

*На правах рукописи*

**Фетисов Вадим**



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА  
ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ ГАЗОПРОВОДАМ  
С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ**

*Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ*

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2019**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

*Научный руководитель –*

доктор технических наук, доцент

*Николаев Александр Константинович*

*Официальные оппоненты:*

*Поляков Вадим Алексеевич*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», кафедра «Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов», профессор

*Земенкова Мария Юрьевна*

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», кафедра «Транспорт углеводородных ресурсов», доцент

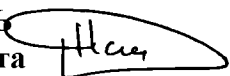
*Ведущая организация –* федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Защита состоится 06 июня 2019 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.13 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 05 апреля 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ТАНАНЫХИН  
Дмитрий Сергеевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследований**

Результаты исследований в работе носят научно-прикладной характер, направленный на повышение эффективности эксплуатации газотранспортного комплекса в соответствии со стратегией развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. № 2914-р).

Безотказная работа магистральных газопроводов в заданном гидравлическом режиме требует согласованности действий всех элементов системы, особенно, при возникновении внештатной ситуации. Резкое увеличение или уменьшение отбора газа приводит к неустойчивости его течения. К аналогичным последствиям также приводят уменьшение или увеличение подкачки газа, внезапное включение или выключение газоперекачивающих агрегатов.

Значительная часть магистральных газопроводов работает при нестационарном и неизотермическом течении газа. Это необходимо учитывать при выборе режима перекачки при котором не нарушается установившейся поток.

Предотвращение аварийных ситуаций на магистральных газопроводах, вызванных внештатными ситуациями, является одной из первоочередных задач при проектировании, потому что она связана с повышением эффективности работы эксплуатации газотранспортной системы. Исследование газотранспортной системы с целью увеличения энергоэффективности представляет актуальную научно-техническую задачу.

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является повышение эффективности транспорта газа в условиях нестационарности за счет обеспечения рациональных режимов.

### **Основные задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать литературные источники и патентные материалы.

2. Исследовать стационарные и нестационарные режимы движения газа в магистральных газопроводах с помощью компьютерного моделирования при различных режимах их работы.

3. Разработать математическую модель и алгоритм расчета, описывающих нестационарный режим движения газа в магистральном газопроводе.

4. Разработать научно-обоснованные рекомендации и алгоритм расчета нестационарных режимов транспортирования газа в системе «трубопровод-компрессорная станция».

#### **Идея работы**

Заключается в том, что разработка технических решений, направленных на повышение эффективности эксплуатации газотранспортной системы «трубопровод-компрессорная станция», ведется на основе математического моделирования работы магистральных газопроводов с учетом нестационарных режимов движения природного газа.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработана математическая модель, описывающая нестационарные режимы движения природного газа и ее алгоритмы с помощью которых анализируются нестационарные режимы работы системы «трубопровод-компрессорная станция» с учетом отборов, подкачек газа, а также при аварийной остановке.

2. Полученное решение задачи идентификации по экспериментальным данным коэффициента гидравлического сопротивления и суммарного коэффициента теплообмена позволяет верифицировать расчет этих величин.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Решения при проектировании магистральных газопроводов принимаются с учетом математического моделирования нестационарности движения газа.

2. Пропускная способность магистрального газопровода при эксплуатации определяется отклонением давления на  $5\div 10\%$  от проектной величины и температурным режимом газа.

#### **Методика исследований**

Работа проводилась с использованием метода научного обобщения и анализа литературных источников и патентных материалов, позволяющих выявить направления совершенствования

методики расчета нестационарных режимов работы магистральных трубопроводов, предназначенных для транспортирования природного газа.

Анализ работы газотранспортной системы с учетом нестационарного режима моделируется с помощью компьютерной программы Mathematica и Ansys Fluent. Обработка экспериментальных данных производилась методами математической статистики. Влияние отдельных факторов на исследуемые параметры и связи между ними определялись с помощью корреляционного анализа.

#### **Достоверность научных положений**

Достоверность научных положений подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований, а сходимость их равна 95%.

#### **Практическая значимость**

Разработана методика расчета возникновения нестационарности на основе моделирования режимов транспортирования природного газа и алгоритм системы «трубопровод-компрессорная станция».

#### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на семинарах и конференциях, посвященных проблемам развития газовой промышленности, в том числе на: XII Международной научно-практической конференции «Достижения и проблемы современной науки» (Санкт-Петербург, 2017г.); XIII Международной научно-практической конференции «Достижения и проблемы современной науки» (Санкт-Петербург, 2017г.); Региональном конкурсе аспирантских работ в рамках Международной нефтегазовой конференции (Москва 2017г.); Международной научно-практической конференции «Развитие энергоэффективности» (Дрезден, Германия, 2018 г.); заседаниях научно-технического совета ООО «Уфимский Научно-Технический Центр» по вопросу состояния и перспектив применения новых технических решений при ремонте, реконструкции и строительстве линейной части магистральных газопроводов и газораспределительных станций (Уфа, 2018-2019 гг.)

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 1 статья в издании, входящем в перечень ВАК Минобрнауки России, 5 статей в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад соискателя**

Разработана методика математического моделирования термогазодинамических процессов для проведения статистической идентификации погрешности параметров давления и температуры в процессе эксплуатации газопровода для эффективного контроля за его состоянием.

Исследованы закономерности протекания нестационарных процессов в магистральных газопроводах, вызванные непроектными режимами работы. Созданы математические модели нестационарных режимов в системе «трубопровод-компрессорная станция», предложена методика и алгоритмы ее реализации.

### **Реализация результатов работы**

Научные и практические результаты работы могут быть использованы в учебном процессе Санкт-Петербургского горного университета для изучения студентами дисциплин по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (уровень бакалавриата) и 21.04.01 «Нефтегазовое дело» (уровень магистратуры).

### **Объем работы**

Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста, состоит из введения, 4-х глав, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 124 источников, перечня условных обозначений и 7 приложений, содержит 18 рисунков и 4 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, научные положения, выносимые на защиту, а также приведены научная новизна и практическая значимость работы.

*В первой главе* выполнен анализ литературных источников и патентных материалов.

Анализ нестационарных режимов связан с зависимостью переменных от времени и пространства, в отличие от стационарных.

Для моделирования одномерных нестационарных потоков в газопроводах необходимо одновременно решать уравнение неразрывности, импульса и энергии, что позволяет создать систему нелинейных уравнений с частными производными, которые достаточно сложные и громоздкие. Сегодня существует немало традиционных численных методов для имитации одномерного нестационарного потока, в том числе метода характеристик, явных и неявных конечно-разностных схем, метода конечных объемов и др. Вопросами и задачами по транспорту газа по трубам и моделированию трубопроводных систем посвящено огромное количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых, таких как: В.Л. Стритер, Г.Н. Абрамович, А.Н. Папуша, Н.П. Бусленко, А.В. Акимов, К.П. Станюкович, А.А. Александров, И.А. Чарный, В.А. Акатьева, Н.Н. Брущлинский, С.К. Годунов, А.Г. Гумеров, А.Н. Елохин, И. Никурадзе, С. Кутателадзе, Р.Х. Идрисов, М.В. Лурье, С.А. Сарданашвили, В.И. Ларионов, М.В. Лисанов, Н.А. Махутов, А.С. Печоркин, С.П. Суцев, А.А. Швыряев, А. Дж. Рейнольдс, А.Д. Альтшуль, Е.В. Вилли, Л. Дж. Левеки, Дж. Речфорд и др.

Лидером в области моделирования в нефтегазовой отрасли является норвежский программный комплекс «OLGA», разработанный компанией «SPT Group» (Норвегия). Данный программный комплекс предназначен для моделирования установившихся и неуставившихся течений многофазных потоков в скважинах и трубопроводах, используется инженерами во многих странах мира при моделировании и анализе работы нефтегазопроводов.

Существует также ряд других программ по моделированию процессов, такие как: «Ansys CFX», «АСТРА», «Star-CD», «CorNet», «Amadeus».

Модели нестационарного потока изотермические или неизотермические, базируются на вычислении сложных дифференциальных уравнений с частными производными.

