

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №1, Том 12 / 2020, No 1, Vol 12 <https://esj.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/26SAVN120.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Липатова А.В., Дербичев В.С., Роман К.С., Дудин Р.В., Гулая Ю.В., Шульгин В.Е. Неявный метод для моделирования сложной газопроводной сети // Вестник Евразийской науки, 2020 №1, <https://esj.today/PDF/26SAVN120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Lipatova A.V., Derbichev V.S., Roman K.S., Dudin R.V., Gulaya Ju.V., Shulgin V.E. (2020). Implicit method for modeling an open gas pipeline network. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(12). Available at: <https://esj.today/PDF/26SAVN120.pdf> (in Russian)

**УДК 05.23.00**

**ГРНТИ 05.23.03**

**Липатова Анжела Владиславовна**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: lipatova.av@students.dvfu.ru

**Дербичев Вячеслав Сергеевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: slavka564@mail.ru

**Роман Константин Сергеевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: kross\_god@mail.ru

**Дудин Роман Валерьевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: dudin.rv@students.dvfu.ru

**Гулая Юлия Васильевна**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: gulaya.yuv@students.dvfu.ru

**Шульгин Владислав Евгеньевич**

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 2-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: shulgin.ve@students.dvfu.ru

**Неявный метод для  
моделирования сложной газопроводной сети**

**Аннотация.** Моделирование газораспределительных сетей позволяет прогнозировать поведение системы в различных условиях эксплуатации. Модели могут быть использованы при принятии решений относительно проектирования и эксплуатации реальных систем. Главным достоинством математического моделирования является возможность прогнозирования результатов работы системы до начала ее эксплуатации, что может позволить принять верное решение еще на этапе проектирования системы, а также избежать нежелательных ситуаций в процессе эксплуатации газопроводов. Современные газотранспортные системы являются сложными технологическими комплексами, поэтому моделирование работы таких систем требует больших вычислительных затрат. В представленной работе рассматривается моделирование газовых сетей с помощью неявного метода. В работе приводится математическая модель как газопровода, так и узлов соединения в газотранспортной сети. Скорость вычислений, проводимых по этому алгоритму, будет достаточной для расчета современных внутригородских, межпоселковых и магистральных газопроводов. Это является чрезвычайно важным, так как главным ограничением математического моделирования современных газовых сетей является требуемая мощность вычислительной техники. В представленной работе предлагается включить в модель, состоящую из уравнений непрерывности и сохранения энергии, более сложные компоненты современных трубопроводных систем. В данной работе газопроводы рассматриваются как многокомпонентные системы, в которых каждый отдельный элемент системы представлен собственным набором уравнений, описывающих процессы, проходящие в узле. Кроме того, процедуры решения этих уравнений разработаны на основе направления потока газа в трубопроводе. Для проверки точности и эффективности решения были предложены критерии оценки этих параметров.

#### **Вклад авторов.**

Липатова Анжела Владиславовна – автор внес главный вклад в написание статьи. Ему принадлежит идея статьи. Принимал участие в написании статьи. Производил координацию работы научного коллектива.

Дербичев Вячеслав Сергеевич – автор производил поиск литературы.

Роман Константин Сергеевич – автор оказывал участие в написании статьи. Производил создание графического материала. Одобрил окончательную версию статьи перед её подачей для публикации.

Дудин Роман Валерьевич – автор оказывал участие в поиске общей информации для написания статьи. Собрал, проанализировал и сгруппировал информацию для включения в текст статьи.

Гулая Юлия Васильевна – автор оказывал координацию членов коллектива по поиску информации. Производил поиск информации по вопросу, поднятому в статье, в зарубежных источниках.

Шульгин Владислав Евгеньевич – автор оказывал участие в поиске общей информации для написания статьи. Собрал, проанализировал и сгруппировал информацию для включения в текст статьи.

