

УДК 621.6

## ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ СЛОЖНОГО ГАЗОПРОВОДА

*Ходжаев Ш.Т.<sup>1</sup>, + Ганиева Н.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Самаркандский филиал Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Самарканд, Узбекистан

+ Nily-85@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается разработка алгоритма и программного обеспечения для расчёта коэффициента гидравлического сопротивления сложных газопроводных систем. Описаны методология выбора исходных данных, математическая постановка задачи и принципы численного моделирования. Основное внимание уделено учёту эксплуатационных факторов, таких как изменяющаяся геометрия трубопровода, местные сопротивления и температурно-давленческие градиенты. Проведена экспериментальная апробация алгоритма на реальных данных, подтверждающая его точность и применимость для проектирования и эксплуатации газораспределительных сетей. Ожидается, что предложенный подход повысит надёжность гидравлических расчётов и обеспечит более эффективное управление транспортом газа.

**Ключевые слова:** гидравлическое сопротивление, газопровод, численное моделирование, транспорт газа, коэффициент сопротивления, стохастическая аппроксимация, проектирование.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Гидравлическое сопротивление играет ключевую роль в проектировании и эксплуатации газопроводных систем, определяя энергетические затраты на транспорт газа и эффективность всей системы. Расчет коэффициента гидравлического сопротивления для сложных газопроводов требует учета множества факторов, включая геометрию трубопровода, характеристики рабочей среды, параметры потока, а также влияние местных сопротивлений, таких как повороты, сужения, расширения и другие элементы конструкции.

Сложные газопроводы, используемые для транспортировки газа на большие расстояния, имеют множество особенностей, которые усложняют точное моделирование гидравлических процессов. К числу таких особенностей относятся: изменяющиеся диаметры труб, наличие технологических узлов и оборудования, влияние температурных и давленческих градиентов [1, 2].

Кроме того, важным аспектом является учет переходных режимов течения, которые могут возникать в зависимости от эксплуатационных условий. Разработка алгоритма и программы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления представляет собой актуальную задачу, направленную на повышение точности инженерных расчетов и оптимизацию процессов проектирования.

В работе [12] представлен обзор наиболее актуальных исследовательских работ, проводимых для решения проблем транспортировки природного газа по трубопроводным системам. Раскрыты три основные группы систем газопроводов, а именно: системы сбора, передачи и распределения.

Задачи оптимизации газопроводных систем с использованием метода динамического программирования рассматривается в работе [13]. Разработанная математическая модель газопроводной системы характеризуется нелинейностями и многочисленными ограничениями. Метод динамического программирования обеспечивает эффективный метод оптимизации рассматриваемой в работе системы.

Научные положения по разработке теоретических основ расчета оптимальных эксплуатационных параметров распределительных систем газоснабжения потребителей на базе природного газа излагаются в работе [9]. Приводятся рекомендации по определению оптимальных потерь давления газа по участкам газовой сети, обеспечивающие экономии материальных и денежных ресурсов.

Анализ современных исследований показал, что точное гидравлическое моделирование процессов в сложных газопроводах требует учета факторов, включая изменяющиеся диаметры труб, наличие технологических узлов и влияние переходных режимов изменений. Разработка алгоритмов и программных решений для расчета коэффициента гидравлического сопротивления является актуальным фактором, способствующим повышению точности инженерных расчетов и оптимизации планирования газопроводных систем.

В данной работе рассматривается подход к формированию такого алгоритма, базирующийся на использовании современных методов численного моделирования, аналитических решений и экспериментальных данных. Основной акцент сделан на обеспечение универсальности подхода и возможности его адаптации к различным условиям эксплуатации.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Перепад давления потока газа в газопроводах зачастую обусловлен как различными неконтролируемыми случайными возмущениями (утечка газа, несанкционированный отбор), так и не учетом коэффициента гидравлического сопротивления. Уменьшение давления газа можно наблюдать в движущемся потоке не только на сравнительно длинных участках, но и на коротких [3-6]. В одних случаях перепад давления распределяется иногда равномерно по длине трубопровода (линейные потери), в других – этот перепад давления может быть сосредоточен на очень коротких участках, длиной которых можно пренебречь.

