

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГРУНТА С МАГИСТРАЛЬНЫМ ТРУБОПРОВОДОМ НА ЕСТЕСТВЕННУЮ И ДЕФОРМАЦИОННУЮ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

В.К. Тян¹, Т.Н. Дрынкина²

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ОАО «Гипровостокнефть»
443041, г. Самара, ул. Красноармейская, 18

Представлен графоаналитический метод декомпозиции температурного поля грунта, полученного в виде экспериментальных зависимостей, на отдельные составляющие, обусловленные различными факторами. Метод может быть полезен в вопросах системного анализа аддитивных составляющих сложных процессов.

Ключевые слова: *декомпозиция, температурное поле, магистральный трубопровод.*

Расчету температурных полей грунта с трубопроводами, предназначенными для перекачки углеводородов, посвящено большое количество работ [1, 2, 3, 4]. Практически во всех научных трудах расчетные формулы определения стационарных температурных полей получены при определенных допущениях, в частности, предполагаются постоянными теплофизические свойства грунта.

Однако со временем теплофизические свойства могут меняться, числовые характеристики теплофизических свойств могут быть весьма приближенными или вообще отсутствовать. С другой стороны, температурное поле грунта может измениться при изменении температуры нефти, а более точно, изменится деформационная составляющая температуры грунта, определение которой является интересной научной задачей.

В этом случае построение температурных полей прямыми замерами температуры в различных точках грунта вокруг трубопровода оправдано и актуально. Экспериментальные замеры температурных полей [1] подтверждают адекватность известных теоретических результатов реальным температурным полям. Следует отметить высокую стоимость проводимых экспериментов по построению температурного поля.

С учетом трудоемкости указанных замеров задача сформулирована следующим образом.

На основании прямых замеров температуры грунта идентифицировать теплопроводность грунта как функцию глубины и разложить температурное поле на две составляющие: температурное поле грунта в естественных условиях (естественная составляющая) и деформацию естественного температурного поля грунта под влиянием трубопровода (деформационная составляющая).

Стационарное температурное поле грунта описывается уравнением Лапласа. Решение этого уравнения вследствие его линейности находится в виде суммы

$$T_{\text{гр}}(x,y) = T_{\text{ест}}(x,y) + T_{\text{тр}}(x,y), \quad (1)$$

Владимир Константинович Тян (д.т.н., доц.), зав. кафедрой трубопроводного транспорта, декан нефтетеchnологического факультета.

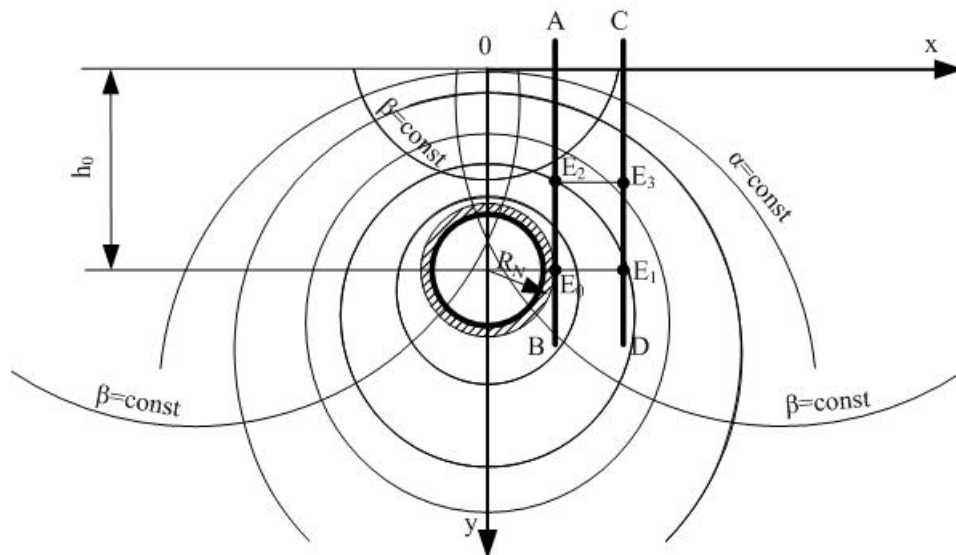
Татьяна Николаевна Дрынкина, ведущий инженер.

