И.Ф. Чупров, В.В. Секутов, М.С. Пармузина (Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Российская Федерация)

ДИНАМИКА ДАВЛЕНИЯ ГАЗА В ГАЗОПРОВОДЕ С ПУТЕВЫМ ОТБОРОМ И ПОДКАЧКОЙ

Ilia F. Chuprov, Vladimir V. Sekutov, Maria S. Parmuzina (Ukhta State Technical University, Ukhta, Russian Federation)

DYNAMICS OF GAS PRESSURE IN A GAS PIPELINE WITH A IN-LINE SAMPLING AND PUMPING

Введение

Началом большого числа работ по исследованию неустановившегося движения жидкости в трубах была классическая работа Н.Е. Жуковского о гидравлическом ударе.

Широкий размах строительства трубопроводов высокого давления для транспорта нефти, нефтепродуктов и газа предъявляют особые требования к качеству строительства и обеспечению надежности.

Математическое моделирование неустановившегося движения жидкости или газа необходимо для решения задач, возникающих при проектировании и эксплуатации. Таковыми могут быть вопросы состояния трубопроводов, оптимизации режимов и другие. Трубопроводные системы имеют иерархическую структуру управления, поэтому необходимо иметь математическое описание отдельных элементов и звеньев.

Цели и задачи

Сформулировать и решить задачу о динамике поля давления на участке газопровода, имеющего сосредоточенные отбор и подкачку.

Background

The beginning of a large number of works on the study of unsteady fluid motion in pipes was the classic work of N.E. Zhukovsky on hydraulic shock.

The wide scope of construction of high-pressure pipelines for the transport of oil, petroleum products and gas places special requirements on the quality of their construction and ensuring reliability.

Mathematical modeling of the unsteady motion of a liquid or gas is necessary for solving problems that arise during design and operation. Such issues may include the state of pipelines, optimization of modes, and others. Pipeline systems have a hierarchical management structure, so it is necessary to have a mathematical description of the individual elements and links.

Aims and Objectives

Formulate and solve the problem of the dynamics of the pressure field in a section of a gas pipeline with concentrated in-line sampling and pumping.

Результаты

Математическая модель динамики давления в газопроводе получена на основе линеаризованной системы уравнений И.А. Чарного. Она представляет уравнение в частных производных гиперболического типа. Модель учитывает инерционные свойства и сопротивление среды, а также точечный отбор и подкачку.

Получено решение уравнения при граничных условиях первого рода.

Рассмотрены частные случаи решения. Проведены расчеты при реальных параметрах для случая отбор-подкачка в заданных точках и без таковых.

Результаты расчета показали, что динамику давления в основном определяют граничные условия и величины отбора и подкачки.

Results

The mathematical model of the pressure dynamics in the gas pipeline is obtained on the basis of the linearized system of equations of I.A. Charny. It represents a hyperbolic partial differential equation. The model takes into account the inertial properties and resistance of the medium, as well as spot in-line sampling and pumping.

A solution to the equation is obtained under boundary conditions of the first kind.

Particular cases of the solution are considered. Calculations are carried out with real parameters for the case of in-line sampling - pumping at the given points and without them.

The calculation results showed that the pressure dynamics are mainly determined by the boundary conditions and the values of in-line sampling and pumping.

Ключевые слова: движение жидкости в трубах; математическая модель; неустановившееся движение газа; уравнение гиперболического типа; функция Дирака; точечный отбор; суммирование рядов

Keywords: fluid motion in pipes; mathematical model; unsteady gas flow; hyperbolic equation; Dirac function; spot in-line sampling; sum of series

Внутреннее давление является одним из основных силовых воздействий, влияющих на прочность магистрального газопровода. На его основе определяется толщина стенки трубопровода, производится проверка на прочность, выбирается оборудование для осуществления надежного транспорта газа. Внутреннее давление в магистральных газопроводах уменьшается по мере отдаления от компрессорной станции, это связано с потерями на преодоление гидравлического сопротивления и местных сопротивлений [1-5].

Трубопроводные сети представляют собой сложные и дорогостоящие инженерные сооружения. Поэтому уже на стадии проектирования необходимо выполнить многовари-

антные исследования гидравлических, газодинамических и тепловых процессов для установившихся и неустановившихся режимов.

Математическое моделирование неустановившегося движения газа в трубопроводах необходимо для решения вопросов, возникающих при их эксплуатации. Здесь актуальными будут вопросы контроля состояния трубопровода и оптимизации режимов работы.

В статье рассматривается *одномерное изотермическое течение газа с постоянными физическими параметрами*.