В работах большинства авторов рассматриваются метод характеристик и неявный метод для численного решения дифференциальных уравнений нестационарного потока газа. Неявный метод применяется при коротких амплитудах для увеличения шага времени, а метод характеристик для эффективного разделения системы и уменьшения количества нелинейных уравнений для оптимального вычисления.

В мировой практике уделяется внимание применению класса числовых методов Рунге-Кутты-Чебышева и указывается на их расширенную область стабильности. С другой стороны, новая методика расчета позволяет получить систему нелинейных дифференциальных уравнений, которые можно решать методом Рунге-Кутты-Фельберга.

На основе анализа литературных источников по вопросам математического моделирования нестационарных процессов в газопроводах и методов реализации их решения установлено, что данный вопрос, в связи с его сложностью, недостаточно изучен и требует дополнения новыми расчетами, что позволило сформулировать и конкретизировать цель и задачи исследований.

*Во второй главе* проведено исследование и сделан анализ, газодинамических процессов в системе «трубопровод-компрессорная станция», а также методов реализации математических моделей, которые описывают ее работу.

При описании процессов транспортирования природного газа, задачи гидродинамики и теплообмена рассматривались отдельно. Однако анализ некоторых работ показывает, что изменение скорости потока газа по течению и вдоль газопровода влияют на характер и интенсивность теплообмена газопровода с окружающей средой. В свою очередь, изменение температурных напряжений в окружающей среде приводит не только к новому распределению скоростей, но и к



изменению режима течения газа. Поэтому задача моделирования процессов движения газа в газопроводе должна включать как гидравлические, так и термодинамические уравнения, связанные в единую систему.

Процесс перекачки газа по газопроводу описываются системой дифференциальных уравнений с частными производными отражающие основные физические законы состояния газа. В них входят:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho W_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho W_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W_z)}{\partial z} = 0 ; \quad (1)$$

где  $W_x, W_y, W_z$  – скорость газа по осям  $x, y, z$ , м/с.

в векторной форме

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} + \operatorname{div} \bar{W} = 0 ; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\frac{D_t}{\partial \tau} = \frac{\operatorname{div} \bar{q}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{dP}{d\tau} + \frac{\Phi_1}{\rho} + \frac{q_v}{\rho} = 0 ; \quad (3)$$

уравнение состояния

$$f(P, \rho, T_2) = 0. \quad (4)$$

В полуэмпирических теориях используют некоторые дополнительные связи между характеристиками турбулентной структуры, найденные опытным путем или взятые в форме предположений к принятию модели течения газа.

Для расчета нестационарного режима транспортирования природного газа по системе «трубопровод-компрессорная станция», необходимо сначала определить начальные распределения температуры, давления, плотности и массового расхода. Для этого нужно решить соответствующую задачу по работе газопровода в стационарном режиме.

Следует отметить, что в литературе, практически отсутствуют рекомендации по выбору метода решения подобных уравнений.

В работе представлен метод расчета нестационарного режима работы сухопутного газопровода, описывающего процессы на основе явной схемы уменьшения полной вариации Хартена со вторым порядком приближения.

Система одномерных нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка для нестационарного потока природного газа в сухопутных трубопроводах имеет следующий вид

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial x} m = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} m + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m^2}{\rho} + c^2 \rho \right) = - \frac{f_g m |m|}{2D\rho}; \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – массовый поток газа, кг/с · м<sup>2</sup>;  $c$  – изотермическая скорость звука, м/с;  $f_g$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $D$  – внутренний диаметр трубопровода, м.

Уравнения (5) и (6) можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{U} + \frac{\partial}{\partial x} \vec{F}(\vec{U}) = \vec{r}(\vec{U}); \quad (7)$$

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} \rho \\ m \end{bmatrix}, \vec{F} \begin{bmatrix} m \\ \frac{m^2}{\rho} + c^2 \rho \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\vec{r}(\vec{U}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{f_g m |m|}{2D\rho} \end{bmatrix};$$

где  $\vec{U}$  – переменная вектора состояния;  $\vec{F}$  – вектор потока.

Уравнение (7) является гиперболической моделью, описывающей нестационарные процессы в сухопутных газопроводах. Решение уравнения (7) получается из распределения переменных определенного исходного поля, то есть по распределению плотности газа  $\rho$  и вектора массового расхода  $m = \rho u$  вдоль газопровода. При отсутствии реальных данных о

распределении значений выходного поля предполагается, что начальные условия формируют значения переменных при стационарном режиме.