где функция $T_{есm}(x,y)$ описывает температурное поле грунта в естественных условиях, а слагаемое $T_{mp}(x,y)$ учитывает деформацию естественного температурного поля грунта под влиянием теплового действия трубопровода. Заметим, что естественная составляющая по горизонтали постоянна.

Температурное поле грунта с трубопроводом и системой измерения одномерных температурных полей АВ и CD в скважинах № 1 и № 2 соответственно представлено на рис. 1.

Из анализа симметричного относительно оси y температурного поля (см. рис. 1), построенного на основании известных формул [1], следует, что изотермы поля «уплотняются» над трубой и «разрезаются» при удалении от поверхности грунта в положительном направлении координаты y , т. е. при углублении точек замера температуры. Таким образом, температурный $gradT$ имеет наибольшее значение над трубой. Физически это объясняется максимальными тепловыми потерями в промежутке от верхней образующей трубопровода до поверхности грунта, что обусловлено интенсивным теплообменом на границе «грунт – атмосфера». Все вертикальные линии, находящиеся между прямой $O_{тр}O$ и вертикальной прямой АВ, касающиеся поверхности трубопровода, пересекаются всеми изотермами. Однако чем ближе эта прямая к $O_{тр}O$, тем больше погрешность локализации измеренных значений температуры.

Для декомпозиции температурного поля предлагается измерять температуру вдоль прямой АВ и прямой CD (рис. 1).



Р и с . 1 . Температурное поле грунта в декартовой x, y и биполярной системах координат.
Измерение температуры грунта в скважинах № 1 (АВ) и № 2 (CD)

В этом случае, как следует из вышесказанного, все изотермы пересекают прямую АВ, т. е. информация о температурном поле грунта содержится в температурном поле отрезка АВ, а излагаемый ниже алгоритм позволяет провести декомпозицию поля на основании полученных экспериментально измеренных одномерных температурных полей вдоль прямых АВ и CD (см. рис. 1).

На практике наиболее вероятным применяющимся параметром по глубине является теплопроводность грунта $\lambda_{zp}(y)$. Это обусловлено ее зависимостью от многих факторов, которые трудно идентифицировать.

Для решения поставленной задачи в работе необходимо произвести подгонку математической модели к экспериментально снятым или симитированным одномерным температурным полям АВ и CD (см. рис. 1) за счет нахождения оптимальной по квадратическому критерию функции теплопроводности грунта $\lambda_{zp}(y)$.

Рассмотрим изменение по глубине одномерного температурного поля грунта при следующих условиях:

1) температура грунта замерялась на поверхности трубопровода (на границе «теплоизоляция – грунт», то есть при $x = 0,61$ м (рис. 2);

2) температура грунта замерялась в термометрической скважине на расстоянии $x = 1,22$ м от оси трубопровода (см. рис. 2);

3) температура грунта на дневной поверхности одинакова и равна $+5,156$ °С.

Уравнения температурных полей АВ и CD имеют вид [1]

$$T_{zp1}(x, y) = \frac{T_{н.с} + Bi_2' \cdot T_в}{1 + Bi_2'} + \frac{Bi_2' \cdot (T_{н.с} - T_в)}{1 + Bi_2'} \cdot \frac{y}{H_0} + \frac{(T_N - T_0)}{1 + Bi_2' \cdot \alpha_0} + \left[1 + \frac{Bi_2'}{2} \cdot \ln \frac{(y+c)^2 + 0,61^2}{(y-c)^2 + 0,61^2} \right], \quad (2)$$

$$T_{zp2}(x, y) = \frac{T_{н.с} + Bi_2' \cdot T_в}{1 + Bi_2'} + \frac{Bi_2' \cdot (T_{н.с} - T_в)}{1 + Bi_2'} \cdot \frac{y}{H_0} + \frac{(T_N - T_0)}{1 + Bi_2' \cdot \alpha_0} + \left[1 + \frac{Bi_2'}{2} \cdot \ln \frac{(y+c)^2 + 1,22^2}{(y-c)^2 + 1,22^2} \right], \quad (3)$$

