выполнение работ раскладывают на 3–4 этапа. На первом этапе исследуются нормативные и проектные требования к сооружению, конструктивным формам, внешние нагрузки и воздействия и создается расчетная модель объекта. На втором этапе проводится исследование и анализ, уточнение разработанной расчетной модели объекта. Третий этап включает основные измерительные и исследовательские работы по объекту, их предварительный анализ, выполнение уточняющих исследований. На последнем этапе производится окончательный анализ результатов, подготовка и выпуск итоговых документов. Первый и второй этапы показывают, что для простых узлов и элементов стальных конструкций удастся создать конечно-элементную модель объекта. В работе [16] установлено, что для растянутого осесимметричного стержня, отображающего особенности реального элемента, такая модель имеет достаточно сложную форму. Расчет модели по программному комплексу ANSYS с учетом фактических характеристик и диаграммы работы стали занимает несколько десятков часов машинного времени. На рисунке 2 приведены простейшие типичные конструктивные формы, состоящие из листовых стальных элементов, а на рисунке 3 показаны геометрическая и конечно-элементная модели центрально растягиваемого листового элемента и распределение касательных напряжений и перемещений поперечных сечений. Такие формы в различной комбинации и пространственном расположении входят в состав многих стальных конструкций и сооружений. Сложные узлы реальных конструкций потребуют значительно больших затрат времени на разработку моделей и их конечно-элементный анализ. Расчеты

можно дополнить данными вычислений плотности деформационной энергии и распределения температур по характерным поверхностям и сечениям.



Рисунок 2. Простейшие стальные конструктивно-технологические формы, работающие на растяжение

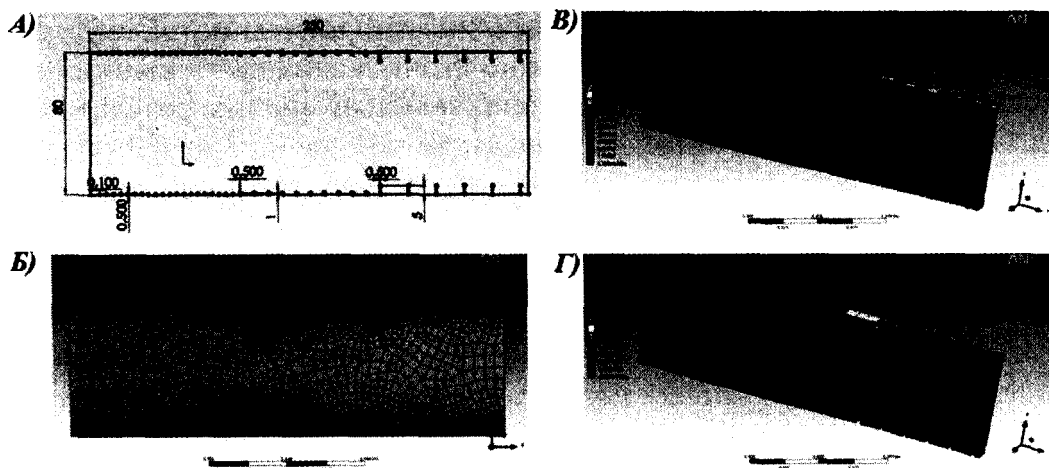


Рисунок 3. Геометрическая схема элемента с боковыми надрезами, имитирующими дефекты гильотинной резки стального листа (А); его конечно-элементная модель (Б) и результаты упруго-пластического конечно-элементного расчета касательных напряжений (В) и перемещений поперечных сечений стержня (Г) при центральном растяжении

Сопоставление результатов конечно-элементного определения температур с данными тепловизионных измерений повышает достоверность выявления дефектных зон, отслеживания зарождения и раз-

вития магистральных трещин. Использование традиционных неразрушающих методов в дефектных зонах, выявленных на основе деформационного тепла, позволяет достоверно и с требуемой точностью установить расположение и размеры дефектов.

