

Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. 1999. Вип. 2(6). С. 181 – 185. 3. *Королев А.В., Баранник В.В.* Метод восстановления изображений // Системы обработки информации. Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. 2001. Вип. 2(12). С. 21- 25.

Поступила в редколлегию 12.11.2001

**Рецензент:** д-р техн. наук Фоменко О.Н.

**Баранник Владимир Викторович**, канд. техн. наук, сотрудник информационно-вычислительного центра ХВУ. Научные интересы: обработка информации. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. 40-28-47.

**Королёва Наталья Анатольевна**, аспирант ХарГАЖТ. Научные интересы: обработка информации. Адрес: Украина, 61050, Харьков, пл. Фейербаха, 7, тел. 20-69-61.

УДК 620.179.13

## **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ**

*КУХАРЕВ Ю.А.*

Рассматриваются вопросы анализа данных теплового контроля трубопроводов в реальном масштабе времени. Указываются проблемы, связанные с его проведением. Описывается применение метода потенциалов для решения обратных задач теплопроводности при контроле трубопроводов, излагаются экспериментальные данные проверки адекватности метода.

### **1. Введение**

Учитывая высокую степень износа трубопроводов (большинство их эксплуатируется более 30 лет), повышение безопасности транспортировки жидких и газообразных продуктов по трубопроводам является на сегодняшний день важной технической задачей для Украины и стран СНГ. С появлением портативных неохлаждаемых тепловизоров активизировались работы по применению инфракрасной (ИК) техники в тепловом контроле трубопроводов. В Украине и России в этом направлении были проведены натурные испытания в целях определения требований к ИК приборам контроля, которые также подтвердили эффективность метода [1].

В процессе проведения контроля важным этапом является анализ получаемых данных, что практически невозможно без компьютерного моделирования тепловых процессов в объекте контроля. На сегодняшний день в этом направлении получены следующие результаты: разработаны тепловые модели бездефектного трубопровода [1,2], без дефекта типа “утечка” жидких [2] и газообразных продуктов [1], без дефекта типа “изменение толщины стенки” и “нарушения изоляции” [2]. Перечисленные выше модели были реализованы в виде компьютерных программ. Одной из последних является программа “Трубопровод”, позволяющая моделировать тепловые процессы для нескольких источников тепла в грунте со сложными и изменяющимися граничными условиями на его поверхности.

Важнейшим требованием к такого рода программам является оперативность обработки данных (практически в реальном масштабе времени). Однако все

известные на сегодняшний день программы используют при расчете тепловых полей численные методы (метод конечных разностей), что обуславливает их сравнительно долгое время работы. Опыт применения программы “Трубопровод” показал, что на одну итерацию в зависимости от параметров объекта и скорости вычислительной машины затрачивается от десятков секунд до десятков минут. При решении обратных задач (нахождение параметров объекта по температурному распределению) это время увеличивается в 3 – 10 раз. Поэтому возник вопрос о применении новых методик для анализа результатов теплового контроля трубопроводов. В настоящее время для других объектов (сотовых конструкций и др.) теплового контроля все чаще применяются численно-аналитические методы [3]. Кроме того, при контроле трубопроводов в подавляющем большинстве случаев требуется анализ стационарных тепловых полей, что существенно упрощает задачу.

Рассмотрим возможность применения численно-аналитических методов для обработки данных теплового контроля трубопроводов в реальном масштабе времени.

### **2. Применение теории потенциалов при моделировании тепловых процессов в трубопроводах**

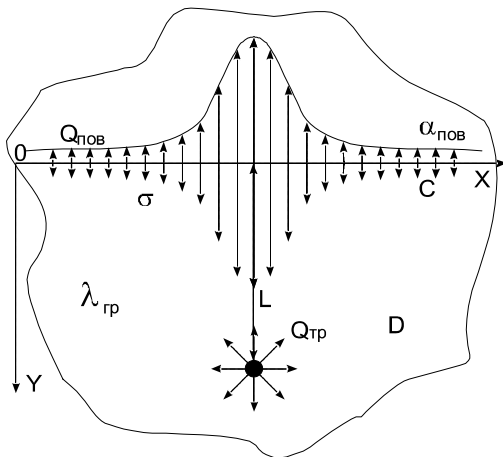
Вначале рассмотрим применение двумерной теории потенциалов для моделирования стационарных тепловых полей, которая может быть легко обобщена на трехмерный объект контроля. Подробно тепловая модель объекта контроля описана в [2]. Упрощенно представим бездефектный трубопровод протяженным источником тепла  $T_{тр}$  ( $Q_{тр}$ ) в бесконечном пространстве  $D$  с теплопроводностью  $\lambda_{тр}$ , что позволяет рассмотреть двумерную область (рисунок).