**Ключевые слова:** газопровод; моделирование; уравнения состояния; эффективность моделирования; природных газ; транспортировка газа; компремированный природный газ; неявный метод

## Введение

Природный газ является высококачественной и более экологичной альтернативой другим видам топлива, таким как нефть и уголь. Кроме того, даже разведанные запасы природного газа в разы превышают запасы нефти, которая на сегодняшний день является основным источником энергии в мировой промышленности [1]. Однако, использование природного газа осложняется тем, что его транспортировка предусматривает затраты, которые в разы превышают затраты на транспортировку объема нефти равной энергетической ценности. По этой причине одним из основных векторов исследований, связанных с повышением использования природного газа в мировой экономике, является вопрос повышения надежности и оптимизация работы трубопроводного транспорта газа. На сегодняшний день все больше населенных пунктов как в нашей стране, так и по всему миру, подключаются к использованию природного газа для выработки электроэнергии, нужд промышленности, а также коммунального использования, то есть для приготовления пищи и подогрева воды. Поскольку современные газовые сети становятся все сложнее и сложнее, появляются новые вызовы для проектирования, мониторинга и эксплуатации таких систем. Моделирование газовых сетей позволяет прогнозировать поведение системы в различных условиях. Сопоставляя выходные данные симулятора с данными промышленной эксплуатации, получаемыми диспетчерскими центрами и системами администрирования данных (SCADA), работа газопроводов может подвергаться непрерывной оценке и контролю в режиме реального времени. Также могут быть проанализированы история эксплуатации и протекание переходных процессов. Благодаря такой работе по накоплению и анализу информации, становится возможным составление прогнозов для различных процессов, что позволит повысить эффективность и надежность как уже введенных в эксплуатацию систем, так и проектируемых газопроводов. В зависимости от характеристик потока газа, выделяют два состояния, которые подвергаются моделированию:

1. Устойчивое моделирование (статическое).
2. Нестационарных моделирование (расчет параметров переходных процессов внутри системы) [2].

Устойчивое моделирование не учитывает изменение характеристик потока газа во времени. Целью такого моделирования являются вычисление давления в определенном узле системы, нагрузок, которым подвержены узлы для проектирования газопровода. Давление в узлах и скорость потока газа должны удовлетворять условиям безопасности, определяемым исходя из категории газопровода. Кроме того, нагрузка и падение давления в узле должны находиться в установленном диапазоне значений. В представленной работе главный акцент сделан на рассмотрении вопросов нестационарного моделирования. Этот тип моделирования подразумевает, что характеристики газового потока являются функциями от времени. В действительности, поток газа в трубопроводе практически постоянно подвержен изменению собственных характеристик, в то время как установившееся состояние на практике встречается редко [3]. Таким образом нестационарного моделирование является важным для оптимизации работы газопроводов. Математическая модель нестационарного моделирования представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных. Уравнения сохранения массы, сохранения импульса и сохранения энергии. Уравнения, входящие в математическую модель, являются нелинейными и по этой причине необходимо использовать численные методы для решения системы. Для этой цели применяются различные методы, такие как метод характеристик, метод конечных разностей и метод конечных элементов. Метод характеристик приводит систему к семейству обыкновенных дифференциальных уравнений вдоль характеристических кривых для получения параметров потока. Метод конечных разностей предусматривает разбиение газопровода на множество коротких участков, затем преобразование системы в систему дифференциальных уравнений на этих участках и решение

дифференциальных уравнений. Метод конечных элементов также делит весь трубопровод на множество небольших участков, которые называются конечными элементами, а затем использует вариационные методы для вывода простых уравнений на этих конечных элементах. После этого необходимо решить большую систему простых уравнений путём минимизации связанной функции ошибок [4].

Среди численных методов неявный метод конечных разностей является одним из наиболее широко применимых. Главным достоинством этого метода является то, что его шаг по времени не ограничен критериями устойчивости. Это означает, что временной шаг неявного метода конечных разностей может быть очень большим, что является полезным для моделирования длительных переходных процессов в газопроводе. В этом методе должна быть решена одна система крупномасштабных нелинейных дискретных уравнений. При работе с большими газовыми сетями эффективность этого метода может быть низкой.

Для повышения скорости вычислений неявного метода конечных разностей были проведены различные исследования [5]. Предлагается стратегия несвязного решения, в котором уравнения неразрывности и уравнения сохранения энергии были решены альтернативно. Эта стратегия может позволить повысить скорость вычислений примерно на 20 %.

Рассмотренные методы увеличения эффективности динамического моделирования газопроводов позволили в значительной степени повысить скорость вычислений. Однако, все они предусматривают рассмотрение всей газотранспортной сети в целом. По этой причине неизбежно возникает необходимость решения крупномасштабных уравнений. Следовательно, в представленной работе предлагается деление газопроводов на множество участков различной длины в зависимости от содержания на том или ином участке различных узлов, а затем их решение по одному, что может стать эффективным методом дальнейшего повышения скорости расчета. В ходе решения сначала были решены соединительные узлы, а параметры потока, такие как давление и скорость потока были известны.

