

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

2019, №4, Том 11 / 2019, No 4, Vol 11 <https://esj.today/issue-4-2019.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/11SAVN419.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Мещук А.А., Дербичев В.С., Роман К.С., Баженов П.А., Болдырев К.А., Дорошенко Г.А. Моделирование влияния переходных процессов на работу газопровода // Вестник Евразийской науки, 2019 №4, <https://esj.today/PDF/11SAVN419.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Meshchuk A.A., Derbichev V.S., Roman K.S., Bazhenov P.A., Boldyrev K.A., Doroshenko G.A. (2019). Modeling the effect of transients on the work of the pipeline. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 4(11). Available at: <https://esj.today/PDF/11SAVN419.pdf> (in Russian)

*Коллектив авторов благодарит своего научного руководителя – Звереву Валентину Александровну – к.т.н., доцент кафедры инженерных систем*

**УДК 72**

**Мещук Александр Андреевич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 1-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: Meshchuk.aa@students.dvfu.ru

**Дербичев Вячеслав Сергеевич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 1-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: slavka564@mail.ru

**Роман Константин Сергеевич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 1-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: kross\_god@mail.ru

**Баженов Павел Александрович**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 1-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: bazhenov.pa@students.dvfu.ru

**Болдырев Константин Алексеевич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 1-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: boldyrev.ka@students.dvfu.ru

**Дорошенко Геннадий Андреевич**

ФГОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия  
Студент 1-го курса кафедры «Нефтегазовое дело и нефтехимии»  
Магистрант  
E-mail: Doroshenko.gena@mail.ru

## Моделирование влияния переходных процессов на работу газопровода

**Аннотация.** В статье представлено исследование передачи тепла от газопровода к почве. Исследован эффект упрощения модели теплопередачи. В ходе проведенных исследований с использованием различных конфигураций разрабатываемой модели изучены устойчивые, одномерные нестационарные и двумерные нестационарные модели стенки трубы и грунта. В ходе работы были рассмотрены различные варианты решения поставленной задачи. Было произведено сравнение возможности решения задачи с помощью аналитических и численных методов. При использовании численных методов, были опробованы различные конфигурации пространственной и временной дискретизации в зависимости от цели исследования. Для одномерной модели была предложена схема концентрических колец с постоянным увеличением их толщины по мере удаления от газопровода. Для двумерной модели оптимальной была признана радиальная сетка разбиения, которая по мере удаления от трубопровода переходит в перпендикулярную. Это позволило достичь высокой точности расчета при этом сохранив баланс с временем обработки результатов моделирования. Также в ходе работы были рассмотрены различные условия входа потока в трубопровод. Исследованы эффекты быстрых изменений массового расхода газа и температуры на входе в трубопровод. Рассмотренные условия часто встречаются в трубопроводах большого диаметра, рассчитанные на экспорт газа. В таких системах часто встречаются морские и заглубленные участки вдоль трассы трубопровода. Поэтому данные исследования будут актуальны для оптимизации работы различных типов газопроводов. В работе также был произведен сравнительный анализ полученных данных с данным промышленной эксплуатации экспортного газопровода.

### Вклад авторов.

Мещук Александр Андреевич – автор внес главный вклад в написание статьи. Ему принадлежит идея статьи. Производил моделирование в программе Ansys. Принимал участие в написании статьи. Производил координацию работы научного коллектива.

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

Дорошенко Геннадий Андреевич – автор оказывал участие в поиске общей информации для написания статьи. Собрал, проанализировал и сгруппировал информацию для включения в текст статьи.

Роман Константин Сергеевич – автор производил построение моделей в программе SolidWorks для дальнейшего их переноса в программу Ansys.

Баженов Павел Александрович – автор оказывал координацию членов коллектива по поиску информации. Производил поиск информации по вопросу, поднятому в статье, в зарубежных источниках.