После некоторых преобразований явная схема уменьшения полной вариации второго порядка для гиперболической модели будет иметь вид:

$$\rho_j^{n+1} = \rho_j^n - \frac{\lambda}{2}(m_{j+1}^n - m_{j-1}^n) + \frac{1}{2}, \quad (9)$$

где  $j = 2, 3, \dots, nj - 2$ ;

$$m_j^{n+1} = m_j^n - \frac{\lambda}{2} \left\{ \left[ \frac{(m_{j+1}^n)^2}{\rho_{j+1}^n} + c^2 \rho_{j+1}^n \right] - \left[ \frac{(m_{j-1}^n)^2}{\rho_{j-1}^n} - c^2 \rho_{j-1}^n \right] \right\} + \frac{1}{2} \left\{ \left\{ \beta_{j+\frac{1}{2}}^1 [\bar{u}(v_{j+\frac{1}{2}}) - c] \right\} + \beta_{j+\frac{1}{2}}^2 [\bar{u}(v_{j+\frac{1}{2}}) + c] \right\} - \left\{ \beta_{j-1/2}^1 [\bar{u}(v_{j-1/2}) + c] \right\} - \beta_{j-1/2}^2 [\bar{u}(v_{j-1/2}) + c] - \beta_{j-1/2}^2 \right\}, \quad (10)$$

$$j = 2, 3, \dots, nj - 2.$$

Физические краевые условия задаются с целью учета большого разнообразия эксплуатационных условий.

Эти краевые условия необходимы для основных уравнений (9), (10) при решении поставленной задачи.

**В третьей главе** выполнены: экспериментальные исследования на Северо-Европейском газопроводе «Грязовец-Выборг», замыкающем сухопутную часть Северного газового коридора на участке КС «Елизаветинская» – КС «Портовая».

Математическое и компьютерное моделирование внештатной ситуаций с изменением параметров транспортируемого газа, при которых возникают переходные процессы с изменением режима работы магистрального газопровода.

Изучение внештатной ситуации на действующем магистральном газопроводе невозможно по причине технической безопасности, поэтому наиболее приемлемым методом проведения исследований является математическое и компьютерное моделирование.

Для выполнения поставленных задач было применено моделирование газотранспортной системы и процессов, которые могут вызвать внештатные ситуации в ее работе.

В качестве объекта исследования был выбран участок газотранспортной системы с возможностью исследования нестационарных процессов, возникающих при внезапном закрытии запорной арматуры, аварийной утечке газа, появления отбора газа, подключения или отключения лупинга. При исследовании работы системы «трубопровод-компрессорная станция» в результате перекрытия линейного крана или отключения газоперекачивающего агрегата может возникнуть внештатная ситуация, которая негативно скажется на работе всей системы «трубопровод-компрессорная станция». Исследование работы системы «трубопровод-компрессорная станция» проводилась с помощью моделирования схемы исследуемого газопровода (рисунок 1).

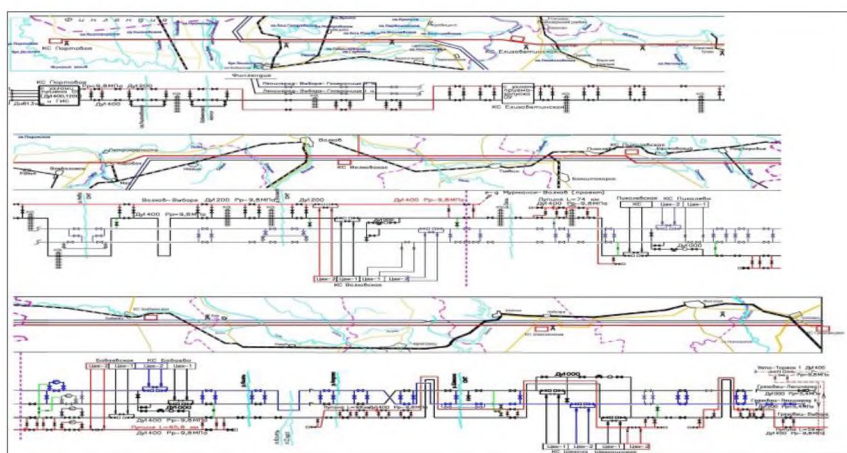


Рисунок 1 - Северо-Европейский газопровод «Грязовец-Выборг»

