

Для стали Ст3 при комнатной температуре  $K_m = 3,09 \cdot 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ . Выражение (2) справедливо при адиабатическом нагружении в упругой стадии деформирования однородных изотропных материалов при абсолютной температуре  $T$  (в градусах Кельвина). При работе стали в пластической стадии повышение температуры ( $\Delta T$ ) в исследуемой точке  $K$  можно определить по формуле (с использованием ANSYS)

$$\Delta T = \beta \cdot W^p / (C\rho), \quad (3)$$

где  $\Delta T$  — изменение температуры;  $\beta$  — коэффициент Тэйлора—Квинни (принят 0,9);  $W^p$  — величина пластической работы в единице объема;  $C$  — удельная теплоемкость стали;  $\rho$  — плотность материала.

С использованием формулы (3) и предположении адиабатного процесса рассчитано изменение температуры в точке  $K$  опасного сечения при работе материала в стадиях пластической и самоупрочнения (рисунок 1). Снижение температуры стали для той же точки при ее упругом деформировании можно рассчитать с использованием формулы (1). При величине первого инварианта тензора напряжений, превышающей 500 МПа, охлаждение стали может произойти более чем на градус.

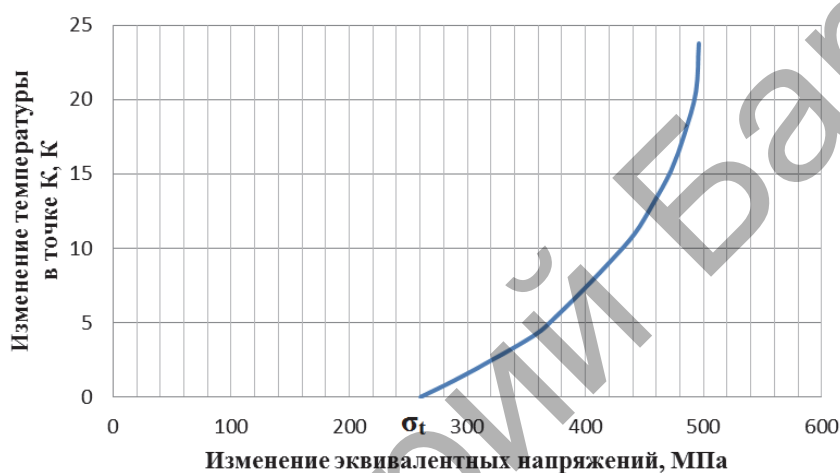


Рисунок 1 — Повышение температуры  $\Delta T$  при изменении эквивалентных напряжений в этой же точке выше предела текучести материала

**Заключение.** Многоцелевая направленность программы ANSYS, независимость от аппаратных средств (от персональных компьютеров до рабочих станций и суперкомпьютеров), средства геометрического моделирования на базе  $B$ -сплайнов, полная совместимость с CAD/CAM/CAE-системами ведущих производителей и «дружеский» интерфейс привели к тому, что ANSYS используется во многих университетах для обучения студентов и выполнения научно-исследовательских работ.

В технологических приложениях ANSYS позволяет выполнять расчеты конструкций практически любой сложности в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации, включая монтажные нагрузки, температурные деформации, гидравлический удар, связанные тепломеханические задачи и др., не учитываемые при расчетах по существующим методикам, которые оказывают влияние на НДС деталей и на прочностную надежность изделий в целом.

УДК 535.21

**Е. А. Мойсейчик**, кандидат технических наук, доцент  
Белорусский национальный технический университет, Минск

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

**Введение.** Измерение температуры поверхности твердого тела  $I$  компьютерной термографической системой  $4$  основывается на исследовании его собственного инфракрасного излучения и производится дистанционно, в соответствии со схемой (рисунок 1). Электрический сигнал, фиксируемый преобразователем термогра-

фической системы 4 пропорционален суммарному потоку излучения  $\Phi$ , падающему на преобразователь:  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_{23} + \Phi_4$ . Слагаемые  $\Phi_1, \Phi_{23}, \Phi_4$ , соответственно, равны потоку излучения с контролируемой поверхности элемента 1; потоку фоновой засветки посторонними тепловыми излучателями 2, 3; потоку собственного излучения термографической системы 4. Поток  $\Phi_4$  стабилизируется разработчиками термографической системы 4. Поэтому возможные погрешности при измерении этим способом температуры тел определяются ходом собственного излучения поверхности, фиксируемые по изменению суммарного коэффициента излучения, и фоновые помехи. Точность измерения температуры контролируемой поверхности элемента, расположенного в воздушной среде, по инфракрасному излучению зависит от черноты излучения, фоновой засветки, поглощения инфракрасного излучения в воздухе, его ослабления оптической системой и чувствительности приемников излучения выбранной термографической системы. Рассмотрим влияние названных факторов на процесс измерения температуры поверхности.