Пусть эта область делится на две части прямой  $S$  (поверхностью грунта). В одной из них на расстоянии  $L$  от  $S$  лежит источник тепла (трубопровод)  $Q_{тр}$ . Через  $S$  проходит тепловой поток плотностью  $q_{пов}(x,0)$ , вызванный присутствием источника тепла. Для упрощения решения мы сводим задачу к задаче в однородном пространстве. Для этого на прямой  $S$  располагается распределенный источник с плотностью  $\sigma(x,0) = 2q_{пов}(x,0)$ , так как происходит нагрев двух полупространств. В общем случае если  $S$  не прямая, то кроме распределенного источника тепла на поверхности задается распределение диполей тепла [4], но можно доказать, что в данном

случае их воздействие равно 0. Двумерное уравнение Лапласа имеет элементарное решение, называемое логарифмическим потенциалом точечного источника, при  $r \neq \rho$  [4]:

$$\psi_0(r-\rho) = \ln \frac{1}{|r-\rho|} = \ln \frac{1}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}}, \quad (1)$$

здесь  $r, \rho$  – радиус-вектор источника тепла и точки измерения температуры;  $\xi, \eta, x, y$  – радиус-вектор источника тепла и точки измерения температуры.



Применение адаптивного алгоритма при моделировании тепловых процессов

Формула объемного потенциала для двумерного случая:

$$\int_D Q(\rho) \psi_0(\rho) dA(\rho) = \int_D Q(\rho) \ln \frac{1}{|r-\rho|} dA(\rho), \quad (2)$$

где  $Q(\rho)$  – объемная плотность источников тепла.

Формула поверхностного распределения источников тепла:

$$\int_C \sigma(\rho) \psi_0(\rho) dS(\rho) = \int_C \sigma(\rho) \ln \frac{1}{|r-\rho|} dS(\rho), \quad (3)$$

здесь  $\sigma(\rho)$  – поверхностная плотность источников тепла. Формула поверхностного распределения диполей тепла:

$$-\int_C p(\rho) \frac{\partial \psi_0(\rho)}{\partial n} dS(\rho) = -\int_C p(\rho) \frac{\partial}{\partial n} \ln \frac{1}{|r-\rho|} dS(\rho), \quad (4)$$

где  $p(\rho)$  – поверхностная плотность диполей тепла.

Тогда температура на поверхности грунта описывается следующей формулой:

$$T(r) = \frac{1}{2\pi} \int_D \psi_0(r-\rho) \nabla_\rho^2 T(\rho) dA(\rho) - \frac{1}{2\pi} \times \int_C T(\rho) \frac{\partial \psi_0}{\partial n} dS(\rho) - \frac{1}{2\pi} \int_C \psi_0(r-\rho) \frac{\partial T(\rho)}{\partial n} dS(\rho). \quad (5)$$

Учитывая, что на границе  $C$  теплообмен осуществляется по закону Ньютона, можно записать:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\alpha_{пов}}{\lambda_{гр}} (T(r) - T_{возд}), \quad (6)$$

где  $T_{возд}$  – температура окружающей среды.

По закону сохранения энергии при установившемся стационарном режиме:

$$\nabla_\rho^2 T(\rho) = \frac{1}{\lambda_{гр}} \int_C \alpha_{пов} (T(r) - T_{возд}) dS(\rho). \quad (7)$$

Поскольку  $C$  прямая, то потенциал, создаваемый диполями, расположенными на  $C$ , равен 0:

$$\frac{1}{2\pi} \int_C T(\rho) \frac{\partial \psi_0}{\partial n} dS(\rho) = 0. \quad (8)$$

Учитывая (6)-(8), выражение (5) запишем следующим образом:

$$f(r) = \frac{1}{\pi \lambda_{гр}} \int_D \psi_0(r-\rho) \int_C \alpha_{пов} (T(r) - T_{возд}) \times dS(\rho) dA(\rho) - \frac{1}{2\pi \lambda_{гр}} \int_C \psi_0(r-\rho) \alpha_{пов} \times (T(r) - T_{возд}) dS(\rho) - T(r), \quad (9)$$

где  $f(r)$  – критерий минимизации.

Аналогичным образом записывается формула для трехмерного случая с произвольными границами и источниками тепла. Согласно теореме Грина:

$$f(r) = \frac{1}{2\pi \lambda_{гр}} \int_V \varphi_0(r-\rho) \int_S \alpha_{пов} (T(r) - T_{возд}) \times dS(\rho) dV(\rho) - \frac{1}{4\pi \lambda_{гр}} \int_S \varphi_0(r-\rho) \alpha_{пов} \times (T(r) - T_{возд}) dS(\rho) - T(r), \quad (10)$$

здесь  $\varphi_0(r-\rho) = \frac{1}{|r-\rho|}$ ;  $V$  – трехмерная замкнутая или незамкнутая область;  $S$  – двумерная область.

При использовании выражений (9),(10) значения интегралов находятся численными методами, а решение обратной задачи теплопроводности сводится к минимизации функционала  $f(r)$ . При решении обратных задач методом потенциалов зачастую удается сократить на единицу размерность используемых при расчетах массивов температур. Кроме этого, мы получаем значение функционала за одну итерацию, в то время как для метода конечных разностей требуется не менее пятидесяти. Это позволяет сократить объем необходимых вычислений в сотни раз, что в свою очередь дает возможность при той же мощности вычислительных машин решать одну или несколько из следующих задач:

- ускорение процедуры вычисления;
- повышение точности получаемых результатов за счет увеличения числа ячеек сетки при численном интегрировании;
- варьирование при решении обратных задач теплопроводности большим количеством параметров.