В течение 14 часов работы, природный газ транспортируется с постоянным расходом. Между 15-16 минутами заданного времени работы компрессорной станции произошла остановка одного из газоперекачивающих агрегатов, происходит понижение давления, в

результате чего происходит изменение режима работы системы (рисунок 2).

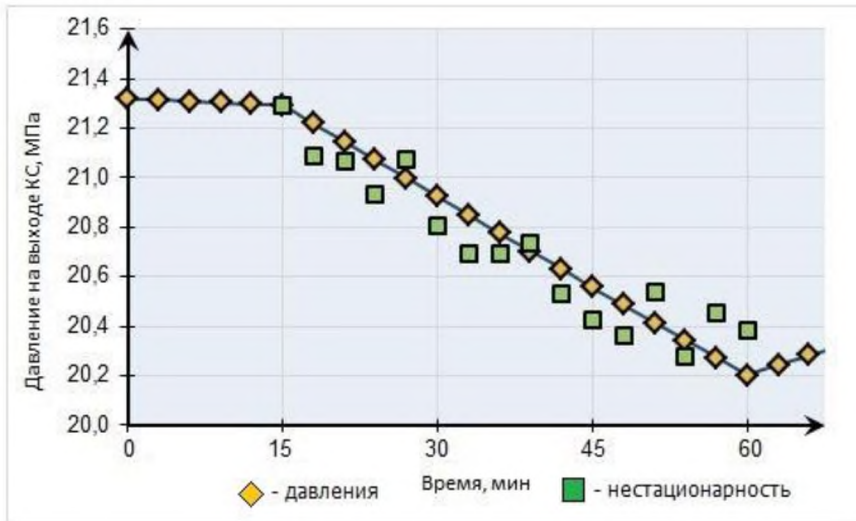


Рисунок 2 – Возникновение нестационарности в работе КС «Портовая»

После остановки ГПА происходит снижение давления в газопроводе, что требует выполнение мероприятий с целью недопуска переходного режима работы компрессорной станции.

Через 60 минут имитации переходного режима в работе компрессорной станции, работа системы восстанавливается путем открытия линейного крана и включения резервного ГПА.

На графике (рисунок 3) можно увидеть, что после отключения ГПА на компрессорной станции в газопроводе происходит нестационарный процесс с изменением параметра давления. После восстановления системы, работа газопровода нормализуется.

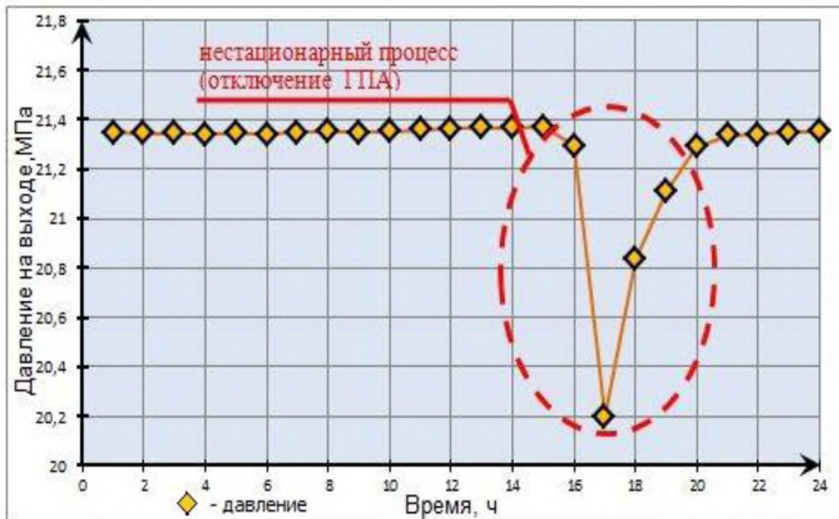


Рисунок 3 - Изменение параметра давления, при котором происходит нестационарный режим

При определении величины влияния изменения параметра давления, при котором происходит переходной режим, установлено, что возникшая внештатная ситуация на газопроводе обусловлена изменению режима работы системы вследствие внезапной остановки газоперекачивающего агрегата.