Затем газопроводы были решены один за другим в том порядке, в котором они появляются в газовой сети. В практических инженерных задачах газопроводная сеть обычно является очень сложной. Реальные газопроводные сети включают в себя не только непосредственно линейную часть, то есть газопровод, но и другие компоненты, такие как компрессоры, клапаны и т. д. Кроме того, важным вопросом является влияние термодинамических процессов на транспортировку газа. Рассмотрение процесса транспортировки природного газа как изотермического может привести к снижению точности расчета. Таким образом, предлагается добавить в алгоритм расчёта также и термодинамическое моделирование.

### **Математическая модель**

При моделировании газопроводов выделяют следующие разделы. Модель газопровода, модель многокомпонентный узлов и граничные условия.

Рассмотрим данные составляющие математической модели отдельно.

### **Модель газопровода**

При моделировании газопровода обычно предполагается, что поток газа является однородным равновесным потоком с незначительным содержанием жидкости, взвешенной в виде мелких капелек. Неравномерность распределения скоростей в сечении трубопровода не учитывается. Модель представляет собой набор управляющих уравнений однородного,

геометрически одномерного потока в трубопроводе, состоящая из уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии. Эти уравнения могут быть записаны в общем виде. Параметры приведены в таблице 1.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{B} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} = \mathbf{F} \quad (1)$$

где параметры U, B и F заменяют следующие выражения (таблица 1).

Таблица 1

Параметры U, B и F уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии

U	B	F
$\begin{bmatrix} p \\ m \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{A} \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \\ \left[ A - \frac{m^2}{A\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \right] & \frac{2m}{A\rho} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \frac{\partial T}{\partial t} \\ -\frac{\lambda}{2} \frac{m m }{dA\rho} - A\rho g \sin \theta + \frac{m^2}{A\rho^2} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_\rho \frac{\partial T}{\partial x} \end{bmatrix}$
T	w	$\frac{1}{\rho c_v} \left[ -T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\lambda}{2} \frac{\rho  w ^3}{d} - \frac{4K(T-T_a)}{d} \right]$

Составлено авторами

Уравнение состояния выражается как

$$p = \rho RT + (B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4}) \rho^2 + (bRT - a - \frac{d}{T}) \rho^3 + \alpha (a + \frac{d}{T}) \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma \rho^2) \exp(-\gamma \rho^2) \quad (2)$$

Основными компонентами газопровода, помимо, собственно, самого трубопровода, являются компрессоры и клапаны. Их математические модели можно найти во многих источниках [6; 7]. В данной работе, математические модели компрессора и клапанов представлены в виде уравнений (3)–(5) и уравнений (6)–(7) соответственно.

Модель компрессора:

$$m_{in} - m_{out} = 0, \quad (3)$$

$$p_{out} - \varepsilon p_{in} = 0, \quad (4)$$

$$T_{out} - T_{in} \varepsilon^{\frac{n-1}{n}} = 0, \quad (5)$$

где  $\varepsilon = a + bQ_{in} + cQ_{in}^2$ .

Модель клапана:

$$m_{in} - m_{out} = 0, \quad (6)$$

$$m_{in} - C_v \rho_{in} \sqrt{\frac{p_{in}^2 - p_{out}^2}{Z \Delta T_{in}}} = 0, \quad (7)$$

$$T_{out} - T_{in} + (p_{out} - p_{in}) \left\{ \frac{1}{c_p} \left[ \frac{T}{\rho^2} \frac{(\partial p / \partial T)_\rho}{(\partial p / \partial \rho)_T} - \frac{1}{\rho} \right] \right\}_{out} = 0, \quad (8)$$

### Модель многокомпонентного узла соединения

В каждом многокомпонентный узле соединения должны соблюдаться законы сохранения. Соответствующие математические модели представлены уравнениями (9)–(10).

Сохранение массы:

$$\sum m_{in} = \sum m_{out}, \quad (9)$$

Давление газа:

$$p_{in,1} = p_{in,2} \dots = p_{out,1} = p_{out,2} \dots, \quad (10)$$

Температура газа на выходе из узла

$$T_{out,1} = T_{out,2} \dots = \sum |c_p m T|_{in} / \sum |c_p m|_{out}, \quad (11)$$

### Граничные условия

Граничные условия определяются значениями давления и температуры газа на выходе из газопровода, а также значением расхода газа конечным потребителем. Внешние компоненты газопровода определяют спрос на природный газ и, соответственно, расход [8; 9]. Граничные условия определяются уравнениями (12)–(14).