Болдырев Константин Алексеевич – автор оказывал участие в поиске общей информации для написания статьи. Собрал, проанализировал и сгруппировал информацию для включения в текст статьи.

**Ключевые слова:** моделирование газопровода; переходные процессы; численные методы; временная дискретизация; пространственная дискретизация; аналитические методы; изменение температуры; изменение расхода; термостабилизация грунта; растепление грунта; тепловая изоляция газопровода

## Введение

В представленной работе исследован эффект упрощения модели теплопередачи от газопровода к окружающему грунту. Особый интерес при моделировании работы газопровода представляют процессы быстрого перехода и одних условий потока к другим. Эти процессы можно наблюдать, например, на входе потока газа в газопровод. Главной целью исследования является определение влияния коэффициента теплопередачи на эффективность трубопроводного транспорта газа. На основе проведенных исследований предлагается усовершенствование такой модели нестационарного теплообмена с одномерной радиальной на двумерную. В работе было проведено сравнение различных режимов транспорта при одних и тех же параметрах системы. Исследованы эффекты быстрого изменения массового расхода и температуры на входе в газопровод. Параметры рассматриваемой системы сравнимы с параметрами экспортных газопроводов от шельфовых газовых месторождений. На сегодняшний день существует необходимость в уточнении применяемых моделей для подобных систем [1].

Потребление природного газа во всем мире сильно подвержено сезонности. В холодных странах пик потребления приходится на зимнее время, когда повышается потребность в производстве тепла. В то же время в жарких странах наибольший спрос на природный газ приходится на летний период, так как природный газ используется в системах кондиционирования помещений. По этой причине расход газа в трубопроводной системе также постоянно варьируется вплоть до того, что часть года трубопровод законсервирован, а другую часть работает на пределе своей мощности. В таких условиях постоянно происходят изменения режима работы газопровода. В работе были рассмотрены переходные процессы, то есть изменение давления и температуры в следствии расконсервации газопровода.

Здесь важно отметить, что преимущественно газовые сети практически постоянно пребывают в процессе изменения режима работы. Стабильный режим работы газопровода скорее является исключением. По этой причине понимание переходных процессов играет важную роль в оптимизации работы газопроводов. Масштаб переходных процессов во времени варьируется от одной минуты до нескольких часов, поэтому отслеживание отдельного переходного процесса требует проведение постоянного наблюдения от нескольких часов до нескольких дней [2].

## Моделирование газопровода

В данной работе используется модель экспортного газопровода. Трубопровод из углеродистой стали. Внутренний диаметр газопровода равен 1000 мм. Толщина стальной стенки равна 44 мм. Снаружи стенка газопровода защищена пластиковым антикоррозионным покрытием толщиной в 6 мм. Длина газопровода принята равной 100 км. Профиль трассы трубопровода принят горизонтальным. Газопровод проложен по морскому дну и подвержен воздействию океанического течения. Температура морской воды принята 277 К. Скорость движения газа по трубопроводу – 0,1 м/с. В исследовании были рассмотрены два типа переходных процессов, представленных на рисунке 1 и рисунке 2.

Первый тип переходного процесса – это ступенчатое изменение массового расхода на входе в трубопровод. Время перехода составляет 60 секунд. Периоды постоянного массового расхода составляют несколько дней. В данном типе анализа температура газа на входе принята постоянной. Второй переходный процесс представляет собой ступенчатое изменение температуры на входе в газопровод (от 303,15 К до 308,15 К) при сохранении построенного массового расхода. Такие переходные процессы представляют собой граничные условия реальных переходных процессов, проходящих в газопроводах. Теплопроводность почвы

принята равной 3 Вт/мК. Эта модель сжимаемого потока подходит для однофазной газовой смеси. Модель, с помощью которой были проведены обозначенные выше опыты, основана на уравнениях Навье-Стокса. Основные уравнения, описывающие движение потока газа в одномерной модели, являются результатом усреднения трехмерных уравнений [3].