Обеспечение необходимой точности температурных измерений для сложных сооружений и воздействий может потребовать разработки проекта производства таких работ.

Выводы

1. Неразрушающий контроль стальных конструкций на основе тепловизионных измерений температурных полей обладает высокой чувствительностью, наглядностью и объективностью результатов, позволяет с высокой производительностью в бесконтактном режиме определять локализацию и идентификацию дефектов, отслеживать их развитие.
2. Тепловой инструментальный контроль стальных конструкций следует выполнять в соответствии с утвержденными методиками и технологическими картами, разрабатываемыми на основе действующих технических нормативно-правовых актов, и содержащих технологию тепловых измерений и их анализа. Тепловой контроль необходимо дополнять фиксацией состояния конструкции и ее дефектов в видимом диапазоне, и, при необходимости, – с другими методами неразрушающего контроля.

Литература

1. Thomson, W. Changes of Temperature produced by Compression or Dilatations of a Fluid and by Stresses of any Kind in an Elastic Solid // Math. and Phys. Papers. Cambridge Univ. - 1890.-Vol. 3.-P.63-82.
2. Баш, В.Я. Исследование напряжений и деформаций термоэлектрическим методом.- Киев: Наукова думка, 1984.- 100 с.
3. Вавилов, В.П. Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник.-М.: Машиностроение, 1991.-240 с.
4. Мойсейчик, Е.А. Природа теплообразования при холодном деформировании стальной арматуры // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010.-№3(2).– С. 69–74.
5. Мойсейчик, Е.А. Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом// Прикладная механика и техническая физика. – 2013.-№1.– С. 134-142.
6. Почтенный, Е. К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин.- Минск: Наука и техника, 1982. – 246 с.

7. Пустовой, В.Н. Неконтактный метод исследования концентрации напряжений в металлоконструкциях грузоподъемных машин.-М.: В/О «Мортехинформреклама», 1991.- 48 с.
8. Будадин, О.Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий/ О.Н. Будадин, А.И. Потапов, В.И. Колганов, Т.Е. Троицкий-Марков, Е.В. Абрамова.-М.:Наука, 2002.-472 с.
9. Кантемиров, И.Ф. Разработка методов диагностики объектов трубопроводного транспорта на основе тепловизионного контроля. Автореф. дис....канд.техн.наук: 05.15.13/И.Ф. Кантемиров.- Уфа, 2000.-19 с.
10. Мойсейчик, Е. А. Работа шпилек крепления крышки гидроагрегата ГЭС и возможности мониторинга//Гидротехника.-2014.-№4.-С. 15-20.
11. Гордов, А.Н. Основы пирометрии.-М.: Металлургия, 1971.-448 с.
12. Ранцевич, В.Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения.- Минск: Наука и техника, 1983.-104 с.
13. Рабинович, С.Г. Погрешности измерений / С.Г. Рабинович.-Л.:Энергия, 1978.-262 с.
14. Дроздов, В.А. Термография в строительстве / В.А. Дроздов, В.И. Сухарев.- М.:Стройиздат, 1987.-240 с.
15. Мойсейчик, Е.А. Выявление дефектов в стальных элементах конструкций с использованием инфракрасных технологий неразрушающего контроля / Е.А. Мойсейчик, Е.К. Мойсейчик // Проблемы механики современных машин: материалы V международной конференции. В 3-х томах. Т.3.-Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. – С. 3-8.
16. Мойсейчик, Е.А. Моделирование работы на растяжение стальной арматуры класса S500 с конструктивно-технологическими дефектами с использованием комплекса ANSYS / Е.А. Мойсейчик, Ю.В. Василевич, А.В. Спиглазов, А.М. Язневич // Проблемы современного бетона и железобетона: доклады II Международного симпозиума, Минск, 21-23 октября 2009 г.: в 2ч. / Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству «Институт БелНИИС»; редкол.: М.Ф. Марковский [и др.].-Минск, 2009.-Ч.1.– С.176–186.

Статья поступила в редакцию 28.12.15