*В четвертой главе* разработаны рекомендации по управлению нестационарными режимами работы системы «трубопровод-компрессорная станция» в условиях повышенного давления. С целью апробации разработанных алгоритмов проведены экспериментальные исследования нестационарных режимов транспортирования природного газа с помощью аналитического и компьютерного моделирования на Северо-Европейском магистральном газопроводе «Грязовец-Выборг».

Система уравнений (1), (2), (3) являются дифференциальными уравнениями в частных производных законами неразрывности, сохранения импульса и энергии, при решении которых использовался метод С.К. Годунова.

Проведя преобразования для уравнения неразрывности, сохранения импульса и сохранения энергии, результат записывается в виде уравнений из системы (1), (2), (3):

$$((\rho v)_{j+1}^{i+1/2} - (\rho v)_j^{i+1/2})\Delta t + (\rho_{j+1/2}^{i+1} - \rho_{j+1/2}^i)\Delta x = 0 ; \quad (11)$$

$$((\rho v)_{j+1}^{i+1} - (\rho v)_{j+1/2}^i)\Delta x + ((\rho v^2 + P)_{j+1}^{i+1/2} - (\rho v^2)_j^{i+1/2})\Delta t + \\ + \left( \rho g \sin \alpha + \frac{1}{2d} \lambda \rho v |v| \right)_{j+1/2}^{i+1/2} \Delta x \Delta t = 0 ; \quad (12)$$

$$\left( \rho \varepsilon + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g H \right)_{j+1}^{i+1} \Delta x - \left( \rho \varepsilon + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g H \right)_{j+1/2}^i \Delta x + \\ + \left( \rho v \left( \frac{v^2}{2} + h + g H \right) \right)_{j+1}^{i+1/2} \Delta t - \left( \rho v \left( \frac{v^2}{2} + h + g H \right) \right)_j^{i+1/2} \Delta t + \\ + \left( \frac{1}{d} K (T - T_0) \right)_{j+1/2}^{i+1/2} \Delta x \Delta t = 0 . \quad (13)$$

Все полученные разностные уравнения являются аналогами физических законов сохранения. Таким образом, разностная схема, заданная уравнениями (11), (12) и (13), является консервативной разностной схемой.

Моделирование нестационарного режима работы газопровода сводится к решению системы дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка (1), (2), (3) при различной постановке нестационарных задач.

Дифференциальная задача уравнений (1), (2), (3) сводится к системе разностных уравнений (11), (12) и (13).

Алгоритм получения решения нестационарной системы уравнений формируются с решением системы уравнений для расхода газа:

$$\begin{cases} P_0 = P_H((i+1) \cdot dt) \\ f_1(G_j, P_j, G_{j+1}, P_{j+1}) = 0, j = 0 \div N-1 \\ f_2(G_j, P_j, G_{j+1}, P_{j+1}) = 0, j = 0 \div N-1 \\ G_N = G_k((i+1) \cdot dt) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} B_0 G_0 + C_0 G_1 = D_0 \\ A_j G_{j-1} + B_j G_j + C_j G_{j+1} = D_j, j = 1 \div N - 1, \\ A_N G_{N-1} + B_N G_N = D_N \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_0 &= P_H(dt), \\ P_{j+1} &= \frac{f_1^j}{b_{12}^j} - \frac{a_{11}^j}{b_{12}^j} - G_j - \frac{a_{11}^j}{b_{12}^j} G_{j+1} - \frac{b_{11}^j}{b_{12}^j} P_j, \\ j &= 0 \div N - 1. \end{aligned} \quad (16)$$

Апробация математической модели осуществлялась с помощью имитационной модели Северо-Европейского магистрального газопровода «Грязовец-Выборг», замыкающего сухопутную часть Северного газового коридора на участке КС «Елизаветинская» – КС «Портовая» (рисунок 4).