Важно заметить, что перепад давления как по длине участка газопровода, и в местных гидравлических сопротивлениях существенным образом зависят от так называемого режима движения газа. При расчете коэффициента гидравлического сопротивления для участков сложного газопровода, в котором расход газа по каждой нитке неизвестен, имеют место предпосылки аварийных ситуаций. В этом случае нельзя определить фактический коэффициент гидравлического сопротивления для каждой нитки. Однако для локализации аварийных участков достаточно определить относительный коэффициент гидравлического сопротивления для каждой нитки - отношение коэффициента гидравлического сопротивления  $k$ -го элементарного участка к коэффициенту гидравлического сопротивления  $m$ -го участка, который выбран за эталонный.

В качестве эталонного участка выбирается участок, где авария наименее вероятна, например участок, прилегающий непосредственно к компрессорной станции, где высокая температура газа практически исключает возможность выпадения гидратов и конденсата [4,7].

В основе, математическая постановка рассматриваемой задачи базируется на алгоритме [5,7], с некоторой интерпретацией, обусловленной учетом числа Рейнольдса. По имеющейся математической модели магистрального газопровода [1], данными технико-технологическими показателями параметров общего расхода газа по магистральному газопроводу и давлением в точках замера определить значение относительного коэффициента гидравлического сопротивления.

Из конечно-разностной аппроксимации исходной системы дифференциальных уравнений с использованием метода стохастической аппроксимации алгоритм расчета определения коэффициента  $\lambda$ , где  $\theta = 1/\sqrt{\lambda}$  в момент  $s$ , для  $l$ -й нитки газопровода имеем:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial p^2}{\partial x} &= c^2 \frac{\lambda}{D} Q |Q|; \\ -\frac{\partial p}{\partial t} &= c^2 \frac{\partial Q}{\partial x}; \\ -\frac{\partial p}{\partial \rho} &= c^2 = z g R T; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \theta_{k,s}^t &= \theta_{k,s-1}^t + \gamma_s \left\{ \beta_m S_m Q_{0,s-1}^l - \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{n=1}^{N_i} Q_{in}^l - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_k} Q_{kn}^l + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} x_i (p_{i,s-1} - p_{i,s} - p_{i-1,s-1} - p_{i-1,s}) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{4} x_k (p_{k,s-1} - p_{k,s} + p_{k-1,s-1} - p_{k-1,s}) - \theta_{k,s-1} \beta_k S_k Q_m \right\}; \\ Q_m &= Q_{0,s-1}^t \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{n=1}^{N_i} Q_{in}^l - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N_m} Q_{mn}^l + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m-1} x_i (p_{i,s-1} - p_{i,s} + p_{i-1,s-1} - p_{i-1,s}) + \\ &\quad \frac{1}{4} x_m (p_{m,s-1} - p_{m,s} + p_{m-1,s-1} - p_{m-1,s}); \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\eta = \frac{1}{\sum_{t=1}^s \beta_{t,k} Q_m S_{k,t-1}}$$

$$Q_{0,s-1}^l = \frac{Q_{общ} k_{pl}}{k_{p1} + k_{p2} + \dots + k_{pz}} \quad (3)$$

Здесь:  $Q_{общ}$  - количество газа, перекачиваемого по всей системе,  $k_p$  - коэффициент расхода по каждой нитке газопровода,  $L$ - число ниток  $k_{pl} = D_t^{2.6} / D_0^{2.6}$ ,  $D_0$  - диаметр газопровода, относительный расход которого равен единице, обычно принимается  $D_0 = 700$  мм,

Для реализации алгоритма принята следующая информация:  $H$  - число точек замера давления,  $M$  - число элементарных участков,  $L$  - интервал дискретизации по времени;  $D[1:M, 1:z]$  - число ниток газопровода,  $x[1:M, 1:z]$  - диаметр газопровода,  $l$  - длина элементарного участка,  $u[1:z]$ -число точек попутных отборов,  $e$  - допустимая абсолютная погрешность,  $p[0:M]$ ,  $Q[1:M]$ ,  $T[1:M]$ ,  $z[1:M]$  – соответственно давление, попутные отборы, абсолютные температуры и коэффициенты сжимаемости для каждого элементарного участка [6,8,9].

### 3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для идентификации и оценки экспериментальных расчетных показателей с реальными производственными данными был проведен их гидравлический анализ работы сети и гидравлический расчет режима движения газа в сложном газопроводе [6-11].