На рассматриваемом участке газопровода имеются точки сосредоточенного отбора и подкачки.

Исходной служит система нелинейных уравнений в частных производных, полученная И.А. Чарным на основе законов сохранения массы, энергии и количества движения.

Нестационарное движение жидкости в круглых трубах [6], описываемое уравнениями движения (первое уравнение системы (1)) и неразрывности потока после линеаризации принимает вид

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} + 2aQ, \\ -\frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x}, \end{cases} \quad (1)$$

где $P(x, t)$ - давление в газопроводе;

Q - массовая скорость ($Q = \rho V$);

$$2a = \left(\frac{\lambda V}{8\gamma} \right)_{cp};$$

V - скорость газа в трубопроводе;

λ - коэффициент гидравлического сопротивления;

ρ - плотность,

γ - гидравлический радиус;

t - время;

c - скорость распространения звуковой волны в транспортируемой среде.

Рассмотрим участок газопровода длиной L . Пусть на этом участке в точке x_1 производится отбор с массовым расходом G_1 , а в точке x_2 подкачка с расходом G_2 .

В этом случае газопровод будет сложным (рисунок 1).

Учитывая эти факторы [7-10], получим изменение уравнения неразрывности (второе уравнение системы (1)), и система (1) примет вид:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} + 2aQ, \\ -\frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{G_1}{F} \delta(x - x_1) + \frac{G_2}{F} \delta(x - x_2), \end{cases} \quad (2)$$

где $\delta(x)$ - функция Дирака;

x - координата;

F - площадь поперечного сечения трубы.

В уравнении неразрывности в точках x_1 и x_2 имеются соответственно массовый отбор и подкачка газа (рисунок 1).

Рисунок 1. Схематичное изображение сложного газопровода с отбором и подкачкой

Систему (2) можно представить в виде одного уравнения:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{2a}{F} G_1 \delta(x - x_1) - \frac{2a}{F} G_2 \delta(x - x_2). \quad (3)$$

Основными факторами противодействию потока являются инерция жидкости и трение о стенки трубопровода. Инерционное свойство является причиной возникновения волнового характера движения и описывается первым слагаемым правой части уравнения (3). Второе слагаемое приводит к противодействию движения газа и возникновению плавного режима течения.

Для решения поставленной задачи необходимо задать краевые условия.

Граничные условия

$$P_{x=0} = P_H = const; P_{x=L} = P_K = const. \quad (4)$$

Начальные условия

$$P_{t=0} = P_0 = const; \left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (5)$$

Для решения уравнения (3) при условиях (4) и (5) применим метод преобразования Фурье на отрезке $[0; L]$ [11].

В данном случае прямое преобразование имеет вид:

$$P_n(t) = \frac{2}{L} \int_0^L P_n(t) \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x \partial x. \quad (6)$$

Обратное преобразование выглядит следующим образом:

$$P(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n(t) \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x. \quad (7)$$

Умножив все члены уравнения (3) на ядро преобразования $\frac{2}{L} \sin \frac{n\pi}{L} x$ и проинтегрировав на отрезке $[0; L]$, получим его образ

$$\begin{aligned} \frac{d^2 P_n(t)}{dt^2} + 2a \frac{dP_n(t)}{dt} + \left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2 \cdot P_n(t) = \frac{2c^2 n\pi}{L^2} ((-1)^{n+1} P_K + P_H) + \\ + \frac{4ac^2 G_1}{FL} \sin \frac{n\pi}{L} x_1 - \frac{4ac^2 G_2}{FL} \sin \frac{n\pi}{L} x_2. \end{aligned} \quad (8)$$

При начальных условиях:

$$P_n(0) = \frac{2P_0}{n\pi} (1 - (-1)^n); \quad \left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{t=0} = 0. \quad (9)$$

Уравнение (8) есть линейное неоднородное с постоянными коэффициентами. Решаем однородное уравнение:

$$\frac{d^2 P_n(t)}{dt^2} + 2a \frac{dP_n(t)}{dt} + \left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2 \cdot P_n(t) = 0. \quad (10)$$

Характеристическое уравнение

$$\begin{aligned} r^2 + 2ar + \left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2 = 0, \\ r_{1,2} = -a \pm \sqrt{a^2 - \left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2} = -a \pm \sqrt{\left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2 - a^2} \cdot i. \end{aligned}$$

Для всех практически интересных случаев $a \ll \frac{cn\pi}{L}$.

Обозначим $\sqrt{\left(\frac{cn\pi}{L} \right)^2 - a^2} \approx \frac{cn\pi}{L} \approx \beta_n$.