Давление:

$$p = p(t), \quad (12)$$

Массовый расход:

$$m = m(t), \quad (13)$$

Температура:

$$T = T(t), \quad (14)$$

### Дискретизация

Модель газопровода, то есть уравнение (1), является нелинейным уравнением в частных производных. Это уравнение может быть линеаризовано в предыдущем временном шаге, по методу Тейлора, как показано ниже [10].

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \bar{\mathbf{B}} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} + \bar{\mathbf{G}} \cdot (\mathbf{U} - \bar{\mathbf{U}}) = \bar{\mathbf{F}} + \bar{\mathbf{S}} \cdot (\mathbf{U} - \bar{\mathbf{U}}), \quad (15)$$

при этом  $[\mathbf{G}]_{i,j} = \sum_{l=1}^n \left( \frac{\partial B}{\partial u_j} \right)_{i,l} \frac{\partial u_l}{\partial x}, [\mathbf{S}]_{i,j} = \frac{\partial F_i}{\partial u_j}.$

Следует отметить, что черта над матрицами B, G, F, S и U представляет предыдущий временной шаг для этих матриц.

Трубопровод разделён на N секций, и, таким образом, существует N + 1 точек пространственной сетки. На рисунке 1 показана пространственная дискретизация в модели газопровода.



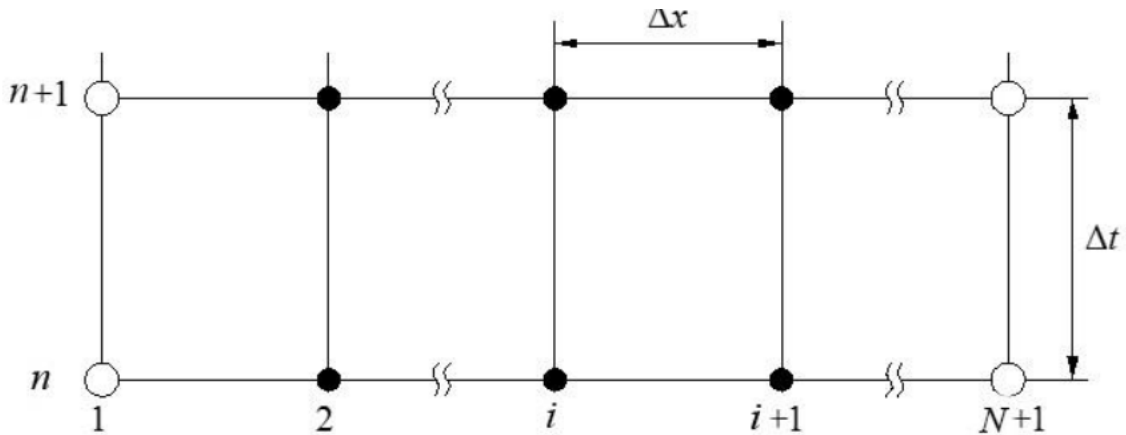


Рисунок 1. Пространственное разбиение газопровода (составлено авторами)

Уравнение потока дискретизируется по схеме центральной разности.

$$CE_i \cdot U_i^{n+1} + DW_i \cdot U_{i+1}^{n+1} = H_i, \tag{16}$$

Уравнения (3)–(17) являются математической моделью сети газопроводов. Эти уравнения могут быть разделены на две категории: система уравнений потока природного газа и система термодинамических уравнений. Система уравнений потока представлена уравнениями (3)–(4), (6)–(7), (9)–(10), (12)–(13) и уравнением (16). В то время как к термодинамическим к уравнениям относятся уравнения (5), (6), (11), (14) и (17).

Стратегия решения этих систем подразумевает решение дискретизированных уравнений потока с использованием интерполированной температуры. Затем дискретизированные уравнения термодинамики решаются с использованием решённых переменных потока (давление и скорость потока). На рисунке 2 представлена принципиальная схема этого подхода.