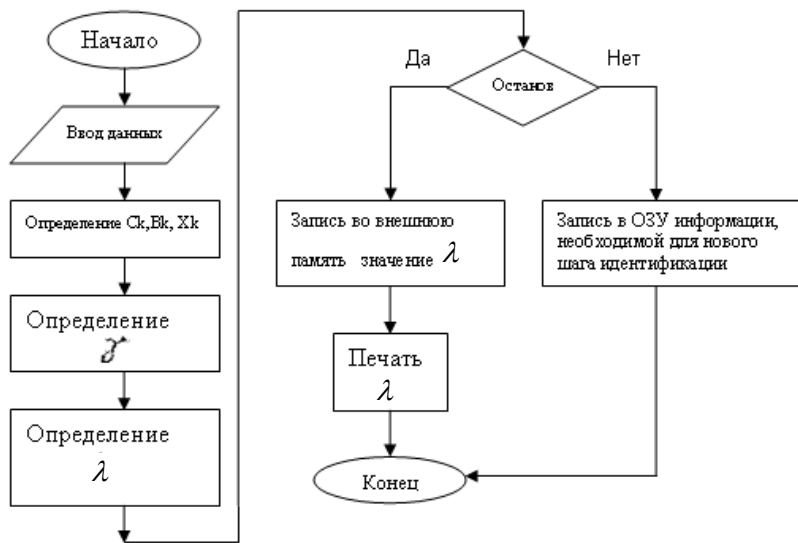


Рис. 1. Блок схема вычисления коэффициента гидравлического сопротивления

Размерности и диапазоны изменения входных и выходных констант программы приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики использованных данных

Константа	Диапазон изменения	Константа	Диапазон изменения
$H$	0-200	$E$	0.1-0.3
$M$	0-200	$\lambda_0$	0.3-0.5
$\Delta T, c$	0-7200	$p, кгс/см^2$	$20 \cdot 10^4 - 76 \cdot 10^4$
$Z$	2-5	$Q, кг/с$	50-150
$D, м$	0,7-1,4	$Ts, K$	220-350
$U$	0-200	$Ls$	0.8-1.0
$\Delta x, м$	10000-50000	$\lambda$	0.2-1.1

Экспериментальная апробация алгоритма была осуществлена на базе разработанной программы. Контрольный пример рассчитан на базе следующих исходных данных:

Число элементарных участков 9

Число временных слоев 15

Длина участка  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3, 15000 \text{ м}$

Диаметр газопровода  $D_1 = D_2 = 1.4 = D_3, \text{ м}$  Скорость звука  $c, \text{ м/с}$

Попутных отборов нет.

За эталонный участок выбран первый.

$E_0 = 0,8$  для всех элементарных участков  
величина интервала по времени  $t, 3600 \text{ с}$

Таблица 2. Результаты вычислений

t	$\lambda_1$	$\lambda_2$	t	$\lambda_1$	$\lambda_2$
1	10.170	10.02	6	1.015	1.013
2	1.023	1.020	7	1.017	1.017
3	0.984	0.990	8	1.015	1.016
4	1.011	1.023	9	1.010	-
5	1.013	1.016	10	1.009	-

В интерфейсе программы приведены результаты эксперимента, на которых показан режим движения газа составного газопровода, состоящего из 9 участков.

Участок	Диаметр D, см	Расход газа м³/ч	Вязкость газа м²
1	10	55	1,471E-5
2	7	95	1,471E-5
3	13	34	1,471E-5
4	17	85	1,471E-5
5	7	112	1,471E-5
6	2	45	1,471E-5
7	1	33	1,471E-5
8	4	130	1,471E-5
9	14	149	1,471E-5

Количество участков:

Турбулентный режим движения газа

Участок 6  
Число Рейнольдса  
54146  
Гидравлическое сопротивление  
9,3493912345366E-7  
Турбулентный режим движения газа

Участок 7  
Число Рейнольдса  
79415  
Гидравлическое сопротивление  
6,37453470009733E-7  
Турбулентный режим движения газа

Участок 8  
Число Рейнольдса  
78212  
Гидравлическое сопротивление  
6,4726555137895E-7  
Турбулентный режим движения газа

Участок 9  
Число Рейнольдса  
25612  
Гидравлическое сопротивление  
1,97654912881262E-6  
Турбулентный режим движения газа

Рис. 2. Окно результатов расчетов

Интерфейс программы отображает экспериментальные данные о движении газа в газопроводе. В ячейках программы приведены такие данные как диаметр трубы (D, см), расход газа ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ), вязкость газа ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Справа приведенные расчеты, как число Рейнольдса, характеризующий режим движения газа (ламинарный или турбулентный), гидравлическое сопротивление, определяющее потери давления в газопроводе, и режим движения, который в данном случае везде указан как турбулентный режим.