Решение однородного уравнения (10) имеет вид:

$$P_n^{(o)}(t) = e^{-at} (A_1 \cos \beta_n t + A_2 \sin \beta_n t). \quad (11)$$

Частное решение уравнения (8):

$$P_n^{(y)}(t) = \frac{2}{n\pi} ((-1)^{n+1} P_K + P_H) + \\ + \frac{4aL}{Fn^2\pi^2} G_1 \sin \frac{n\pi}{L} x_1 - \frac{4aL}{Fn^2\pi^2} G_2 \sin \frac{n\pi}{L} x_2. \quad (12)$$

Общее решение уравнения (8) будет иметь вид $P_n(t) = P_n^{(o)} + P_n^{(y)}$.

Подчинив решение $P_n(t)$ условиям (9) и выполнив обратное преобразование (7), получим

$$P(x,t) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} P_K + P_H}{n} \sin \frac{n\pi}{L} x + e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{cn\pi}{L} \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x + \\ + \frac{4aLG_1}{F\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L} x_1 \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x - \frac{4aLG_2}{F\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi}{L} x_2 \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x, \quad (13) \\ \text{где } A_n = \frac{2P_0}{n\pi} (1 - (-1)^n) - \frac{2}{n\pi} ((-1)^{n+1} P_K + P_H) + \\ + \frac{4aL}{Fn^2\pi^2} (G_1 \sin \frac{n\pi}{L} x_1 - G_2 \sin \frac{n\pi}{L} x_2).$$

Суммируя в (13) некоторые ряды [12]

$$1) \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot P_K + P_H}{n} \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x, \\ 2) \frac{4aLG_1}{F\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{L} x_1 \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x = \frac{2a}{FL} G_1 \cdot \begin{cases} x_1(L-x) & \text{при } x > x_1, \\ x(L-x_1) & \text{при } x < x_1, \end{cases} \\ 3) \frac{4aLG_2}{F\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin \frac{n\pi}{L} x_2 \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x = \frac{2a}{FL} G_2 \cdot \begin{cases} x_2(L-x) & \text{при } x > x_2, \\ x(L-x_2) & \text{при } x < x_2, \end{cases}$$

получим решение поставленной задачи в окончательном виде:

$$P(x,t) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x + e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{cn\pi}{L} \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x - \\ - \frac{2a}{FL} G_1 \cdot \begin{cases} x_1(L-x) & \text{при } x > x_1, \\ x(L-x_1) & \text{при } x < x_1, \end{cases} + \frac{2a}{FL} G_2 \cdot \begin{cases} x_2(L-x) & \text{при } x > x_2, \\ x(L-x_2) & \text{при } x < x_2. \end{cases} \quad (14)$$

Качественный анализ полученного решения (14) поставленной задачи показывает, что в начальный период наблюдаются волновые процессы, определяемые синусом и косинусом под знаком ряда. Но волновые процессы быстро затухают, поскольку e^{-at} быстро убывающая функция при $a > 0, t > 0$. Параметр a положителен по физическому смыслу.

При больших t ($t \rightarrow \infty$) решение принимает вид:

$$P(x) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x - \frac{2a}{FL} \frac{2a}{FL} G_1 \cdot \begin{cases} x_1(L-x) & \text{при } x > x_1, \\ x(L-x_1) & \text{при } x < x_1, \end{cases} + \\ + \frac{2a}{FL} G_2 \cdot \begin{cases} x_2(L-x) & \text{при } x > x_2, \\ x(L-x_2) & \text{при } x < x_2. \end{cases} \quad (15)$$

В этом случае динамика давления определяется граничными условиями и темпами отбора-подкачки.

При отсутствии точек отбора-подкачки ($G_1 = G_2 = 0$) решение (14) будет [13]:

$$P(x,t) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x + e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos \frac{cn\pi}{L} \cdot \sin \frac{n\pi}{L} x, \quad (16) \\ \text{где } B_n = \frac{2P_0}{n\pi} (1 - (-1)^n) - \frac{2}{n\pi} ((-1)^{n+1} P_K + P_H).$$

Формулой (16) определяется динамика давления на участке простого трубопровода с учетом сил инерции и трения о стенки.

При $G_1 = G_2 = 0$ и $t \rightarrow \infty$ зависимости (15) и (16) принимают вид:

$$P(x) = P_H - \frac{P_H - P_K}{L} x. \quad (17)$$

В этом случае давление описывается линейной функцией координаты x , зависящей от граничных условий.