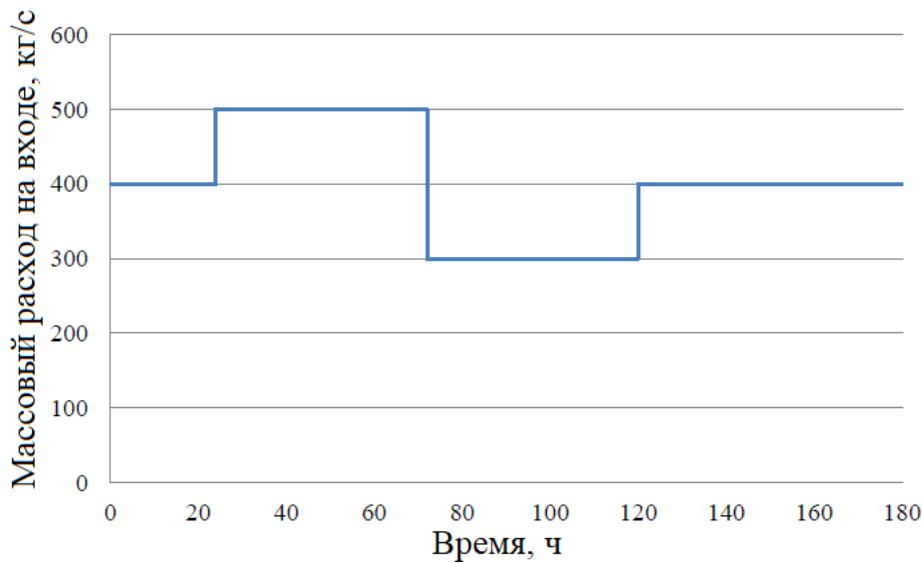


Рисунок 1. Изменение массового расхода на входе в трубопровод (составлено авторами)

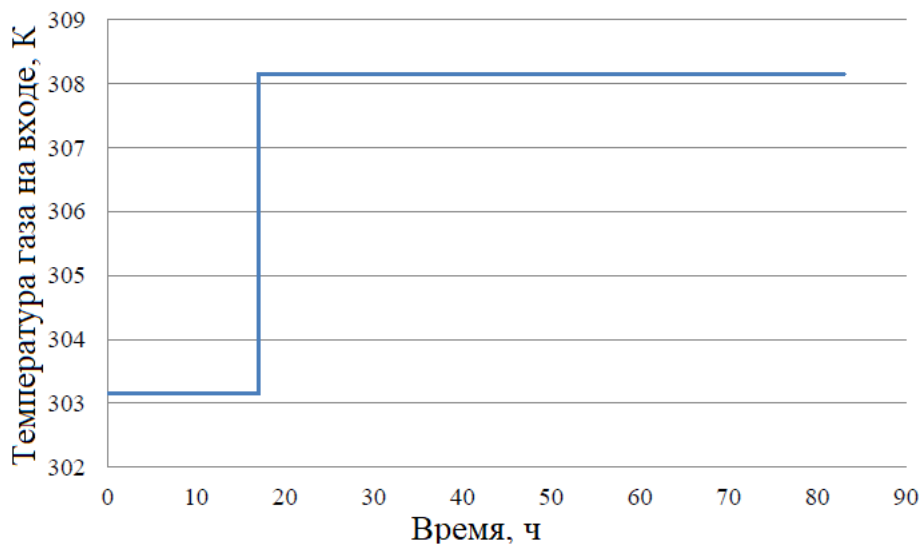


Рисунок 2. Изменение температуры газа на входе в трубопровод (составлено авторами)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \sin \theta - \frac{1}{2} \rho u^2 \frac{f}{D} \tag{2}$$

$$\rho C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) + u \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{f \rho u^3}{2D} - \frac{4U}{D} (T - T_a) \tag{3}$$