где $\alpha_{в.о.}$ – обобщенный коэффициент теплопередачи от поверхности грунта в воздух; $T_{в.э.}$ – эквивалентная температура воздуха; λ_{zp} – теплопроводность грунта, в котором проложен трубопровод; y – глубина заложения оси трубопровода, считая от дневной поверхности; H_0 – глубина, ниже которой не сказывается сезонное изменение температуры воздуха; $T_{н.с.}$ – температура грунта при $y = H_0$; T_N – температура на поверхности трубопровода в теплоизоляции, т. е. температура на поверхности теплоизоляции; T_0 – температура грунта на глубине заложения трубопровода в естественном состоянии, т. е. при отсутствии действия теплового поля трубопровода; $T_в$ – температура воздуха; c – постоянная, $c = \sqrt{h_0^2 - R_N^2}$;

Bi_2' – критерий Бисселя, который определяется по формуле

$$Bi_2' = \frac{\alpha_{в.о.} \cdot h_0}{\lambda_{zp}}; \quad (4)$$

$\alpha_{в.о.}$ – обобщенный коэффициент теплопередачи от поверхности грунта в воздух; λ_{zp} – теплопроводность грунта, в котором проложен трубопровод.

Зависимости (2), (3) имитируют температурные поля АВ и CD при $\lambda_{zp}(y) = \text{const}$.

По результатам расчетов построены дискретные графики $T_{zp1}(k)$ и $T_{zp2}(k)$ с шагом 0,25 м (рис. 2).

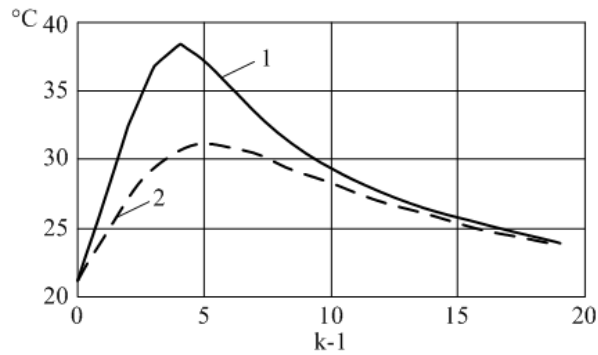
Для имитации грунта с меняющейся теплопроводностью $\lambda_{zp}(y)$ был сделан расчет температурного поля по формулам (2) и (3) с наперед заданной функцией теплопроводности грунта:

$$\lambda_{zp}(y) = \lambda_1 y + \lambda_0; \quad (5)$$

$$\lambda_0 = 1,16 \text{ Вт/(м·град)};$$

$$\lambda_1 = 0,3 \text{ Вт/(м·град)},$$

где датчики фиксируют температурные поля с указанной линейной функцией (5).

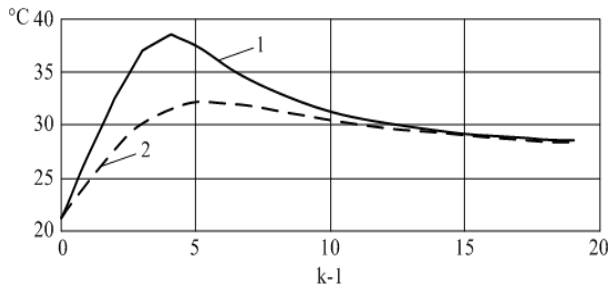


Р и с . 2 . График температурного поля при постоянной теплопроводности:

1 – $T_{гр1}(k)$ в скважине АВ; 2 – $T_{гр2}(k)$ в скважине CD

Эти показания датчиков $T_{Э1}(y, x_1)$ и $T_{Э2}(y, x_2)$ моделируют одномерные температурные поля АВ и CD. При этом, естественно, $\lambda_{zp}(y)$ неизвестна и ставится задача ее идентификации.