В качестве примера рассмотрим участок газопровода длиной $L = 90$ км при следующих числовых параметрах:

давление на выходе из компрессорной станции $P_H = 7,2$ МПа;

давление на входе в последующую компрессорную станцию $P_K = 5,38$ МПа;

внутренний диаметр трубопровода $d_{\text{вн}} = 690$ мм;

точка отбора газа $x_1 = 30$ км от начала отсчета с массовым расходом $G_1 = 0,015$ кг/с;

точка закачки газа $x_2 = 30$ км от начала отсчета с массовым расходом $G_2 = 0,01$ кг/с.

Итоговый анализ произведем при помощи графиков (рисунки 2, 3).

Расчеты по формуле (14) с учетом суммы ряда при большом времени и по упрощенной формуле (15) дают практически один и тот же результат. Разница давлений при этом составляет менее 0,1 атм, т.е. графики при заданных масштабных единицах совпадают. Отсюда следует, что на практике вполне достаточно пользоваться зависимостью (15).

Расчеты по формуле (16) с учетом суммы ряда и по упрощенной формуле (17) также не дают ощутимого различия в конечном результате, что позволяет производить расчет по зависимости (17).

Рисунок 2. Динамика давления в сложном газопроводе (расчеты по формулам (14) и (15))

Рисунок 3. Динамика давления в простом газопроводе (расчеты по формулам (16) и (17))

Выводы

1. Математическая модель динамики давления в газопроводе получена на основе линеаризованной системы уравнений И.А. Чарного. Она представляет уравнение в частных производных гиперболического типа. Модель учитывает инерционные свойства и сопротивление среды, а также точечный отбор и подкачку.

2. Получено решение уравнения при граничных условиях первого рода.

3. Рассмотрены частные случаи решения.

4. Результаты расчета показали, что динамику давления в основном определяют граничные условия и величины отбора и подкачки.

Список литературы

1. Джамалов А.Т., Дышин О.А., Габибов И.А. Оценка надежности магистрального газопровода // Газовая промышленность. 2008. № 6 (618). С. 44-46.
2. Салюков В.В., Самсонов Р.О., Харионовский В.В. Повышение надежности эксплуатации магистральных газопроводов // Наука и техника в газовой промышленности. 2006. № 2 (25). С. 2-7.
3. Дейнеко С.В. Методология исследования и оценки надежности системы магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 2010. № S13 (644). С. 89-92.
4. Теплинский Ю.А., Быков И.Ю. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. 395 с.
5. СТО Газпром 2-2.1-512-2010. Обеспечение системной надежности транспорта газа и стабильности поставок газа потребителям. М.: Газпром, 2011. 88 с.
6. Чарный И.А. Неустойчивое движение реальной жидкости в трубах. М.: Недра, 1975. 296 с.
7. Грачев В.В., Гусейнзаде М.А., Ксенз Б.И., Яковлев Е.И. Сложные трубопроводные системы. М.: Недра, 1982. 256 с.
8. Гусейнзаде М.А., Другина Л.И., Петрова О.Н., Степанова М.Ф. Гидродинамические процессы в сложных трубопроводных системах. М.: Недра, 1991. 168 с.
9. Гусейнзаде М.А., Юфин В.А. Неустойчивое движение нефти и газа в магистральных трубопроводах. М.: Недра, 1981. 232 с.
10. Бобровский С.А., Щербаков С.Г., Гусейнзаде М.А. Движение газа в газопроводах с путевым отбором. М.: Наука, 1972. 192 с.
11. Чупров И.Ф., Терентьева Е.А., Хозяинова М.С. Одномерное уравнение теплопроводности и некоторые аналитические методы решения. Ухта: УГТУ, 2019. 108 с.
12. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, рядов и произведений. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 1176 с.