В перспективе, применив к формулам (9),(10) преобразование Фурье, можно получить спектры термограмм, соответствующие различным дефектам. Применение спектрального анализа термо-

грамм может повысить вероятность выявления дефектов в условиях сильных помех.

### 3. Описание компьютерной программы

Описанная во втором разделе методика была реализована в виде экспериментальной компьютерной программы “Анализ”, которая позволяет решать как прямую, так и обратную задачи теплопроводности. Программа написана на языке Visual Basic и предназначена для эксплуатации на компьютерах с операционными системами Windows 95/98/NT/Me. Она входит в пакет компьютерных программ “Диагностика”, в который уже вошли программы “Трубопровод” и “Карат”. Для совместного использования данных программ комплекса между ними реализована совместимость. В качестве исходных данных продукт “Диагностика” может получать либо массив температур на поверхности грунта и некоторые данные об объекте контроля для решения обратной задачи теплопроводности, либо полные данные об объекте контроля для нахождения теплового распределения на поверхности грунта. Источником данных может служить программа “Трубопровод” либо программно-аппаратный модуль сопряжения тепловизора с компьютером. В результате расчета программа выдает либо кривую температурного распределения на поверхности грунта (при решении прямой задачи), либо неизвестные параметры объекта контроля (при решении обратной задачи). Скорость расчета одного температурного распределения не превышает 2с в зависимости от количества шагов разбиения области анализа. При этом, как показал анализ, большую часть этого времени занимает визуализация результатов, а не сам расчет. Таким образом, оптимизация вывода графики на экран может еще сократить время работы программы.

### 4. Проверка адекватности метода

Учитывая сложность в проведении натурных испытаний, для получения исходных данных был проведен численный эксперимент. Это позволило также варьировать в некоторых пределах значения параметров грунта и трубопровода. Компьютерное моделирование проводилось при помощи программы “Трубопровод”. На первом этапе с помощью программ “Трубопровод” и “Анализ” проводился расчет тепловых полей на поверхности грунта при заданных параметрах грунта и источников тепла (двух- и трехмерная модели) и последующее сравнение полученных данных. Среднеквадратическое отклонение полученных результатов составило от 2 до 20 % в зависимости от задаваемых параметров. При этом было выяснено, что изменение параметров грунта не оказывает существенного влияния на размеры погрешности. Погрешность была незначительной: 2-3% для труб, лежащих на глубинах более 1м, и практически не зависела от диаметра трубопровода. На глубинах менее 1 м погрешность увеличивается с уменьшением глубины залегания

трубы и уменьшением ее диаметра. Это связано с погрешностью аппроксимации формы трубы при использовании сеточного метода и влиянием граничных условий на поверхности грунта непосредственно на объект контроля при проведении моделирования. Данная проблема решается увеличением числа ячеек сетки, для чего требуется применение более быстродействующих вычислительных средств.

На втором этапе в качестве исходных брались параметры грунта и диаметр трубопровода, а также температурное распределение на его поверхности, рассчитанное при помощи программы “Трубопровод”. Проводился расчет глубины залегания трубопровода (решалась обратная задача теплопроводности). Среднеквадратическая погрешность в этом случае не превысила 5% для труб, лежащих на глубинах от 0.8 м.

### 5. Выводы

1. Предложен метод численно-аналитического анализа термограмм при тепловом контроле трубопроводов, который позволяет значительно сократить объемы необходимых вычислений. В результате этого появилась возможность не только анализа данных в реальном масштабе времени, но и повышения точности получаемых результатов.
2. Проведенные эксперименты показали адекватность применяемых методов. Среднеквадратическая погрешность определения глубины залегания трубопровода для глубин более 0,8 м не превышает 5%.
3. Перспективой развития данного метода является проведение спектрального анализа термограмм для повышения вероятности выявления дефектов в условиях сильных помех.
4. Новые методики реализованы в экспериментальной программе “Анализ”, которая может быть использована при анализе данных контроля реальных объектов.

**Литература:** 1. *Бабаев В.П., Купко А.В., Холодов В.И.* Компьютеризированная система диагностики утечек газа из трубопроводов // Вестник науки и техники. 1997. №1. С.125-126. 2. *Стороженко В.А., Мельник С.И., Кухарев Ю.А.* Новые методики для анализа информации при тепловом контроле трубопроводов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2000. №4. С.19-20. 3. *Стороженко В.О., Мельник С.И., Орел Р.П.* Новый алгоритм теплової томографії // Методи та прилади контролю якості. 1999. №4. С.26-30. 4. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных и инженерных работников. М.: Наука, 1980. С. 130-145.

Поступила в редколлегию 12.09.2001

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф. Исаев А.А.

**Кухарев Юрий Александрович**, аспирант ХНУРЭ. Научные интересы: тепловая диагностика трубопроводов и энергооборудования. Адрес: Украина, 61000, Харьков, пер. 17 Партсъезда, д.6, кв. 84, тел. (0572) 93-85-95.