На основе вычислительного эксперимента построен график в зависимости от расхода газа от диаметра трубы. Синие точки — экспериментальные данные, красная точечная линия показывает движение.

График показывает, что расход газа не всегда линейно зависит от диаметра трубы, что может быть связано с особенностями потока, сопротивлением и турбулентностью. Например:

- При диаметре 7 см расход сильно различается ( $95 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $112 \text{ м}^3/\text{ч}$ );
- При диаметре 14 см максимальный расход газа ( $149 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Это может привести к сложности гидродинамических процессов, выявлению дополнительных параметров, таких как давление, шероховатость стенок трубы и особенности турбулентности.

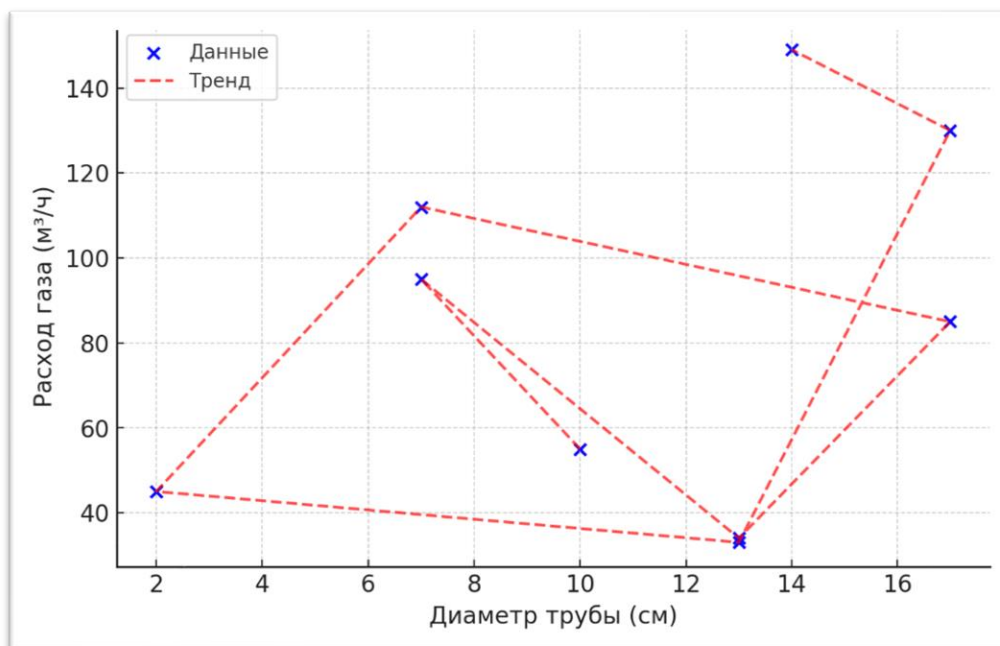


Рис. 3. График зависимости расхода газа от диаметра трубы

#### 4 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанный алгоритм и программа расчёта коэффициента гидравлического сопротивления для сложных газопроводов продемонстрировали свою эффективность в условиях реальных эксплуатационных данных. Проведённые вычислительные эксперименты показали, что использование метода стохастической аппроксимации в сочетании с аналитическими решениями позволяет повысить точность расчетов и минимизировать погрешности, связанные с неопределённостью параметров потока.

Результаты тестирования подтвердили, что предложенный алгоритм корректно определяет относительные коэффициенты гидравлического сопротивления для различных ниток газопровода, что особенно важно для локализации потенциальных аварийных участков. В ходе эксперимента была достигнута стабильность расчётов, а диапазон отклонений результатов находился в пределах допустимых инженерных норм.

#### 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрены этапы разработки алгоритма и программы расчёта коэффициента гидравлического сопротивления для сложных газопроводов. Проведённые вычислительные эксперименты подтвердили эффективность предложенного подхода, основанного на методах численного моделирования, стохастической аппроксимации и аналитических расчётах.

