

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

DOI: 10.18137/RNUV9187.25.04.P.4

УДК 004.42

Богачев Александр Сергеевич

аспирант кафедры информационных систем, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, город Краснодар, ORCID: 0009-0002-8085-9992, SPIN-код: 6152-6652, Author ID: 1143479

Электронный адрес: SashaJCV@yandex.ru

Alexander S. Bogachev

Postgraduate at the Department of information systems, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar. ORCID: 0009-0002-8085-9992, SPIN-code: 6152-6652, Author ID: 1143479

Email address: SashaJCV@yandex.ru

Попова Елена Витальевна

доктор экономических наук, кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, город Краснодар. ORCID: 0000-0001-8533-6897, SPIN-код: 1067-5338, Author ID: 17585

Электронный адрес: elena-popov@yandex.ru

Elena V. Popova

Doctor of Economic Sciences, Ph.D. of Physico-Mathematical Sciences, Full Professor, Head of the Department of information systems, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar. ORCID: 0000-0001-8533-6897, SPIN-code: 1067-5338, Author ID: 17585

Email address: elena-popov@yandex.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАССИРОВКИ ПЛОЩАДОЧНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье рассматривается проблема автоматизации трассировки трубопроводных систем, анализируются существующие системы автоматизированного проектирования. Авторами предлагается математическая модель на основе клеточного графа для оптимизации трассировки. Разработанный модуль для NanoCAD и Model Studio CS позволяет автоматически находить кратчайшие маршруты с учетом препятствий, сокращая время и затраты на проектирование.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, трассировка трубопроводов, математическое моделирование, клеточный граф, алгоритм Дейкстры, системы автоматизированного проектирования, оптимизация маршрута, промышленные трубопроводы, Model Studio CS, NanoCAD.

Для цитирования: Богачёв А.С., Попова Е.В. Автоматизация трассировки площадочных трубопроводов за счет применения методов математического моделирования // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 4. С. 4 – 10. DOI: 10.18137/RNUV9187.25.04.P.4

Автоматизация трассировки площадочных трубопроводов за счет применения методов математического моделирования

AUTOMATION OF SITE PIPELINE TRACING USING MATHEMATICAL MODELING METHODS

Abstract. The article discusses the issue of automating the process of tracing pipelines in CAD systems. The authors analyze the existing systems and propose a mathematical model based on a cellular graph to optimize the tracing process. The developed modules for NanoCAD and Model Studio CS Pipelines allow for the automatic finding of the shortest routes while taking into account obstacles. This reduces time and design costs, making the process more efficient.

Keywords: computer-aided design systems, pipeline tracing, mathematical modeling, cellular graph, Dijkstra algorithm, route optimization, industrial pipelines, Model Studio CS, NanoCAD.

For citation: Bogachev A.S., Popova E.V. (2025) Automation of site pipeline tracing using mathematical modeling methods. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management.* No. 4. Pp. 4– 10. DOI: 10.18137/RNUV9187.25.04.P.5 (In Russian).

Введение

Трубопроводные системы являются неотъемлемой частью любого промышленного объекта. На трассировку трубопроводов уходит порядка 25 % производственных затрат при проектировании нефтеперерабатывающих заводов. Тем не менее прокладка труб в основном выполняется вручную с использованием схем и 2D/3D-чертежей в системах автоматизированного проектирования (САПР).

Поскольку автоматизация процесса проектирования трубопроводов может значительно сократить время производства и стоимость любого проекта, предлагается разработать систему автоматизированной трассировки трубопроводов.

Целью данной работы является исследование возможности применения методов математического моделирования для автоматизации процесса трассировки площадочных трубопроводов.

Для достижения цели необходимо выполнить ряд задач:

- 1) провести анализ существующих решений в сфере автоматизированной трассировки трубопроводов;
- 2) создать математическую модель процесса трассировки трубопроводов;
- 3) реализовать полученную оптимизационную модель в виде системы автоматизированной трассировки трубопроводов;
- 4) рассчитать экономический эффект от внедрения разработанной системы.

Система автоматизированной трассировки трубопроводов позволит инженерам-проектировщикам создавать более точные модели трубопроводов, экономить время за счет быстрого создания проекта трубопровода, снизить риск коллизий. Для главных инженеров проектов система будет предоставлять важную информацию для поддержки принятия решений на протяжении всего жизненного цикла трубопровода.

Анализ существующих решений

Некоторые САПР предлагают собственные решения в области автоматизированной трассировки трубопроводов. В результате поиска подходящих САПР было выделено три

варианта: Renga BIM¹, Bentley Plant Wise² и Model Studio CS Трубопроводы³. В Таблице приведено сравнение данных САПР.