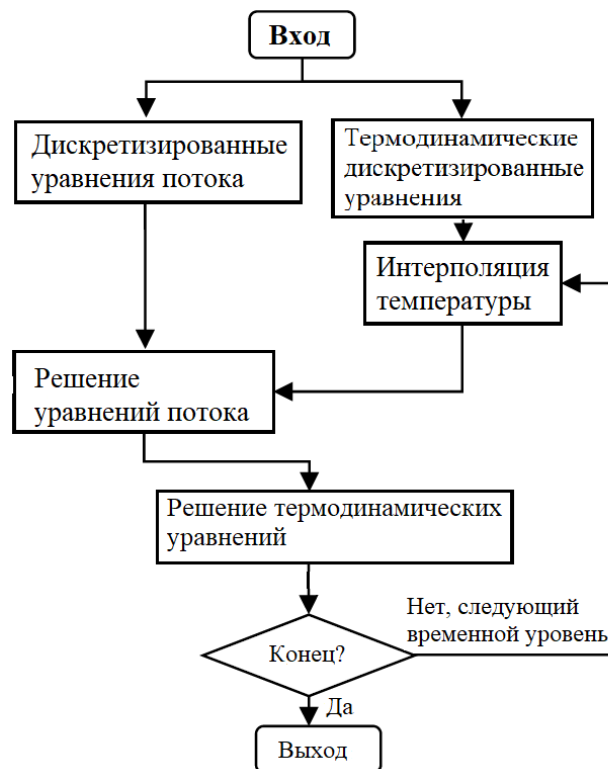
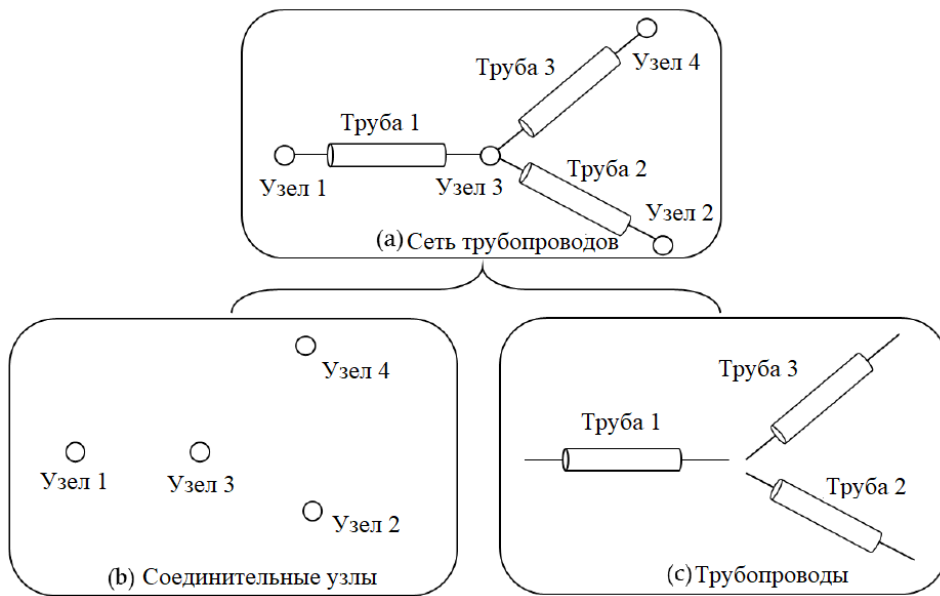


Рисунок 2. Принципиальная схема решения систем термодинамических уравнений и уравнений потока (составлено авторами)

**Главная идея метода**



**Рисунок 3.** Разбиение газовой сети на отдельные узлы и трубопроводы (составлено авторами)



**Рисунок 4.** Принципиальная схема метода введения дискретизированных уравнений газопровода для решения системы (составлено авторами)

В рассматриваемом методе газовая сеть делится на несколько независимых газопроводов, которые впоследствии решаются один за другим. На рисунке 3 показан пример, где сеть трубопроводов разделена на четыре узла соединения и три трубопровода.



Ключом к решению сети трубопроводов является решение узлов соединения. Однако, число уравнений, описывающих такие узлы, меньше, чем число неизвестных, поэтому эти уравнения узлов не могут быть решены напрямую. В представленной работе предлагается решение этой проблемы путём введения дополнительных уравнений из числа дискретных уравнений газопровода. Другими словами, дискретизированные уравнения газопровода решаются заранее для того, чтобы получить дополнительные уравнения. Затем, уравнения узлов связи решаются с помощью этих дополнительных уравнений.

На рисунке 4 показана принципиальная схема этого метода.