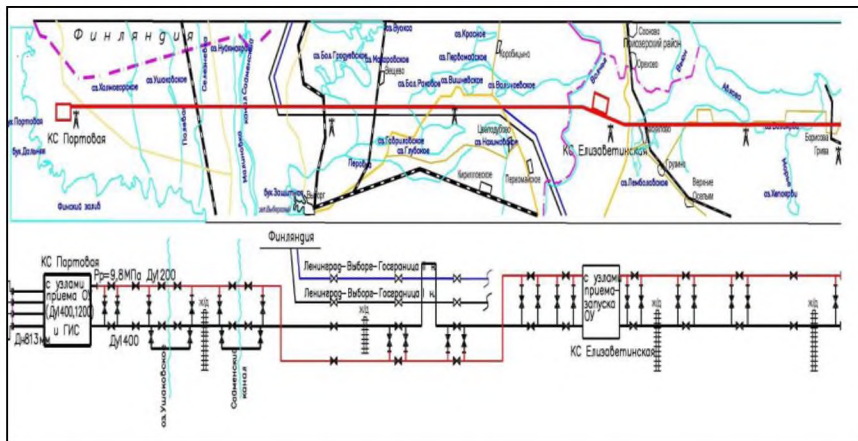


Рисунок 4 - Схема исследуемых участков газопровода

Выполнялось моделирование внештатной ситуации. В результате перегрева масла в системе произошла остановка одного из газоперекачивающих агрегатов, происходит понижение давления, в результате чего происходит изменение режима работы газопровода.



Математическое моделирование нестационарного режима осуществлялось с помощью дополненной и изложенной в данной работе методике расчета нестационарного движения газа.

Фактические данные работы системы «трубопровод-компрессорная станция» позволили установить граничные условия и сопоставить их с результатами моделирования.

По результатам моделирования с помощью разработанной методике на графике (рисунок 5) можно увидеть изменения давления газа на выходе из компрессорной станции, которое влияет на появление нестационарности в работе и сопоставить эти данные с фактическими данными работы КС «Портовая» график (рисунок 6).

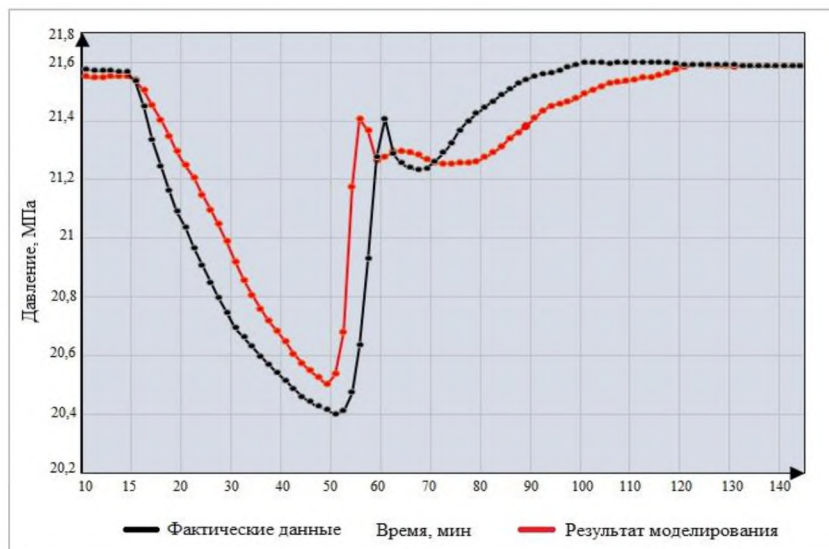


Рисунок 5 – Изменение давления в работе компрессорной станции

В результате исследований было доказано, что для стабильности работы системы «трубопровод-компрессорная станция» отклонения в параметрах транспортируемого газа не должны превышать 5-10 % от проектной величины.