Тогда реальное температурное поле, замеренное датчиками, описывается уравнениями (2) и (3) с учетом зависимости теплопроводности грунта от глубины. Соответствующие графики представлены на рис. 3.



Р и с . 3 . График температурного поля при переменной теплопроводности:

1 – $T_{Э1}(k)$ в скважине АВ; 2 – $T_{Э2}(k)$ в скважине CD

Для идентификации теплопроводности грунта зададим структуру формулы грунта от глубины в следующем виде:

$$\lambda(k,a,b) = a \cdot y_k + b. \quad (6)$$

Идентификацию теплопроводности грунта осуществим на основании следующего квадратического функционала $J_{22}(a, b)$:

$$J_{22}(a, b) = \sum_k \left[(T_{Э1}(k) - T_{zp13}(k, a, b))^2 + (T_{Э2}(k) - T_{zp23}(k, a, b))^2 \right] \quad (7)$$

В формуле (7) аппроксимирующие функции в АВ и CD, зависящие от трех аргументов, обозначены через $T_{zp13}(k, a, b)$, $T_{zp23}(k, a, b)$.

В представленной работе оптимизация произведена численным методом.

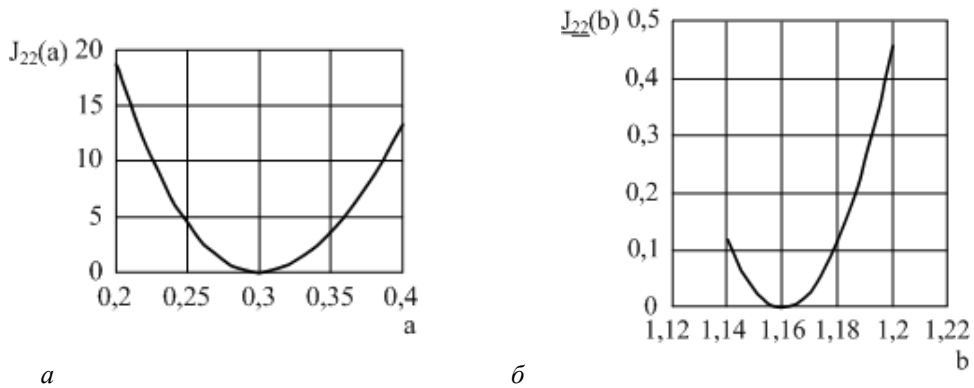
На рис. 4 представлены графики сечений функционала в оптимальных точках.

В результате оптимизации получены следующие результаты

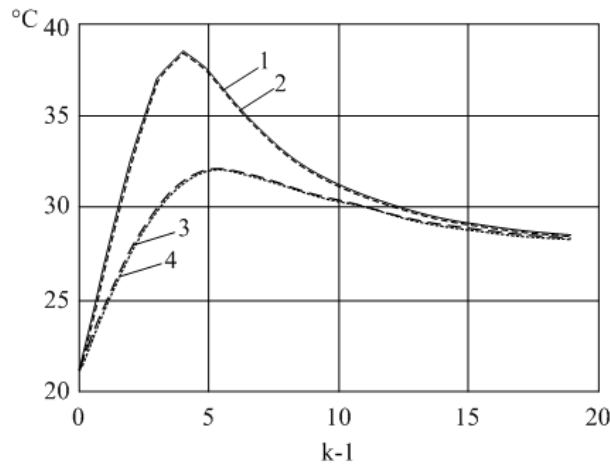
$$\begin{aligned} a &= 0,295; \quad b = 1,168; \\ \lambda(k) &= 0,295 \cdot y_k + 1,168. \end{aligned} \quad (8)$$

Графики аппроксимирующих уравнений тепловых полей для найденных оптимальных значений имеют вид, представленный на рис. 5.

Как следует из анализа представленных графиков, функция теплопроводности грунта идентифицирована с высокой точностью.