Таблица

Сравнительная характеристика САПР

Характеристики	Renga BIM	Bentley PlantWise	Model Studio CS Трубопроводы
Отечественная разработка	✓	✗	✓
Автоматизированная трассировка	✓	✓	✓
Поиск оптимального маршрута	✗	✓	✗
Проверка коллизий	✗	✓	✗
Возможность задавать параметры трассировки	✓	✓	✗

Источник: таблица составлена авторами.

Анализ отечественных САПР показал, что функции автоматизированной трассировки в них недостаточно развиты и не способны самостоятельно принимать решения или предлагать оптимальные варианты трассировки. Поэтому было принято решение о разработке нового инструмента для автоматизированной трассировки трубопроводов.

Математическое моделирование

Задача автоматизированной трассировки трубопроводов сводится к автоматизированному поиску кратчайшего пути для соединения нескольких точек в ограниченном пространстве таким образом, чтобы были достигнуты заранее определенные требования [1].

Математически данную задачу можно описать следующим образом.

Пусть заданы:

1. Метрика $d: \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^+$, определяющая расстояние между точками в трёхмерном пространстве (например, евклидова или манхэттенская).
2. Свободное пространство F – замкнутое, ограниченное и связное подмножество \mathbb{R}^3 , в котором разрешена прокладка труб.
3. Ограниченнное пространство S – минимальный параллелепипед, содержащий F .
4. Множество препятствий $O = \{o_1, \dots, o_m\}$, где каждое $o_i \subseteq S$ – замкнутое и связное множество, причём препятствия не пересекаются и заполняют всё пространство вне F , то есть

$$S \setminus F = \bigcup_{i=1}^m o_i.$$

5. Множество труб $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, где каждая труба $p_i = (C_i, d_i)$ задаётся:

- $C_i \subset \mathbb{R}^3$ – набором точек подключения (старт, конец, ветвления);

¹ Как заставить трассу плясать под вашу дудку // О Renga от R&D: Блог компании Renga. URL: https://blog.rengabim.com/2021/02/blog-post_26.html?ysclid=llw1nbx8be234040958 (дата обращения: 01.08.2025).

² Bentley PlantWise V8I // Группа компаний CSoft. URL: <https://www.csoft.ru/soft/bentley-plantwise/bentley-plantwise-8.html?ysclid=llw2e1epf1733037662> (дата обращения: 01.08.2025).

³ Model Studio CS Трубопроводы // Model Studio CS. URL: <https://modelstudiocs.ru/programs/modelstudiocs-piping.html> (дата обращения: 01.08.2025).

Автоматизация трассировки площадочных трубопроводов за счет применения
методов математического моделирования

- $Di \in \mathbb{R}^+$ – диаметром трубы.

Требуется для каждой трубы ri найти связный маршрут $ri \subseteq F$, удовлетворяющий условиям:

- соединение точек:

$$Ci \subseteq ri,$$

то есть все точки подключения должны лежать на маршруте;

- избегание препятствий:

$$md[a, ri] \geq \frac{d_i}{2} \quad \forall a \notin F,$$

где $md[a, ri] = \min_{b \in ri} d(a, b)$ – минимальное расстояние от точки a до маршрута. Это гарантирует, что труба не пересекает препятствия с учётом своего диаметра;

- непересечение труб. Для любых двух труб r_i и r_j должно выполняться:

$$md[a, ri] \geq \frac{d_i + d_j}{2} \quad \forall a \notin r_j,$$

что исключает столкновения труб между собой.

Особенности задачи автоматизированной трассировки трубопроводов:

1) учёт диаметров труб превращает её в комбинацию прокладки путей и упаковки, так как трубы занимают объём в пространстве;

2) задача является NP-трудной из-за экспоненциального роста числа вариантов при увеличении количества труб и препятствий.

Для решения данной задачи авторами использовался подход, описанный ранее в [2]. Согласно данному подходу математическое моделирование трассировки трубопроводов состоит из двух частей: создание оптимизационной модели и реализация алгоритма решения. Оптимизационная модель отвечает за то, каким образом моделируется пространство, маршрут, цели и ограничения маршрутизации; алгоритм решения задачи автоматизированной трассировки – за процесс поиска оптимального пути в пространстве оптимизационной модели.

В результате анализа научных и практических исследований в области автоматизированного проектирования трубопроводов принято решение в данной работе моделировать пространство в виде трехмерного клеточного графа.

Для таких графов пространство маршрутизации делится на множество однородных ячеек. Каждая ячейка может быть представлена как вершина графа, соединенная ребрами со всеми прилегающими ячейками. Маршрут трубопровода в данном случае может быть задан последовательностью вершин созданного графа. При этом размер ячейки выбирается равным диаметру трассируемого трубопровода. Пример построения клеточного графа представлен на Рисунке 1.