References

1. Dzhamalov A.T., Dyshin O.A., Gabibov I.A. Otsenka nadezhnosti magistral'nogo gazoprovoda [Assessment of the Reliability of the Main Gas Pipeline]. *Gazovaya promyshlennost' - GAS Industry of Russia*, 2008, No. 6 (618), pp. 44-46. [in Russian].
2. Salyukov V.V., Samsonov R.O., Kharionovskii V.V. Povyshenie nadezhnosti ekspluatatsii magistral'nykh gazoprovodov [Improving the Reliability of Operation of Main Gas Pipelines]. *Nauka i tekhnika v gazovoi promyshlennosti - Science and Technology in the Gas Industry*, 2006, No. 2 (25), pp. 2-7. [in Russian].
3. Deineko S.V. Metodologiya issledovaniya i otsenki nadezhnosti sistemy magistral'nykh gazoprovodov [Methodology for Research and Assessment of the Reliability of the Gas Trunkline System]. *Gazovaya promyshlennost' - GAS Industry of Russia*, 2010, No. S13 (644), pp. 89-92. [in Russian].
4. Teplinskii Yu.A., Bykov I.Yu. Upravlenie ekspluatatsionnoi nadezhnost'yu magistral'nykh gazoprovodov [Managing the Operational Reliability of Main Gas Pipelines]. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2007. 395 p. [in Russian].
5. SТО Gazprom 2-2.1-512-2010. Obespechenie sistemnoi nadezhnosti transporta gaza i stabil'nosti postavok gaza potrebitelyam [STO Gazprom 2-2.1-512-2010. Ensuring the Systemic Reliability of Gas Transportation and the Stability of Gas Supplies to Consumers]. Moscow, Gazprom Publ., 2011. 88 p. [in Russian].
6. Charnyi I.A. Neustanovivsheesya dvizhenie real'noi zhidkosti v trubakh [Unsteady Motion of Real Liquid in Pipes]. Moscow, Nedra Publ., 1975. 296 p. [in Russian].
7. Grachev V.V., Guseinzade M.A., Ksenz B.I., Yakovlev E.I. Slozhnye truboprovodnye sistemy [Complex Piping Systems]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p. [in Russian].
8. Guseinzade M.A., Drugina L.I., Petrova O.N., Stepanova M.F. Gidrodinamicheskie protsessy v slozhnykh truboprovodnykh sistemakh [Hydrodynamic Processes in Complex Pipeline Systems]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 168 p. [in Russian].

13. Чупров И.Ф., Пармузина М.С. Динамика поля давления при изотермическом движении жидкости в трубах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Вып. 6 (128). С. 87-94. DOI: DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-6-87-94.

9. Guseinzade M.A., Yufin V.A. *Neustanovivsheesya dvizhenie nefiti i gaza v magistral'nykh truboprovodakh* [Unsteady Movement of Oil and Gas in Main Pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 232 p. [in Russian].

10. Bobrovskii S.A., Shcherbakov S.G., Guseinzade M.A. *Dvizhenie gaza v gazoprovodakh s putevym otborom* [Gas Movement in Gas Pipelines with Line Sampling]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 192 p. [in Russian].

11. Chuprov I.F., Terenteva E.A., Khozyainova M.S. *Odnomernoe uravnenie teploprovodnosti i nekotorye analiticheskie metody resheniya* [One-Dimensional Heat Equation and some Analytical Solution Methods]. Ukhta, UGTU Publ., 2019. 108 p. [in Russian].

12. Gradshtein I.S., Ryzhik I.M. *Tablitsy integralov, ryadov i proizvedenii* [Tables of Integrals, Series and Products]. St. Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 1176 p. [in Russian].

13. Chuprov I.F., Parmuzina M.S. Dinamika polya davleniya pri izotermicheskom dvizhenii zhidkosti v trubakh [Dynamics of the Pressure Field During Isothermal Fluid Movement in Pipes]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2020, Issue 6 (128), pp. 87-94. DOI: DOI: 10.17122/ntj-oil-2020-6-87-94. [in Russian].

Авторы

• Чупров Илья Федорович, д-р техн. наук, доцент
Ухтинский государственный технический университет
Профессор кафедры высшей математики
Российская Федерация, 169300, г. Ухта,
ул. Первомайская, 13
e-mail: ichuprov@ugtu.net

• Секутов Владимир Васильевич
Ухтинский государственный технический университет
Магистрант кафедры проектирования
и эксплуатации магистральных
газонефтепроводов
Российская Федерация, 169300, г. Ухта,
ул. Первомайская, 13
e-mail: sekutov.v@gmail.com

• Пармузина Мария Семеновна, канд. пед. наук
Ухтинский государственный технический университет
Доцент кафедры высшей математики
Российская Федерация, 169300, г. Ухта,
ул. Первомайская, 13
e-mail: mhozyainova@ugtu.net

The Authors

• Chuprov Ilia F., Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor
Ukhta State Technical University
Professor of Higher Mathematics Department
13, Pervomayskaya str., Ukhta, 169300,
Russian Federation
e-mail: ichuprov@ugtu.net

• Sekutov Vladimir V.
Ukhta State Technical University
Undergraduate Student of Design and Operation
of Trunk Gas and Oil Pipelines Department
13, Pervomayskaya str., Ukhta, 169300,
Russian Federation
e-mail: sekutov.v@gmail.com

• Parmuzina Maria S., Candidate of Pedagogical
Sciences
Ukhta State Technical University
Assistant Professor of Higher Mathematics
Department
13, Pervomayskaya str., Ukhta, 169300,
Russian Federation
e-mail: mhozyainova@ugtu.net