УДК 514.957; 519.633.6

Моделирование нестационарных тепловых полей от заглубленного теплоизолированного трубопровода и его диагностика[1]

Н. А. Ваганова

Институт математики и механики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. Для обнаружения повреждений подземного трубопровода создана математическая модель, позволяющая учесть наиболее существенные факторы, влияющие на распределение температуры на дневной поверхности. Для реализации этой модели разработан программный комплекс и приведены результаты численных расчетов. С помощью этих расчетов, в частности, установлено, что современная тепловизионная аппаратура имеет принципиальную возможность определить несанкционированную врезку в магистральный трубопровод на глубине два метра в глинистом грунте.

Ключевые слова: моделирование распространения тепла, уравнение теплопроводности, нелинейные граничные условия

---

1 Введение

В настоящее время методы неразрушающего контроля, основанные на реакции материалов на тепловое воздействие, а также измерении лучистой энергии, излучаемой какими-либо поверхностями, приобретают все большее значение. К задачам такого рода относятся и задачи диагностики состояния магистральных трубопроводов, в частности, определение возможных областей повреждения теплоизоляции трубопровода и трещин. Как

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 05–01–00217, 05–01–00098)

правило, интересует целостность трубопровода, а также общая изношенность его оболочки. Также важной задачей является обнаружение утечки или несанкционированной врезки. Для такой диагностики осуществляется съемка тепловых полей на дневной поверхности, находящейся над трубопроводом [1]. Обычно съемка осуществляется с вертолета с помощью тепловизора (современные тепловизоры имеют разрешимость до сотых долей градуса), позволяющего выделить на дневной поверхности неоднородности тепловых полей. Основными достоинствами теплового контроля являются высокая безопасность работы, незначительные эксплуатационные затраты, недорогое техническое обслуживание, низкие инспекционные расходы. Сравнение с идеальной моделью рассеивания тепла позволяет определить все отклонения температуры, важные для режимов эксплуатации. Таким образом, для эффективного анализа реальных тепловых полей необходимо иметь удобный инструмент, позволяющий получить «идеальный тепловой портрет».

В настоящее время эффективным способом исследования многих проблем стал вычислительный эксперимент. Суть вычислительного эксперимента состоит в комплексном изучении всей технологической цепочки: изучаемый процесс — математическая модель — вычислительный алгоритм — программа на компьютере. Во многих случаях вычислительный эксперимент, заменяя дорогостоящий натурный, позволяет с минимальными затратами эффективно прогнозировать и управлять исследуемым процессом или объектом.

Одним из методов получения и изучения тепловых полей в различных средах является непосредственное численное моделирование процессов теплопереноса. В ходе численных экспериментов было выяснено,что солнечное излучение является существенным фактором,, влияющим на формирование теплового поля от подземного источника тепла. Представленная выше физическая задача может быть описана линейным уравнением теплопроводности в трехмерной области при наличии нелинейных граничных условий на дневной поверхности [2]. Теоремы существования и единственности решения для некоторых таких моделей рассматривались в работах П. Куитнера [3].

Необходимость изучения нелинейной модели проявляется при исследовании многих задач. Например, в работе С. С. Титова [4] рассматривалась задача о распределении температуры в тонком кольце, нагреваемом точечным источником (с учетом излучения при сварке), описываемая параболическим уравнением с нелинейной правой частью. Сравнение построенного решения в виде специального тригонометрического ряда для линейной и нелинейной модели показало, что линейная теория дает существенно завышенные значения температуры.

При построении алгоритмов расчета нелинейное граничное условие, как правило, аппроксимируется на решении, полученном либо из линейной модели, либо вычисленном на предыдущем шаге итерационного процесса. Например, в работах В. П. Шапеева, А. Н. Черепанова и др. авторов [5] одно из граничных условий для уравнения теплопереноса включает в себя нелинейный радиационный коэффициент теплоотдачи, значение которого аппроксимируется на решении, вычисленном на предыдущей итерации.

Таким образом, представляется весьма актуальным вопрос о решении прямой задачи нахождения теплового поля на дневной поверхности. Решение и моделирование этой прямой задачи позволяет ответить на многие интересующие вопросы и получить приемлемые качественные и количественные результаты.