Р и с . 4 . График функционала:
a – сечение графика функционала при оптимальном значении *b*;
б – сечение графика функционала при оптимальном значении *a*



Р и с . 5 . Графики экспериментальных и идентифицированных температурных полей:
 1, 2 – температурные поля в скважине АВ; 3, 4 – температурные поля в скважине СД

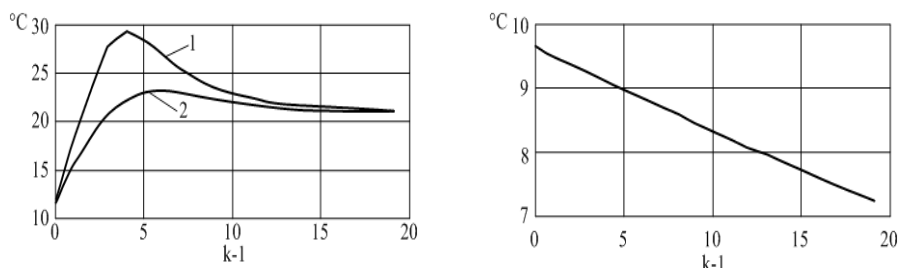
Уравнения оптимальных составляющих (естественной и деформационных) температурных полей имеют следующий вид:

$$T \ln(k) = \frac{T_{\text{нс}} + B_{i2}(k) \cdot T_{\text{в}}}{1 + B_{i2}(k)} + \frac{B_{i2}(k) \cdot (T_{\text{нс}} - T_{\text{в}})}{1 + B_{i2}(k)} \cdot \frac{y_k}{H_0}; \quad (9)$$

$$T_{1д}(k) = \frac{(T_n - T_0)}{1 + B_{i2}(k) \cdot \alpha_0} \cdot \left[1 + \frac{B_{i2}(k)}{2} \cdot \ln \left[\frac{(y_k + c) + 0,5^2}{(y_k - c) + 0,5^2} \right] \right]; \quad (10)$$

$$T_{2д}(k) = \frac{(T_n - T_0)}{1 + B_{i2}(k) \cdot \alpha_0} \cdot \left[1 + \frac{B_{i2}(k)}{2} \cdot \ln \left[\frac{(y_k + c) + 1^2}{(y_k - c) + 1^2} \right] \right]. \quad (11)$$

Соответствующие графики представлены на рис. 6.



Р и с . 6 . Декомпозиция температурного поля:

а – деформационные составляющие: 1 – $T_{1д}(k)$ в скважине АВ; 2 – $T_{2д}(k)$ в скважине CD;

б – естественная составляющая

Таким образом, результаты работы позволяют:

- идентифицировать функцию теплопроводности грунта от глубины;
- оценить влияние теплового потока трубопровода на окружающий грунт;
- проводить мониторинг температурного состояния грунтов вокруг магистральных трубопроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л., Юфин В.А.* Тепловой и гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. – М.: Недра, 1981. – 256 с.
2. *Телегин Л.Г., Ким Б.И., Зоненко В.И.* Охрана окружающей среды при сооружении и эксплуатации газонефтепроводов. – М.: Недра, 1988. – 190 с.
3. *Клементьев А.Ф.* Устойчивость магистральных трубопроводов в сложных условиях. – М.: Недра, 1985. – 113 с.
4. *Кривошеин Б.Л.* Теплофизические расчеты газопроводов. – М.: Недра, 1982. – 168 с.

Статья поступила в редакцию 4 октября 2011 г.

GRAPHIC-ANALYTICAL METHOD OF DECOMPOSING THE TEMPERATURE FIELD OF SOIL WITH MAIN PIPELINE TO NATURAL AND DEFORMATION COMPONENTS

V.K. Tyan¹, T.N. Drynkina²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² ОАО «Giprovostokneft»
18, Krasnoarmeyskaya st., Samara, 443041

The article presents graphic-analytical method of decomposing soil temperature field obtained as the experimental curves for the individual components caused by various factors. The method may be useful for matters of system analysis of complex processes additive components.

Keywords: *method of decomposing, temperature field, main pipeline.*

*Vladimir N. Tyan (Dr. Sci. (Techn.)), Head of Dept.
Tatyana N. Drynkina, Engineer.*