### Заключение

В ходе проведенной работы был разработан принципиальный алгоритм расчета сложных систем транспорта природного газа. Главным достоинством предлагаемого метода математического моделирования становится возможность решения систем уравнений, входящих в математическую модель узлов соединения, путем добавления дискретных уравнений, описывающих эксплуатационные параметры газопровода. Главными приоритетами дальнейшей работы являются решение вопросов моделирования сложных газотранспортных сетей, термодинамическое моделирование как отдельных участков газопровода, так и всей системы с учетом процессов, проходящих в соединительных узлах системы. А также проверка сходимости результатов, получаемых путем моделирования по предлагаемому методу с данными промышленной эксплуатации действующих систем, а также с экспериментальными данными.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ивановский В.Н. Энергетика добычи нефти: основные направления оптимизации энергопотребления // Инженерная практика, 2011. – №6. – С. 18–26.
2. Misuse Intrusion Detection Using Machine Learning for Gas Pipeline SCADA Networks. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/333248611\\_Misuse\\_Intrusion\\_Detection\\_Using\\_Machine\\_Learning\\_for\\_Gas\\_Pipeline\\_SCADA\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/333248611_Misuse_Intrusion_Detection_Using_Machine_Learning_for_Gas_Pipeline_SCADA_Networks).
3. Szoplik, J. Improving the natural gas transporting based on the steady state simulation results. *Energy* 2016, 105–116.
4. Chaczykowski, M. Transient flow in natural gas pipeline – The effect of pipeline thermal model. *Appl. Math. Model.* 2010, 34, 1051–1067.
5. Прахова М.Ю., Мырнин И.Н., Савельев Д.А. Локальная автоматическая система электроподогрева для предотвращения гидратообразования на сбросном трубопроводе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 2. С. 3–6.
6. Wen, K.; Xia, Z.; Yu, W.; Gong, J. A new lumped parameter model for natural gas pipelines in state space. *Energies* 2018, 11.
7. Пирский А.В. Разработка математической модели функции преобразования тензорезисторного чувствительного элемента датчика абсолютного давления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – №3. – С. 200–205.
8. Rios-Mercado, R.; Borraz-Sanchez, C. Optimization problems in natural gas transportation systems: A state-of-the-art review. *Appl. Energy* 2015, 147, 536–555.
9. Wang, P.; Yu, B.; Han, D.; Li, J.; Sun, D.; Xiang, Y.; Wang, L. Adaptive implicit finite difference method for natural gas pipeline transient flow. *Oil Gas Sci. Technol.* 2018, 73, 21.
10. Cortinovis, A.; Mercangoz, M.; Zovadelli, M.; Pareschi, D.; de Marco, A.; Bittanti, S. Online performance tracking and load sharing optimization for parallel operation of gas compressors. *Comput. Chem. Eng.* 2016, 88, 145–156.

**Lipatova Angela Vladivslavovna**

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: lipatova.av@students.dvfu.ru

**Derbichev Vyacheslav Sergeevich**

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: slavka564@mail.ru

**Roman Konstantin Sergeevich**

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: kposs\_god@mail.ru

**Dudin Roman Valerievich**

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: dudin.rv@students.dvfu.ru

**Gulaya Julia Vasilievna**

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: gulaya.yuv@students.dvfu.ru

**Shulgin Vladislav Evgenievich**

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: shulgin.ve@students.dvfu.ru

## Implicit method for modeling an open gas pipeline network

**Abstract.** Simulation of gas distribution networks allows you to predict the behavior of the system in various operating conditions. Models can be used in making decisions regarding the design and operation of real systems. The main advantage of mathematical modeling is the ability to predict the results of the system before its operation, which can allow you to make the right decision at the design stage of the system, as well as avoid undesirable situations during the operation of gas pipelines. Modern gas transmission systems are complex technological complexes, so modeling the operation of such systems requires large computational costs. In the present paper, modeling of gas networks using the implicit method is considered. The paper presents a mathematical model of both the gas pipeline and the connection nodes in the gas transmission network. The speed of calculations carried out by this algorithm will be sufficient to calculate modern intra-city, inter-settlement and main gas pipelines. This is extremely important, since the main limitation of the mathematical modeling of modern gas networks is the required computing power. In the presented work, it is proposed to include in the model consisting of continuity and energy conservation equations more complex components of modern pipeline systems. In this work, gas pipelines are considered as multicomponent systems in which each individual element of the system is represented by its own set of equations describing the processes taking place in the node. In addition, the procedures for solving these equations are developed based on the direction of gas flow in the pipeline. To verify the accuracy and effectiveness of the solution, criteria for evaluating these parameters were proposed.

**Keywords:** gas pipeline; modeling; equations of state; modeling efficiency; natural gas; gas transportation; compressed natural gas; implicit method