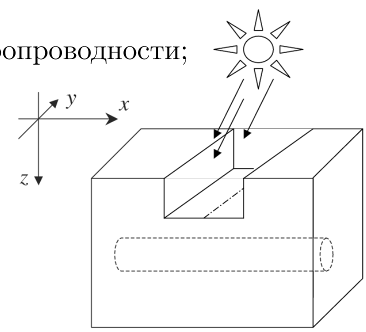
2 Описание расчетной методики

В [2] описывается методика расчета трехмерных тепловых полей от заглубленного трубопровода. Процесс теплопереноса в трехмерной области моделируется линейным уравнением теплопроводности с нелинейным граничным условием, включающим нелинейный радиационный коэффициент теплоотдачи четвертого порядка. В расчетную модель также добавлена неровность дневной поверхности: предполагается, что на поверхности грунта выкопана траншея с вертикальными стенками прямоугольного сечения.

В трехмерной области рассматривается задача о распространении тепла в грунте от нагретой и частично теплоизолированной трубы. Эта задача описывается линейным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \tag{1}$$

где $\lambda_k = \dfrac{\kappa}{\rho c_v}$ — коэффициент температуропроводности;



ρ — плотность;

κ — коэффициент теплопроводности;

c_v — удельная теплоемкость.

Область может иметь несколько слоев с различными λ_k. На границах стыков слоев задается уравнение баланса потоков. На боковых стенках выделенного параллелепипеда поток тепла равен нулю. На нижней грани задается условие постоянства температуры. Граничное условие на трубопроводе имеет вид:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \varepsilon(x,y,z) \left(T\Big|_{trub.} - T\Big|_{grunt} \right) \mathbf{n}, \tag{2}$$

где $\mathbf{n}$ — нормаль к поверхности трубопровода; $\varepsilon(x,y,z)$ — коэффициент теплоизоляции, зависящий от степени поврежденности оболочки трубы. Если $\varepsilon \approx \delta^{-1}$, где δ — шаг сетки, то считается, что $T_{grunt} = T_{trub}$.

На дневной поверхности выполняется условие равновесия потоков, приносящих и уносящих энергию. Пусть $V_{sol} = (X_{sol}, Y_{sol}, Z_{sol})$ — вектор направления солнечного света. С учетом направления солнечного потока доля энергии, ушедшая в грунт, будет изменяться от точки к точке и составит: $\alpha q \overline{V_{sol}}$, где α — доля поглощенной солнечной энергии; q — мощность солнечного потока; $\overline{V_{sol}}$ — нормализованная проекция вектора солнечного света на поверхность; $\overline{V_{sol}} = \dfrac{Z_{sol}}{\sqrt{X_{sol}^2 + Y_{sol}^2 + Z_{sol}^2}}$ на горизонтальных поверхностях. Учитывая неровность поверхности в постановке задачи и направление солнечного света, на дневной поверхности будут как освещенные участки, так и затененные, для которых получаемая солнечная радиация равна нулю. Пусть b — коэффициент теплообмена дневной поверхности и грунта, σ — постоянная Больцмана.

$$\alpha q \overline{V_{sol}} + b\left(T_{vozd.} - T|_{poverhn.}\right) = \sigma T^4 + \kappa \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}\bigg|_{poverhn}. \tag{3}$$

Это — нелинейное граничное условие, которое делает задачу (1), (3) нелинейной, в отличие от линейных приближений, использованных ранее [1].

Для расчета распределения температуры в трехмерной области используется метод конечных разностей с расщеплением по пространственным переменным на ортогональной сетке, равномерной или адаптирующейся по z вблизи поверхности. Исходное уравнение по каждому из пространственных направлений аппроксимируется неявной центрально-разностной трехточечной схемой. Система разностных линейных алгебраических уравнений имеет трехдиагональный вид и решается методом прогонки. Для решения нелинейного алгебраического уравнения 4-ой степени (на верхней границе) используется метод Ньютона.

3 Результаты численных экспериментов

На Рис. 1, 2 представлены тепловые картины на дневной поверхности при различном положении траншеи относительно трубопровода. Солнце — с «запада», вдоль трубопровода. Тепловой след от трубопровода ярче проступает на дне траншеи.