Теплопередача от потока газа внутри газопровода к окружающей среде представлена в правой части уравнения (3). Выразив скорость теплообмена единицы массы газа в единицу времени (Вт/кг) можно выразить уравнение сохранения энергии

$$\rho C_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) + u \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_p \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{f \rho u^3}{2D} - \rho q \quad (4)$$

Преимуществом использования уравнения сохранения энергии в этой форме состоит в том, что область свойства потока могут быть непосредственно соотнесены со свойствами теплопередачи. Эта связь осуществляется через использование параметров стенки трубопровода, вместо использования общего коэффициента теплоотдачи для всей системы. В уравнении (3) первое слагаемое в правой части уравнения – это внутренние потери энергии на трение, в то время как второе слагаемое представляет собой обмен энергией с окружающей средой.

### Модели теплопередачи

В работе для моделирования процессов теплообмена газопровода с окружающей средой рассматриваются три различные модели теплопередачи. Главным допущением разрабатываемой модели является предположение, что теплопередачей в осевом направлении можно пренебречь. Радиальный теплообмен является доминирующим в системе газопровода [4].

### Модель устойчивого состояния

Данная модель используется для оценки свойств окружающей среды и стенки газопровода. Поток тепла от газа в трубопроводе до земли и обратно описывается с помощью собирательного коэффициента теплопередачи, который в свою очередь включает в себя коэффициенты стенки трубопровода и грунта. Проводимость через стенку трубопровода может быть получена с помощью уравнения

$$h_w = \sum_{j=1}^n \ln(r_{oj} / r_{ij}) / k_j \quad (5)$$

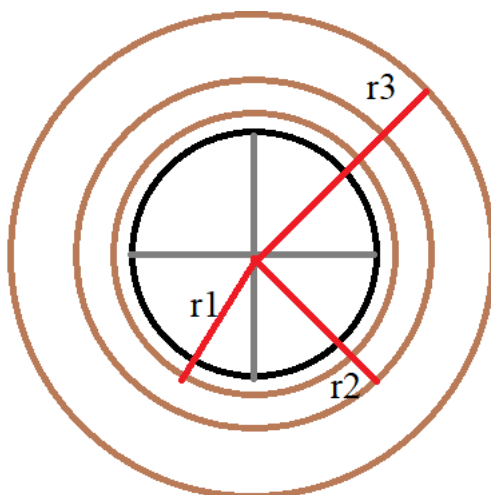
где  $n$  – число слоев стенки трубопровода,  $k_j$  – теплопроводность отдельного слоя стенки  $j$ ,  $r_{oj}$  и  $r_{ij}$  – внешний и внутренний радиус пристенного слоя  $j$  соответственно.

### Одномерная радиальная нестационарная модель

На сегодняшний день работ, посвященных исследованию нестационарного теплообмена в длинных газопроводах, заглубленных в грунт недостаточно для составления полного понимания этого процесса. В этих исследованиях теплопроводность через почву рассматривается как одномерный радиальный процесс. С другой стороны, неустойчивый режим теплопередачи для полого цилиндра, заглубленного в грунт уже широко изучен. Для этого случая существуют как аналитические решения, так и решения, полученные с помощью численных методов [5].

В данной работе предполагается, что использование единого коэффициента теплопередачи может быть достаточным для расчета системы в установившемся постоянном режиме работы. Однако, когда в силу вступают переходные процессы такой метод будет давать

неточные результаты. Это утверждение может быть подтверждено с помощью применения численных методов решения нелинейных уравнений. Грунт в разрабатываемой модели будет представлен в виде серии концентрических оболочек, каждая из которых обладает однородными теплофизическими свойствами. Толщина оболочки увеличивается с увеличением радиального расстояния от оси трубопровода для обеспечения необходимой точности без серьезного усложнения разрабатываемой модели. Такая концепция была принята на основании результатов других исследований, где утверждается, что основные потери тепла происходят вблизи стенки трубопровода и общий тепловой поток снижается пропорционально логарифму радиального расстояния от оси газопровода [6]. На рисунке 3 показано радиальное сечение трубопровода в разрабатываемой модели.