Граф пространства маршрутизации состоит из массива вершин V (точек в трехмерном пространстве модели) и ребер E , соединяющих соседние вершины. Набор вершин V в данном случае можно определить как

$$V = \{p \in \mathbb{Z}^3 \mid p \in F \wedge p \notin O\}.$$

Набор ребер E определяется как

$$E = \{\{u, v\} \mid u, v \in V \wedge \forall i \in \{x, y, z\}, d(u_i, v_i) \leq 1\}.$$

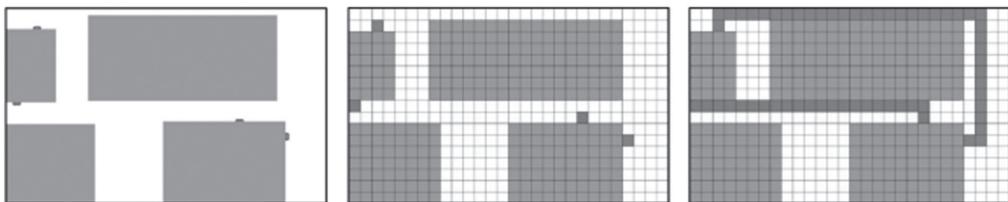


Рисунок 1. Пример построения клеточного графа
Источник: [3].

Основным преимуществом данного способа моделирования пространства является простота создания и обработки графа, а также ограничение изгибов до 90 градусов.

Поиск кратчайшего пути осуществляется следующим образом:

- 1) оптимальный маршрут формируется с помощью алгоритма Дейкстры [4].
- 2) алгоритм Йена [5] принимает оптимальный маршрут и формирует на его базе k альтернативных маршрутов.

Также в целях оптимизации при поиске кратчайшего пути используется метод поиска точек перехода⁴. Суть данного метода заключается в предоставлении алгоритму возможности поиска кратчайшего пути, выбора в качестве следующей точки не только прилегающих вершин, но и вершин, находящихся на определенном удалении от текущей точки, при условии, что они расположены на одной из трех координатных осей, выходящих из текущей точки, то есть могут быть соединены с текущей точкой при помощи прямой линии.

Техническое решение

В результате исследования был разработан модуль для NanoCAD и Model Studio CS Трубопроводы. Для разработки модуля была использована платформа .NETFramework 4.8.1 и язык программирования C#. Интерфейс разработанного модуля представлен на Рисунке 2.

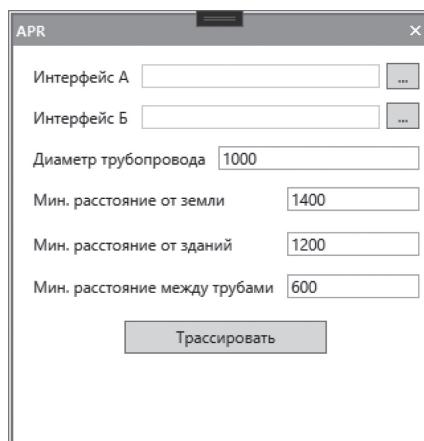


Рисунок 2. Интерфейс разработанного модуля
Источник: здесь и далее рисунки выполнены авторами.

⁴ Shortest Path. Jump Point Search // Блог Harablog. 2011. September 7. URL: <https://harablog.wordpress.com/2011/09/07/jump-point-search/> (дата обращения: 01.08.2025).

Автоматизация трассировки площадочных трубопроводов за счет применения
методов математического моделирования

Разработанный модуль автоматизированной трассировки трубопровода позволяет пользователю выбрать 2 точки в модели, которые необходимо соединить, и выбрать некоторые параметры трассировки. После нажатия на кнопку «Трассировать» модуль предлагает на выбор пять вариантов прокладки трубы, которые можно поочередно просмотреть в модели. После выбора наиболее понравившегося варианта модуль создает в модели полилинию, соединяющую выбранные точки. Пример представлен на Рисунке 3.

