Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

УДК 622.692.4

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ СООРУЖЕНИЯ УЧАСТКА ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВЫБОРЕ ТРАССЫ

METHODS OF ESTIMATION OF THE PIPELINE CONSTRUCTION COST WHEN CHOOSING ITS ROUTE

К. С. Воронин, П. В. Григорьева, Д. А. Черенцов

K. S. Voronin, P. V. Grigorieva, D. A. Cherentsov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: трасса трубопровода; стоимость сооружения трубопровода; проектирование трубопровода

Key words: pipeline route; pipeline construction cost; pipeline design

При проектировании трубопроводов инженеры сталкиваются с задачей поиска оптимальной трассы, обеспечивающей минимальные затраты на их сооружение и дальнейшую эксплуатацию [1–4]. Эта задача является очень трудоемкой, так как требует рассмотрения множества возможных вариантов прохождения трассы и учета большого количества факторов, влияющих на стоимость сооружения и эксплуатации трубопровода [5]. В настоящее время выбор трассы чаще всего основывается на экспертном мнении проектировщика.

В работе [6] предложен алгоритм поиска оптимальной трассы трубопровода с учетом топографических особенностей местности. Данный алгоритм позволяет значительно сократить временные затраты при проектировании за счет автоматизации процесса поиска оптимальной трассы, а также снизить влияние человеческого фактора. Для эффективной работы данного алгоритма требуется наиболее точно оценивать стоимость или вес рассматриваемого варианта трассы трубопровода.

Вес линии участка трубопровода можно определить как сумму весов всех бесконечно малых отрезков, из которых состоит этот участок [7]. Для этого следует проинтегрировать удельный вес каждой точки на карте по длине данной линии

$$C = \int_0^L w dL, \quad (1)$$

где C — общий вес рассматриваемой линии; L — длина рассматриваемой линии; w — удельный вес точки на карте весов; dL — длина элементарного отрезка.

Так как в результате работы алгоритма поиска пути мы получаем ломаную линию, состоящую из прямолинейных отрезков, то общий вес этой линии можно определить как сумму весов данных отрезков [8]

$$C_i = \int_{L_{i-1}}^{L_i} w dL, \quad (2)$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n \int_{L_{i-1}}^{L_i} w dL, \quad (3)$$

где C_i — вес i -го отрезка; L_i — длина i первых отрезков; n — количество отрезков.

Для определения стоимости трассы проектируемого участка трубопровода надо составить карту весов, на которой указывается удельная стоимость (удельный вес) прохождения трассы по тому или иному участку местности [9]. Карта весов может быть представлена в векторном или растровом вариантах. Каждый из приведенных вариантов обладает своими особенностями при расчете.

Карта весов, представленная в векторном виде (рис. 1), делится на несколько замкнутых областей, для каждой из которых указывается удельная стоимость прокладки трубопровода (удельный вес).

Рис. 1. Векторная карта весов

Рис. 2. Растровая карта весов с ячейками

В данном случае вес участка трубопровода определим суммированием произведений удельных весов областей карты на длины отрезков, находящихся в этих областях,

$$C = \sum_{i=1}^n w_i L_i = \sum_{i=1}^n w_i \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}, \quad (4)$$

где w_i — удельный вес области, в которой находится i -й отрезок; L_i — длина i -го отрезка; x_i, y_i — координаты i -й точки.

Растровая карта весов (рис. 2) представляет собой таблицу, для каждой ячейки которой указывается значение удельной стоимости прокладки трубопровода (удельного веса).

Вес участка трубопровода, как и в предыдущем случае, можно определить по формуле (4), просуммировав произведения удельных весов ячеек карты на длины отрезков, расположенных внутри этих ячеек. Однако, по сравнению с расчетом векторной карты весов, данный вариант требует значительно меньше вычислительной мощности для определения координат точек пересечения линии с границами ячеек карты.

Чтобы на границах ячеек карты весов не было резких скачков величины удельного веса, можно указывать его не для всей ячейки, а только для узлов, то есть точек пересечения линий сетки (рис. 3 а). В этом случае удельный вес любой промежуточной точки можно найти с помощью билинейной интерполяции (рис. 3 б).

Рис. 3. Растровая карта весов с узлами:

а) общий вид карты; б) нахождение удельного веса в промежуточной точке

Рассмотрим одну ячейку сетки. Удельный вес w в точке с координатами (x, y) можно определить, зная веса узловых точек w_1, w_2, w_3, w_4 и их координаты

$$w = w_5 + (w_6 - w_5) \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}, \quad (5)$$

$$w_5 = w_1 + (w_2 - w_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (6)$$

$$w_6 = w_3 + (w_4 - w_3) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}, \quad (7)$$

где $w_1, \dots, w_6$ — удельный вес в точках 1–6; x_1, x_2, y_1, y_2 — координаты границ ячейки.