*Рисунок 3. Схематическое изображение слоев грунта с увеличивающейся толщиной по мере радиального удаления от трубопровода (составлено авторами)*

По данным исследования разрабатываемой модели были сделаны предположения о том, что применение модели теплового потока между грунтом и газопроводом с использованием коэффициента теплообмена для стационарного состояния системы, может привести к неточностям расчета. В свою очередь эти неточности могут привести к неверному определению толщины или типа подбираемой теплоизоляции или интенсивности необходимой термической стабилизации грунта и, как следствие, его растепелю, просадке газопровода и возможным авариям при самом неблагоприятном стечении обстоятельств. Для решения этой проблемы предлагается усовершенствование существующих моделей для учета переходных процессов.

Как уже было отмечено ранее моделирование влияния переходных процессов на основные параметры трубопроводной системы является сложной задачей. По этой причине одним из наиболее простых решений может стать введение в расчет теплового потока дополнительного поправочного коэффициента, который мог бы позволить учесть возможное увеличение теплового потока в трубопроводе за счет возникновения переходных процессов [7].

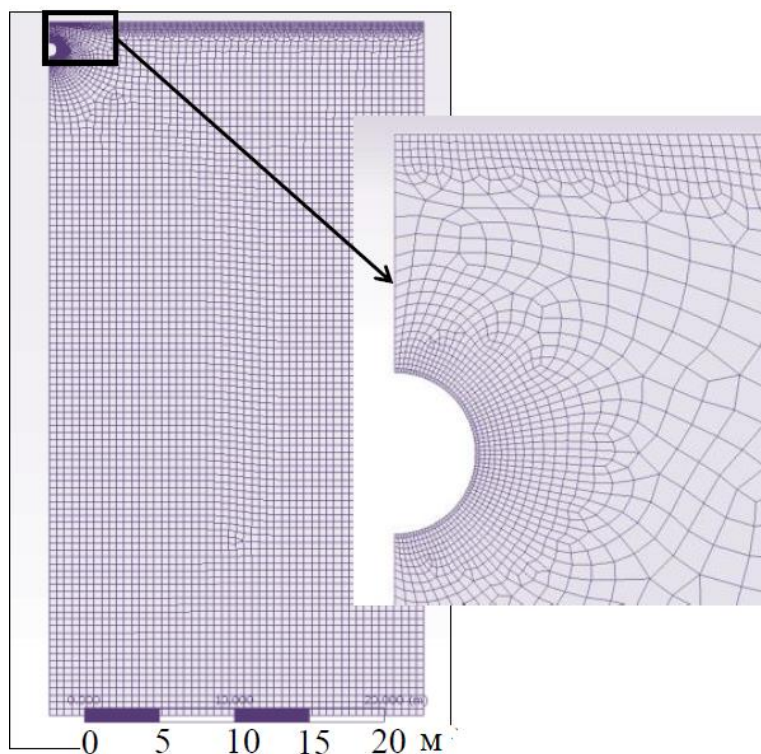
Разрабатываемая модель должна быть способна решать одномерную радиальную форму уравнения нестационарной теплопроводности, используя методику граничных условий. Как уже было отмечено ранее модель состоит из цилиндрических слоев грунта, окружающих газопровод. Поле температуры изменяется как во времени, так и в радиальном пространстве, но не под углом. Как уже было отмечено решение задачи производится с помощью численных методов, где и пространство, и время разбиваются на отдельные сегменты и уровни. В пространстве производится разбиение с постоянным увеличением толщины уровня пропорционально натуральному логарифму расстояния от оси газопровода. Во времени производится разбиение на равные временные отрезки, длина которых зависит от требуемой



точности расчета. В каждом расчете необходимо задать начальные условия потока в устойчивом состоянии и соответствующие параметры трубопроводной системы, то есть коэффициенты теплопередачи всех компонентов. Устойчивое состояние системы может быть воспроизведено в модели как частный случай переходного процесса с постоянными граничными условиями в течении достаточного количества временных шагов. В каждом временном шаге изменения температуры системы рассчитываются с помощью использования температуры газа в предыдущем временном отрезке в качестве исходных данных текущего шага. В разрабатываемой модели общая радиальная толщина грунта выбирается равной глубине залегания газопровода от поверхности земли до оси трубопровода [8; 9].