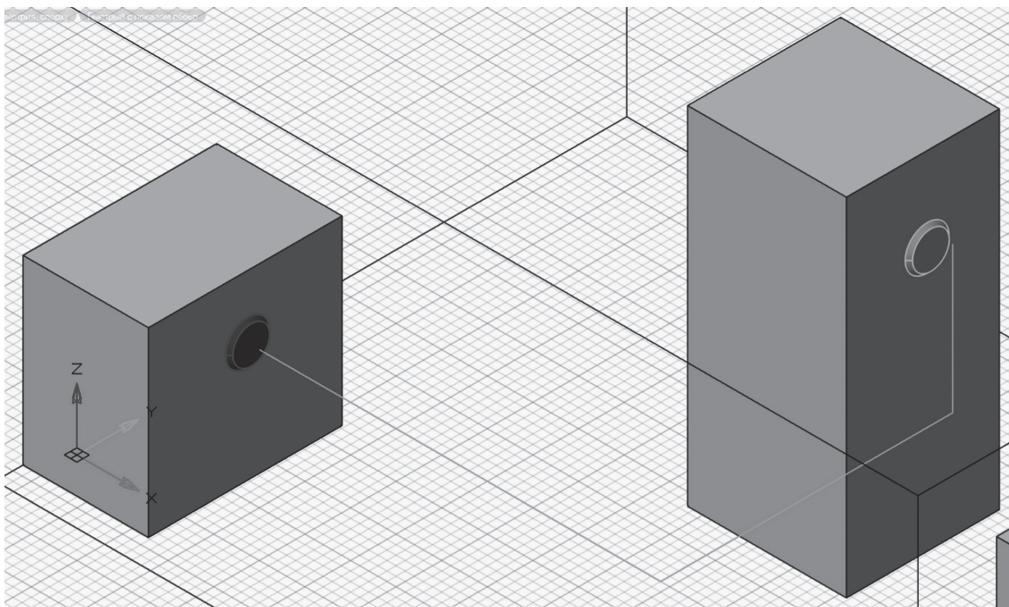


Рисунок 3. Пример полилиний, построенной в результате работы модуля

На данный момент в системе Model Studio CS Трубопроводы отсутствует возможность программного создания трубопроводов. Однако инструмент «Труба из полилинии» позволяет выбрать созданную полилинию и преобразовать ее в трубопровод, используя выбранный мини-каталог с деталями трубопроводов.

Заключение

В статье рассмотрена проблема автоматизации проектирования трубопроводов, которое сегодня остается преимущественно ручным процессом. Анализ существующих САПР показал недостаточный уровень автоматизации в отечественных решениях.

Предложена математическая модель на основе клеточного графа и алгоритмов Дейкстры и Йена, учитывающая геометрические ограничения и диаметры труб. Разработанный модуль для NanoCAD и Model Studio CS позволяет автоматически находить оптимальные маршруты трассировки.

Внедрение системы сократит время проектирования и снизит ошибки. Дальнейшее развитие может включать интеграцию с BIM-платформами и оптимизацию для крупных проектов. Применение математического моделирования открывает новые перспективы для автоматизации проектирования трубопроводов.

Литература

1. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Прялов С.Н. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / Под ред. В.Е. Селезнева. М. : МАКС Пресс, 2007. 692 с. ISBN 978-5-317-02011-8.
2. Богачев А.С., Попова Е.В. Концептуальная модель автоматизированного проектирования трубопроводов // Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты : Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции, Краснодар, 15–19 января 2024 г. Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2024. С. 8–10. EDN MJLTAL.
3. Blokland M., van der Mei R., Pruyne J.F.J., Berkhout J. Literature Survey on Automatic Pipe Routing // Operations Research Forum. 2023. Vol. 4. Article no. 35. DOI: 10.1007/s43069-023-00208-5
4. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1. No. 1. P. 269–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
5. Yen J.Y. An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks // Quarterly of Applied Mathematics. 2016. Vol. 27. No. 4. Pp. 526–530. DOI: 10.1090/qam/253822

References

1. Seleznev V.E., Alechin V.V., Pryalov S.N. (2007) *Matematicheskoe modelirovaniye truboprovodnykh setei i system kanalov: metody, modeli i algoritmy* [Mathematical modelling of pipeline networks and channel systems: Methods, models and algorithms]. Moscow : MAKS Press. 692 p. ISBN 978-5-317-02011-8. (In Russian).
2. Bogachev A.S., Popova E.V. (2024) Conceptual model of automated pipeline design. In: *Tsifrovizatsiya ekonomiki: napravleniya, metody, instrumenty: Sbornik materialov VI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Digitalization of the Economy: Directions, Methods, Tools] : Proceedings of the 6th All-Russian Sci. and Pract. Conf. Krasnodar, January 15–19, 2024. Krasnodar : Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin. Pp. 8–10. (In Russian).
3. Blokland M., van der Mei R., Pruyne J.F.J., Berkhout J. (2023). Literature Survey on Automatic Pipe Routing. *Operations Research Forum*. Vol. 4. Article no. 35. DOI: 10.1007/s43069-023-00208-5
4. Dijkstra E.W. (1959) A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*. Vol. 1. No. 1. Pp. 269–271. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
5. Yen J.Y. (2016) An algorithm for finding shortest routes from all source nodes to a given destination in general networks. *Quarterly of Applied Mathematics*. Vol. 27. No. 4. Pp. 526–530. DOI: 10.1090/qam/253822

Поступила в редакцию: 01.11.2025

Received: 01.11.2025

Поступила после рецензирования: 01.12.2025

Revised: 01.12.2025

Принята к публикации: 15.12.2025

Accepted: 15.12.2025