**Основная часть.** Коэффициент теплового излучения  $\varepsilon$  характеризуется отношением суммарного спектра излучения контролируемой поверхности к излучению абсолютно черного тела при заданной температуре. Коэффициент  $\varepsilon$  связан с коэффициентом отражения  $\rho$  зависимостью  $\varepsilon + \rho = 1$ , из которой следует, что при высоком коэффициенте отражения ( $\rho \approx 1$ ) тепловизионные измерения температуры невозможны (без специальных мероприятий). Поэтому измерение температуры по инфракрасному излучению рекомендуется для неметаллов, черных металлов и сплавов, имеющих высокие коэффициенты излучения.

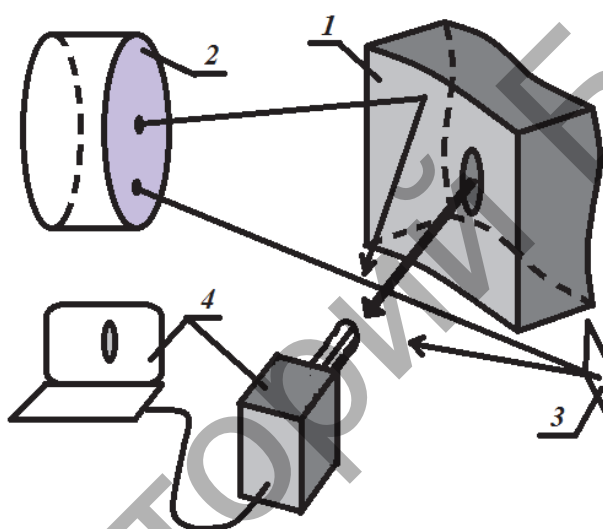


Рисунок 1 — Схема измерения температуры точек поверхности тела компьютерной термографической системой по инфракрасному излучению

Поверхность элементов стальных конструкций, как правило, покрыта окислами, антикоррозионными составами, слоем пыли, водяной пленкой и т. д. Коэффициенты теплового излучения защищенной такими слоями поверхности больше 0,5. При необходимости черноту поверхности контролируемых элементов можно существенно повысить нанесением тонких равномерных слоев технологических покрытий. Коэффициенты  $\varepsilon$  при этом можно поднять до 0,93...0,98. Основными компонентами воздушной среды, значительно поглощающими лучистую энергию инфракрасной части спектра, являются углекислый газ и водяной пар. 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%.

Контролируемые элементы поверхности стальных конструкций могут иметь различную ориентацию относительно приемника теплового излучения термографической системы. Обычно стальные элементы находящихся в эксплуатации 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.

Фоновая подсветка может возникать от предметов, расположенных сбоку от контролируемого элемента (2, см. рисунок 1), и быть отраженной другими предметами (3, см. 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 в пределах 0,4...6,7%, соответственно. Лампы накаливания, расположенные на таком же расстоянии, дают погрешность в 0,2...3,1%. При необходимости применяют ряд 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).

Математическое выражение погрешности измерения температуры поверхности стальных элементов с использованием инфракрасного излучения вытекает из следующих соображений. В монохроматическом интервале длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + \Delta\lambda$  величина плотности потока энергии черного тела с температурой  $T$  определяется законом Планка:

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

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  $\lambda$ , 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  $\epsilon_{\lambda T} < 1$ , будет всегда отрицательной. Поэтому действительная температура таких тел больше их яркостной температуры. Дифференцируя выражение (3), находим:

$$\Delta T \frac{\lambda}{c_2} \cdot T^2 \cdot \frac{\Delta \epsilon_{\lambda T}}{\epsilon_{\lambda T}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) можно получить выражение для относительной ошибки определения действительной температуры реального тела:

$$\left| \frac{\Delta T}{T} \right| = \frac{\lambda \cdot T}{c_2} \cdot \left( \frac{1 - \exp \frac{c_2}{\lambda \cdot T}}{\exp \frac{c_2}{\lambda \cdot T}} \right) \cdot \left( \left| \frac{dE_{\lambda T}}{E_{\lambda T}} \right| + \left| \frac{d\epsilon_{\lambda T}}{\epsilon_{\lambda T}} \right| \right). \quad (5)$$

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  $\left( \frac{dE_{\lambda T}}{E_{\lambda T}} \right)$ , излучательной способности  $\left( \frac{d\epsilon_{\lambda T}}{\epsilon_{\lambda T}} \right)$  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  $\epsilon_{\lambda T}$  изменяется при дальнейшем развитии деформаций. Поэтому при измерениях температуры поверхностей с переменной излучательной способностью необходимо производить проверку точности с использованием тестовых объектов. В качестве тестовых объектов можно применить чистые вещества (металлы), температуры плавления которых хорошо известны. При измерениях температуры стальных поверхностей элементов по инфракрасному излучению повышения точности измерений можно добиться методом вычитания нулевого кадра или сравнением яркостной температуры с температурой тела в реперной зоне, определяемой контактным методом. Измерение комбинированным способом температур поверхности реперных зон показывает, что в лабораторных экспериментах погрешность измерения величин температур поверхности образцов по инфракрасному излучению не превышала  $\pm 2,0^\circ$ . В производственных условиях (при наличии неравномерного слоя пыли на поверхности стальных конструкций) погрешность возрастала до 7...10% от измеряемой величины. 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 др.). Для измерений деформационной температуры стальных элементов следует учитывать при выборе требуемой частоты кадров время выравнивания температуры по