### Двумерная модель переходных процессов

На сегодняшний день существует ряд исследований по разработке двумерной модели газопровода, заключенного в грунт. Вклад представленной работы в развитие рассматриваемой темы состоит в том, что в работе производится исследование нестационарной теплопередачи, используя полную тепловую связь между потоком сжимаемого газа и тепловой областью. Кроме того, используется двумерное представление стенки трубы и грунта. Двумерная нестационарная модель в нашем исследовании предусматривает связь области влияния теплового потока от газопровода с уравнением сохранения энергии, аналогичному одномерной радиальной нестационарной модели, рассматриваемой ранее. В разрабатываемой модели производится расчет температуры газа и на его основе получается тепловой поток от стенки трубы. В пространстве модель вблизи стенки газопровода является радиальной и с удалением переходит в прямоугольную систему координат. Система схематически показана на рисунке 4.



*Рисунок 4. Пространственное представление разрабатываемой модели (составлено авторами)*

Двумерные «среды» почвы, дискретизированы, то есть разбиты на отдельные секции с использованием сетки разбиения конечного объема программы FLUENT. Размеры этих

сегментов зависят от требуемой точности вычисления. Слой стенки трубопровода моделируется, принимая допущение о идеальном тепловом контакте с почвой. Размер сетки должен быть выбран достаточно большим, чтобы температурные градиенты были близки к нулю на вертикальной и нижней границах. Для уменьшения размера разрабатываемой модели была принята симметрия относительно оси Y. Температура окружающей среды связана с верхней границей сетки через конвективное граничное условие, использующее впоследствии коэффициент теплопередачи для оценки влияния окружающей среды на процесс теплообмена. Сетка модели уточнялась до тех пор, пока установившаяся скорость теплопередачи на стенке трубопровода не изменилась более чем на 1 %. В данном случае параметры газа и окружающей среды были выбраны следующими:  $T_{\text{газ}} = 303 \text{ К}$ ,  $T_{\text{окруж.сред}} = 278 \text{ К}$ . Сходимость модели подтверждалась решением уравнения сохранения энергии. Необходимым условием для прекращения уточнения было выбрана разница между правой и левой частями уравнения равная  $10^{-9}$ . Коэффициент релаксации в модели принят равным единице. На внутренней поверхности стенки газопровода используется граничное условие конвективного теплообмена. Результирующий теплообмен рассчитывается путем суммирования чистого теплообмена у каждого элемента [10].