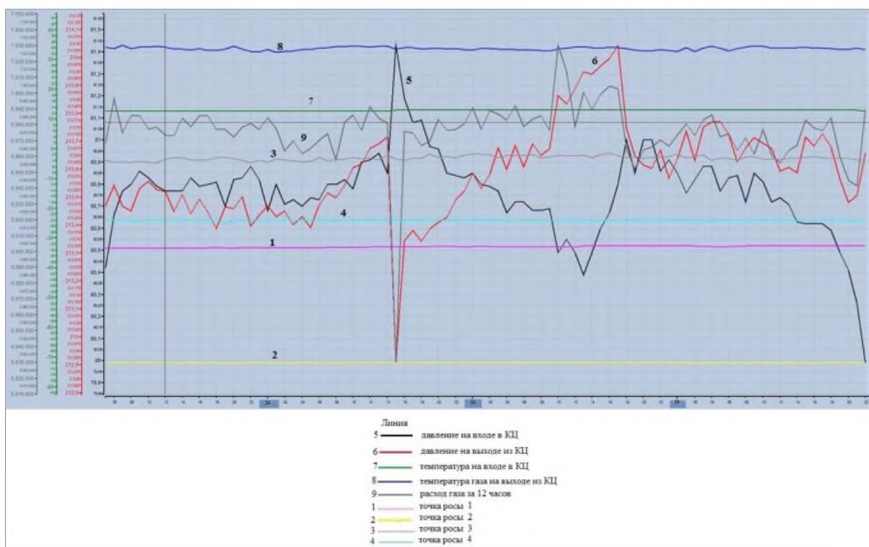


Рисунок 6 – Фактические данные работы КС «Портовая»

- 1 – точка росы по данным замера в т.1; 2 – точка росы по данным замера в т.2;  
 3 – точка росы по данным замера в т.3; 4 – точка росы по данным замера в т.4;  
 5 – давление на входе в КЦ; 6 – давление на выходе из КС;  
 7 – температура на входе в КС; 8 – температура на выходе из КС; 9 – расход газа.

Согласно этим данным, можно утверждать, что обеспечивается высокая сходимость результатов, а также, что предложенная модель расчета адекватно описывает сложные нестационарные процессы в газопроводе. Среднее относительное отклонение между результатами моделирования и фактическими данными составляет 5 %.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ литературных и патентных исследований.
2. Создана математическая модель, которая позволяет рассчитывать возникновение нестационарности при отключении одного из газоперекачивающих агрегатов.
3. Выполнено сопоставление результатов компьютерного моделирования нестационарных режимов транспортирования природного газа с опытными данными диспетчерской службы КС «Портовая», отклонение составило 5%.
4. Для стабильности работы системы «трубопровод-компрессорная станция» отклонения в параметрах транспортируемого газа не должны превышать 5-10% от проектной величины.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России*

1. Николаев А.К., Фетисов В.Г., Лыков Ю.В. Экспериментальные исследования определения расхода газа при аварийной утечке на линейном участке газопровода//Научно-технический журнал «Трубопроводный транспорт: теория и практика». – М. –2017. №2 (60) С. 14-18.

### *В изданиях, входящих в международную базу Scopus*

2. Fetisov V.G., Nikolaev A.K., Lykov U.V. Experimental studies for determining gas flow rate accidental release on the linear part of the pipeline// IOP: Earth and Environmental Science (EES No. 87), 2017. – Режим доступа: <http://doi.org/10.1088/1755-1315/87/6/062003>

3. Nikolaev A.K., Dokoukin V.P., Lykov Y.V., Fetisov V.G. Research of processes in horizontal pipeline//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327, 2018. – Режим доступа: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/327/3/032041>

4. Fetisov V.G., Nikolaev A.K., Lykov Y.V., Duchnevich L.N. Mathematical modeling of non-stationary gas flow in gas pipeline//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327, 2018. – Режим доступа: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022034>

5. Nikolaev A.K., Samigullin G.H., Samigullina L.G., Fetisov V.G. Non-stationary operation of gas pipeline based on selections of travel//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Режим доступа: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022074>

6. Fetisov V.G., Nikolaev A.K., Lykov Y.V. Aggregative simulation method for implementing mathematical models for gas transmission systems//IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Режим доступа: <http://doi.org/10.1088/1757-899X/327/2/022033>

#### ***Патенты***

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ «Расчет нестационарного режима эксплуатации газопровода» / Фетисов В.Г., Николаев А.К., Лыков Ю.В.; ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», бюллетень № 2017616346, дата публикации 17.06.2017.