поперечному сечению контролируемого элемента. При толщинах стального проката 8...25 мм приемлемым является время формирования кадра термофильма в течение 0,5...2,0 с. Кроме этого, усилия в элементах стальных конструкций изменяются с конечной скоростью. Для 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 ГОСТ 1497-84 проводятся со скоростью деформирования выше указанной, а элементы стальных конструктивных форм при их «квазистатической» работе имеют тот же порядок скорости нагружения.

**Заключение.** Учитывая вышеизложенные ограничения и рекомендации, можно обеспечить высокую точность измерения температуры поверхности изделий и с использованием требований стандартов или аттестованных методик выполнить диагностику работоспособности технических систем и изделий тепловым методом.

УДК 519.1

Ю. П. Нерода

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи

### ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ НАВЫКОВ СТУДЕНТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ КУРСА МАТЕМАТИКИ

**Введение.** Как показывает практика, студенты сельскохозяйственных специальностей считают математику «ненужным» предметом, они не осознают цели изучения математики, и, как результат, у них слабо формируются знания, умения и навыки, позволяющие им свободно ориентироваться в конкретных заданиях, применять знания для решения задач, непосредственно связанных с их будущей профессиональной деятельностью. Целенаправленное внедрение профессионально ориентированных математических задач ведет к повышению качества математических знаний, повышению уровня обучаемости, мотивации к изучению математики, т. е. формирует профессиональную компетентность.

**Основная часть.** Приведем примеры профессионально ориентированных задач по некоторым темам, имеющих реальное, практическое содержание, раскрывающих практическую ценность и значимость приобретенных математических знаний.

Тема «Уравнения. Системы линейных уравнений».

Задача 1. Картофель посадили на двух участках: опытном и контрольном. Опытный участок больше контрольного на 20 га. С меньшего участка получили картофеля 24 т с 1 га, а с большего — 32 т с 1 га. Какова площадь каждого участка, если с обоих участков было собрано 3 160 т?

Задача 2. С 1 га подсолнечника можно получить масла, жмыхов и лузги 12,6 ц, причем масла на 0,2 ц больше, чем жмыхов, а лузги в 2,5 раза меньше, чем масла и жмыхов. Определить, сколько масла, жмыхов и лузги получают с 1 га.

Тема «Кривые второго порядка».

Задача 3. Средний урожай люцерны  $y$  в зависимости от глубины орошения  $x$  характеризуется уравнением  $y = 0,0028x^2 + 0,253x + 3,52$ , где  $x$  — в см,  $y$  — в ц/га. Постройте кривую урожайности на интервале  $[0; 30]$ . Определите по графику, при каких значениях  $x$  урожай будет наибольшим на заданном отрезке  $[1]$ .

Тема «Производная и дифференциал. Применение производной». Решение следующих задач подразумевает нахождение производной, исследование на экстремум, переход от математических результатов к языку задачи.

Задача 4. Требуется соорудить клумбу и огородить ее декоративным забором. Периметр клумбы должен равняться 6 м. Определить размеры клумбы, на забор для которой потребуется наименьшее количество материала.

Задача 5. Пастбищные водопоильные желоба для коров иногда устраивают из трех одинаковых досок, сбивая их под некоторым тупым углом величины  $\alpha$ . Каким должен быть угол  $\alpha$ , чтобы получился желоб наибольшей вместимости? (рисунок 1).

Тема «Дифференциальные уравнения». Дифференциальные уравнения имеют широкое применение при моделировании физических и биологических процессов. Студенты должны вспомнить физический смысл производной и применить его к решению задачи. При нахождении общего решения отрабатываются навыки интегрирования.

Задача 6. Составить дифференциальное уравнение, описывающее динамику прироста биомассы популяции кроликов, и найти его решение. Известна начальная биомасса популяции  $m_0 = 35 \text{ кг}$  при  $t = 0$ , скорость прироста биомассы кроликов пропорциональна биомассе популяции с коэффициентом  $k = \frac{3}{4 + 6t}$ . Найти величину биомассы кроликов в момент времени

$T = 2$ .

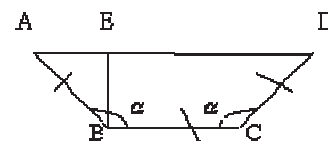


Рисунок 1 — Графическая интерпретация решения задачи с помощью производной