Подставив (6), (7) в (5), получим выражение для нахождения удельного веса в произвольной точке внутри рассматриваемой ячейки:

$$w = w_1 + (w_2 - w_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + \left(w_3 - w_1 + (w_4 - w_3 - w_2 + w_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}. \quad (8)$$

Подставим полученное выражение для удельного веса (8) в исходное уравнение для определения веса отрезка (2) и преобразуем:

$$\begin{aligned} C &= \int \left(w_1 + (w_2 - w_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + \left(w_3 - w_1 + (w_4 - w_3 - w_2 + w_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \right) dL \\ C &= w_1 \int dL + \frac{w_2 - w_1}{x_2 - x_1} \int (x - x_1) dL + \frac{w_3 - w_1}{y_2 - y_1} \int (y - y_1) dL + \\ &\quad + \frac{w_4 - w_3 - w_2 + w_1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int (x - x_1)(y - y_1) dL \end{aligned} \quad (9)$$

Разложим элементарный отрезок dL на горизонтальную dx и вертикальную dy составляющие (рис. 4).

Рис. 4. Элементарный отрезок

Выразим длину элементарного отрезка через его проекции на горизонтальную и вертикальную оси

$$\begin{aligned} dL &= \frac{dx}{\cos \alpha} = \frac{dy}{\sin \alpha} \\ \cos \alpha &= \frac{(x_i - x_{i-1})}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}; \quad \sin \alpha = \frac{(y_i - y_{i-1})}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}} \\ dL &= \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{(x_i - x_{i-1})} dx = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{(y_i - y_{i-1})} dy. \end{aligned} \quad (10)$$

Запишем уравнение прямой в общем виде и подставим в него координаты начала и конца отрезка

$$\begin{aligned}
& y = ax + b \\
& \begin{cases} y_{i-1} = ax_{i-1} + b \\ y_i = ax_i + b \end{cases} \\
& a = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}; \quad b = y_i - \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} x_i \\
& \begin{cases} y = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} x + y_i - \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} x_i, & \text{если } x_{i-1} \neq x_i \\ x = x_i, & \text{если } x_{i-1} = x_i. \end{cases} \quad (11)
\end{aligned}$$

Подставляя выражения (10), (11) в (9), можно получить формулу для определения веса отрезка, находящегося внутри одной ячейки карты. Если отрезок не вертикальный, то есть $x_{i-1} \neq x_i$, то

$$\begin{aligned}
C &= \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{(x_i - x_{i-1})} \left(w_1 \int dx + \frac{w_2 - w_1}{x_2 - x_1} \int (x - x_1) dx + \frac{w_3 - w_1}{y_2 - y_1} \int (ax + b - y_1) dx \right. \\
&\quad \left. + \frac{w_4 - w_3 - w_2 + w_1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int (x - x_1)(ax + b - y_1) dx \right) \\
C_i &= \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{(x_i - x_{i-1})} \left(w_1 \int_{x_{i-1}}^{x_i} dx + \frac{w_2 - w_1}{x_2 - x_1} \int_{x_{i-1}}^{x_i} (x - x_1) dx + \frac{w_3 - w_1}{y_2 - y_1} \int_{x_{i-1}}^{x_i} (ax + b - y_1) dx \right. \\
&\quad \left. + \frac{w_4 - w_3 - w_2 + w_1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{x_{i-1}}^{x_i} (ax^2 + (b - y_1 - ax_1)x + (y_1 - b)x_1) dx \right). \quad (12)
\end{aligned}$$

После интегрирования получим

$$\begin{aligned}
C_i &= \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \left(w_1 + \frac{w_2 - w_1}{x_2 - x_1} \left(\frac{x_i + x_{i-1}}{2} - x_1 \right) + \frac{w_3 - w_1}{y_2 - y_1} \left(\frac{a(x_i + x_{i-1})}{2} - (b - y_1) \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{w_4 - w_3 - w_2 + w_1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \left(\frac{a(x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2)}{3} + \frac{(b - y_1 - ax_1)(x_i + x_{i-1})}{2} + (y_1 - b)x_1 \right) \right). \quad (13)
\end{aligned}$$