Разработанный алгоритм позволяет учитывать сложные эксплуатационные условия, такие как изменяющиеся диаметры труб, наличие технологических узлов и влияние температурных градиентов. Полученные результаты показывают, что применение эталонного участка в качестве базового ориентира обеспечивает точное определение относительных коэффициентов гидравлического сопротивления, что особенно важно для локализации аварийных участков.

Предложенный метод расчёта способен повысить надёжность проектных решений в области транспорта газа, минимизировать погрешности при моделировании гидравлических процессов и оптимизировать эксплуатационные расходы. Дальнейшее развитие алгоритма, включая интеграцию с системами мониторинга и управления, позволит автоматизировать контроль параметров газопроводной сети и повысить её безопасность.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. Учебное пособие. Санкт-Петербург ИТМО, 2009. -173-175 с.

- [2] *Дилигенская А.Н.* Идентификация объектов управления. Изд-во: Самарский государственный технический университет, Самара, 2009.-61-68 с.
- [3] *Колтакова Н. В.* Проектирование городских систем газоснабжения: учеб.-метод. Пособие. — Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2017. — 17-20 с.
- [4] СНиП 23-01-99. Строительная климатология. – М.:ЦИТП Госстроя России, 2000.–136 с.
- [5] *Ямалов И.* Моделирование процессов управления и принятия решений в условиях чрезвычайных ситуациях. Издательство «ЛитРес». -2021 с.17-20.
- [6] *Кассина Н.В. и др.* Математическое моделирование разветвленных гидравлических систем // Компьютерные исследования и моделирование. – 2009. – Т.1, №2. – С.173-179.
- [7] *Ганиева, Н.* (2023). Концептуальные особенности формирования и формализации информационно-логической модели оценки структурных связей задач систем газоснабжения. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 4(2), 34–42.
- [8] *Ганиева, Н., & Узакова, А.* (2024). Оценка причинно-следственной модели показателей функционирования газораспределительной сети при нештатных ситуациях. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 7(4), 68–72. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v7i4.221>.
- [9] *Прангишвили И.В., Лотоцкий В.А. и др.* Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям. Журнал «Проблемы управления». –№4, 2004.–С.2-15.
- [10] *J. Ruths, A. Zlotnik, and J.-S. Li.* Convergence of a pseudospectral method for optimal control of complex dynamical systems. In 50th IEEE Conf. on Decision and Control, pages 5553–5558. IEEE, 2011.
- [11] *Khuzhayorov B.Kh., Ganieva N.A., Khodzhaev T.T.* Research and assessment of the situation model of the performance indices analysis of gas supply network // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. – 2020. – Vol. 10, Issue 3.–P.15485-15494.
- [12] *Ríos-Mercado R. Z. and Borraz-Sánchez C.*, “Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review,” *Applied Energy*, vol. 147, pp. 536–555, 2015.
- [13] *Wong P. J. and Larson R. E.*, “Optimization of Natural-Gas Pipeline Systems via Dynamic Programming,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 13, no. 5, pp. 475–481, 1968.

Поступила в редакцию 21.01.2025

**Цитирование:** *Ходжаев Ш.Т., Ганиева Н.А.* (2025). Формирование алгоритма и программы расчета коэффициента гидравлического сопротивления для сложного газопровода. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 8(1), –С. 79-84. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v8i1.234>.

## FORMATION OF AN ALGORITHM AND PROGRAM FOR CALCULATING THE HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT FOR A COMPLEX GAS PIPELINE

*Khodzhaev Sh.T.<sup>1</sup>, + Ganieva N.A.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Samarkand branch of Tashkent university of information technologies named after Muhammad al-Khwarizmi, Samarkand, Uzbekistan

**Abstract.** The article discusses the development of an algorithm and software for calculating the hydraulic resistance coefficient of complex gas pipeline systems. The methodology for selecting the initial data, the mathematical formulation of the problem, and the principles of numerical modeling are described. The main attention is paid to taking into account operational factors, such as changing pipeline geometry, local resistance and temperature-pressure gradients. An experimental testing of the algorithm on real data was carried out, confirming its accuracy and applicability for the design and operation of gas distribution networks. It is expected that the proposed approach will increase the reliability of hydraulic calculations and provide more efficient control of gas transport.

**Keywords:** hydraulic resistance, gas pipeline, numerical modeling, gas transport, resistance coefficient, stochastic approximation, design.