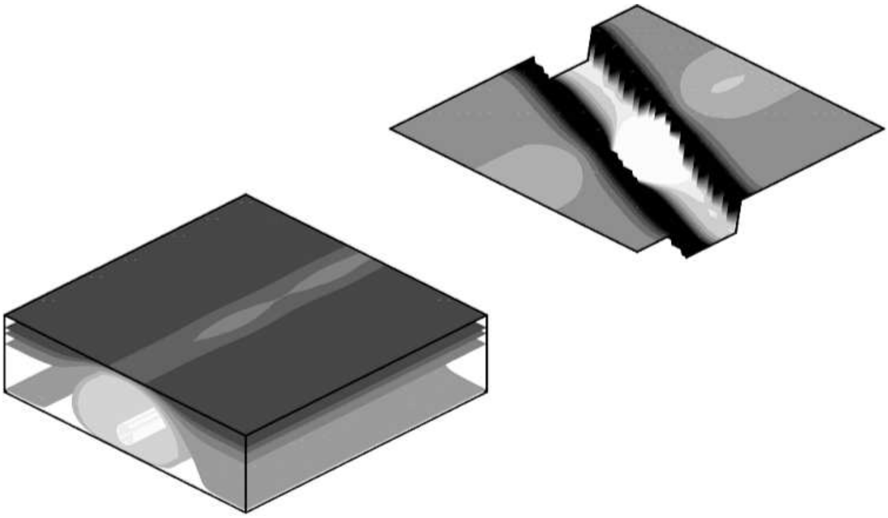


Рис. 1. Поле температур на поверхности при неоднородном источнике (присутствуют замкнутые изотермы), справа — добавлена траншея

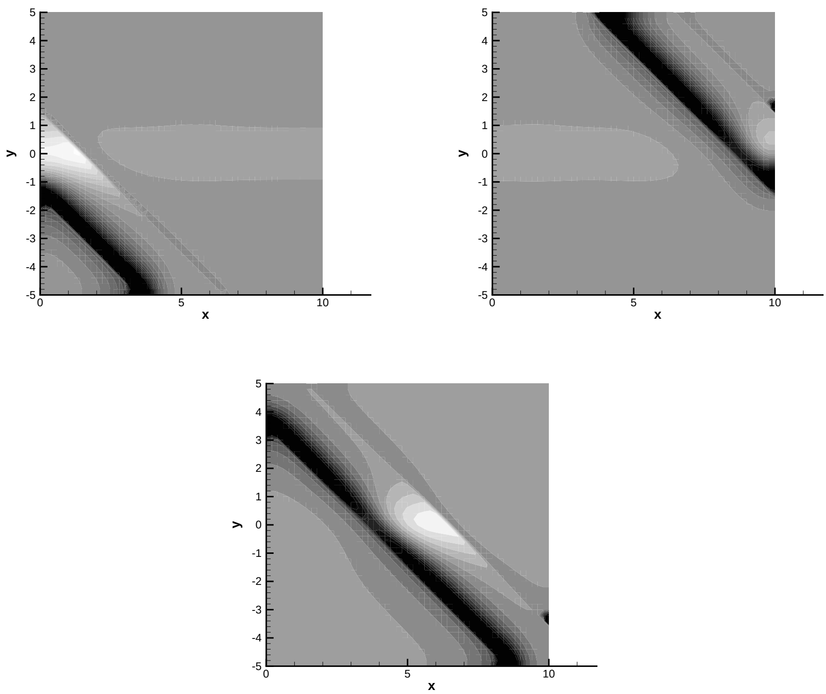


Рис. 2. Поле температур на поверхности при различных положениях траншеи относительно трубопровода

Разработанные методы и программы [2] позволяют «увидеть» тепловой след от трубопровода диаметром 8 см, закопанного в глинистый грунт на глубину 2 м. При разности температуры с дневной поверхностью в 30°C, разность теплового следа трубы с тепловым фоном составит примерно 0.15°C, что вполне достаточно, чтобы различить этот тепловой след на поверхности с помощью современных тепловизоров.

Список литературы

[1] Будадин О. Н., Потапов А. Н. и др. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука, 2002. С. 39–52.

[2] Башуров В. В., Ваганова Н. А., Филимонов М. Ю. Расчет тепловых полей от заглубленного источника с учетом лучистого излучения и при возможной неровности дневной поверхности // Проблемы теоретической и прикладной математики. Труды 36-ой Региональной молодежной конференции. 2005. Екатеринбург. С. 115–118.

[3] Quitner P. Global existence of solutions of parabolic problems with nonlinear boundary conditions // Singularities and differential equations Banach center publications. 1996. V. 33. Pp. 309–314.

[4] Титов С. С. Решение периодических задач Коши с помощью специальных тригонометрических рядов // Числ. методы механики сплошной среды. Новосибирск. 1984. Т.9, № 2. 1978. С. 112–124.

[5] Черепанов А. Н., Шапеев В. П., Фомин В. М., Семин Л. Г. Численное моделирование теплофизических процессов при лазерно–лучевой сварке с образованием парового канала // Прикладная механика и техническая физика. Т. 47, № 5. 2006. С. 88–96.