### Выводы

Проведенные исследование выявили, что во многих существующих на сегодняшний день как коммерческих, так и исследовательских программных продуктах отсутствуют элементы, учитывающие влияние переходных процессов на теплообмен при транспортировке газа по газопроводу с окружающим грунтом или водой. В случае, когда такой расчет является критически важным, например, в условиях прокладки газопровода по территориям вечно мерзлых грунтов, такие неточности могут привести к неверному расчету при подборе средств термической стабилизации грунта или толщины и типа тепловой изоляции газопровода. Применение поправочного коэффициента, как предлагается в представленной работе может стать простым решением, которое позволит повысить надежность проектируемой системы. Однако, очевидно, что такой подход приведет к увеличению капитальных затрат на этапе строительства и, соответственно, неэффективному использованию средств. Поэтому важное значение имеет продолжение исследований по обозначенной тематике с применением современных средств вычислительной техники и усовершенствования существующих программных комплексов.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Helgaker J.F. Modelling Transient Flow in Long distance Offshore Natural Gas Pipelines. PhD Thesis Trondheim: Norwegian University of Science and Technology; 2013.
2. Nicholas E. The impact of the pipe and ground on pipeline temperature transients. Proceedings Pipeline Simulation Interest Group, Galveston, 2011.
3. Сухарев М.Г., Косова К.О. Идентификация параметров в моделях систем газоснабжения (метод и вычислительный эксперимент) // Тр. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2014. – №3 (276). – С. 60–68.
4. Chaczykowski, M. Transient flow in natural gas pipeline. The effect of pipeline thermal model. Appl. Math. Model. 2010, 34, 1051–1067.
5. Zlotnik, A.; Chertkov, M.; Backhaus, S. Optimal control of transient flow in natural gas networks. In Proceedings of the 54th IEEE Conference on Decision and Control, Osaka, Japan, 15–18 December 2015.
6. Лурье, М.В. Особенности теплового расчета магистральных газопроводов с учетом инверсии эффекта Джоуля-Томпсона / М.В. Лурье, О.А. Пятакова // Газовая промышленность. – 2010. – №2. – С. 16–19.
7. Pambour, K.A.; Bolado-Lavin, R.; Dijkema, G.P.J. An integrated transient model for simulating the operation of natural gas transport systems. J. Nat. Gas Sci. Eng. 2016, 28, 672–690.
8. Данилушкин И.А., Гусева М.А. Численно-аналитическое моделирование систем с распределенными параметрами // Мехатроника, автоматизация, управление. – М.: Новые технологии, 2012. – № 8 (137). – С. 48–52.
9. Behrooz, H.; Boozarjomehry, R. Modeling and state estimation for gas transmission networks. J. Nat. Gas Sci. Eng. 2015, 22, 551–570.
10. Sundar, K.; Zlotnik, A. State and parameter estimation for natural gas pipeline networks using transient state data. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2018, 99, 1–15.

**Meshchuk Alexander Andreevich**

Far eastern federal university, Vladivostok, Russia  
E-mail: Meshchuk.aa@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: kpossod@mail.ru

**Bazhenov Pavel Aleksandrovich**

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

**Boldyrev Konstantin Alekseevich**

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

**Doroshenko Gennady Andreevich**

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

## Modeling the effect of transients on the work of the pipeline

**Abstract.** The article presents a study of heat transfer from the pipeline to the soil. The effect of simplifying the heat transfer model is investigated. In the course of the studies conducted using various configurations of the model being developed, stable, one-dimensional non-stationary and two-dimensional non-stationary models of the pipe wall and soil were studied. In the course of work, various solutions to the task were considered. A comparison was made of the possibility of solving the problem using analytical and numerical methods. When using numerical methods, various configurations of spatial and temporal discretization were tested depending on the purpose of the study. For a one-dimensional model, a scheme of concentric rings was proposed with a constant increase in their thickness as the distance from the pipeline was increased. For the two-dimensional model, the radial grid of splitting was considered optimal, which, as the distance from the pipeline goes, becomes perpendicular. This allowed us to achieve a high accuracy of calculation while maintaining the balance with the processing time of the simulation results. Also during the work various conditions for the entry of the stream into the pipeline were considered. The effects of rapid changes in gas mass flow and inlet temperature are investigated. These conditions are often found in large-diameter pipelines designed for gas exports. In such systems, marine and deep areas along the pipeline route are often found. Therefore, these studies will be relevant to optimize the operation of various types of gas pipelines. The paper also carried out a comparative analysis of the data obtained with the data on the industrial operation of the export gas pipeline.

**Keywords:** gas pipeline modeling; transients; numerical methods; temporal discretization; spatial discretization; analytical methods; temperature change; flow change; thermal stabilization of the soil; thawing of the soil; thermal insulation of the gas pipeline