Если рассматриваемый отрезок вертикальный, то есть $x_{i-1} = x_i$, то

$$\begin{aligned}
C &= \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{(y_i - y_{i-1})} \int \left(w_1 + (w_2 - w_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} + \left(w_3 - w_1 + (w_4 - w_3 - w_2 + w_1) \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \right) dy \\
C_i &= \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{(y_i - y_{i-1})} \left(\left(w_1 + (w_2 - w_1) \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} \right) \int_{y_{i-1}}^{y_i} dy + \frac{\left(w_3 - w_1 + (w_4 - w_3 - w_2 + w_1) \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} \right)}{y_2 - y_1} \int_{y_{i-1}}^{y_i} (y - y_1) dy \right). \quad (14)
\end{aligned}$$

После интегрирования получим

$$C_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \left(w_1 + (w_2 - w_1) \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} + \frac{\left(w_3 - w_1 + (w_4 - w_3 - w_2 + w_1) \frac{x_i - x_1}{x_2 - x_1} \right)}{y_2 - y_1} \left(\frac{y_i + y_{i-1}}{2} - y_1 \right) \right). \quad (15)$$

Формулы (13), (15) позволяют рассчитать вес участка трубопровода при использовании варианта карты весов с плавными переходами между узлами. Однако этот вариант требует больше вычислительной мощности, чем вариант с указанием веса ячеек карты.

Таким образом, использование векторной карты весов позволяет наиболее точно оценить стоимость трассы участка трубопровода, но из-за сложности определе-

ния координат пересечения отрезков трассы с границами областей карты требует больше вычислительных ресурсов и времени на проведение расчетов. Причем затрачиваемое время напрямую зависит от площади рассматриваемого участка карты (от количества и сложности выделенных областей).

Применение растровых вариантов карты весов позволяет значительно сократить время, затрачиваемое на расчеты, но дает менее точный результат в связи с погрешностью определения границ областей карты с различным удельным весом. При увеличении разрешения карты погрешность снижается, однако повышаются затраты памяти и время вычисления стоимости трассы трубопровода.

Библиографический список

1. Выбор трасс магистральных трубопроводов / Л. А. Бабин [и др.]. – М.: Недра, 1970. – 128 с.
2. Бородавкин П. П., Березин В. Л., Рудерман С. Ю. Выбор оптимальных трасс магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1974. – 240 с.
3. Дубровин Д. Д., Земенкова М. Ю. Анализ проблем обеспечения минимальных расстояний от объектов магистральных газопроводов // Нефтегазовый терминал: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. магистрантов им. профессора Н. А. Малюшина. – Тюмень, 2017. – С. 72–77.
4. Мутавалиев Ш. Т., Земенков Ю. Д., Земенкова М. Ю. Строительство, проектирование трубопроводов в горной местности и их задачи оптимизации // Нефтегазовый терминал: сб. науч. ст. междунар. науч.-техн. конф. / Под общ. ред. С. Ю. Подорожникова. – 2015. – С. 132–135.
5. Бородавкин П. П., Березин В. Л. Сооружение магистральных трубопроводов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 471 с.
6. Григорьева П. В., Воронин К. С., Черенцов Д. А. Выбор трассы трубопровода с учетом особенностей рельефа местности // Нефтегазовый терминал: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. магистрантов им. профессора Н. А. Малюшина. – Тюмень, 2017. – С. 56–60.
7. Zemenkova M. Yu., Zemenkov Yu. D., Shipovalov A. N. Mathematic modeling of complex hydraulic machinery systems when evaluating reliability using graph theory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – P. 012–056.
8. Белоусов А. И., Ткачев С. Б. Дискретная математика: учеб. для вузов / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 4-е изд., исправл. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2006. – 744 с. – (Математика в техническом университете; Вып. XIX).
9. Повышение надежности и эффективности технологического режима сети нефтесбора / А. Н. Смирнов [и др.] // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2011. – № 1 (23). – С. 27–29.

Сведения об авторах

Воронин Константин Сергеевич, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

Григорьева Полина Вадимовна, магистрант, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: polino4ka.g@yandex.ru

Черенцов Дмитрий Андреевич, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: cherentsovda@bk.ru

Information about the authors

Voronin K. S., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: voronin_tsogu@mail.ru

Grigorieva P. V., Master's Student, Industrial University of Tyumen, e-mail: polino4ka.g@yandex.ru

Cherentsov D. A., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: cherentsovda@bk.ru

УДК 624.131;621.644

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ГРУНТОВОЙ ПОДУШКИ

PROCEDURE OF PROVIDING ENGINEERING PROTECTION FROM FROST HEAVING OF UNDERGROUND TRUNK PIPELINES BY THE SOIL BED

Е. В. Марков

E. V. Markov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: магистральный трубопровод; морозное пучение; инженерная защита; грунтовая подушка

Key words: trunk pipeline; frost heaving; engineering protection; soil bed