РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ОТВОДА ХОЛОДНОГО ГНУТЬЯ

DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF COLD BENDING OFFSET NUMERICAL MODEL

М. В. Закирьянов
Mars V. Zakiryanov

Б. С. Файзуллин
Bulat S. Faizullin

Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Г. Е. Коробков
Gennadiy E. Korobkov

А. П. Янчушка
Anna P. Yanchushka

Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Уфимский государственный нефтяной
технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Для профилирования трассы трубопровода при пересеченном рельефе местности используются упругий изгиб труб и кривые вставки (отводы), которые в большинстве случаев изготавливаются холодной гибкой труб. При расчетах на прочность и устойчивость участка газопровода с отводами холодного гнутья (ОХГ) необходимо принимать во внимание уровень остаточных напряжений и деформаций в стенке отвода.

Для анализа остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) ОХГ в эксплуатации в данной статье разработана обобщенная математическая (численная) модель ОХГ, а также проведена ее верификация на соответствие эмпирическим формулам и экспериментальным исследованиям.

Разработанная численная модель ОХГ позволяет определять характеристики НДС в зависимости от многих параметров, таких как диаметр, толщина стенки трубы, механические свойства стали, величина кривизны отвода и угол гибки. Также представлены аналитические зависимости, которые позволяют проводить первичную оценку остаточного НДС ОХГ без применения программной среды моделирования.

For profiling of the pipeline route at the crossed land relief the elastic bend of pipes and curve inserts (branches) which in most cases are made cold flexible pipes are used. When calculating on durability and stability of the section of the pipeline with cold bending offsets (CBO), it is necessary to take into consideration the level of residual stresses and deformations in a branch wall.

For the analysis of the residual stress-strain state (SSS) of CBO on stream, in this article the CBO generalized mathematical (numerical) model is developed and also verification on compliance to empirical formulas and the pilot studies is carried out.

Ключевые слова

газопровод, отвод,
остаточные напряжения,
пластическая деформация,
численная модель,
упругий изгиб

Key words

gas pipeline, cold bending offset,
residual stresses, plastic strain,
numerical model, elastic bend

The developed CBO numerical model allows to define characteristics of the SSS depending on many parameters, such as diameter, pipe wall thickness, mechanical characteristics of steel, tap curvature value and a bending angle. Analytical dependences which allow to carry out primary assessment of the residual SSS of CBO without application of the program environment of model operation are also presented.

Отводы холодного гнутья (ОХГ) изготавливают механизированным способом на специальных трубогибочных станках. Действующие технические условия [1] устанавливают правила приемки и методы контроля линейных размеров ОХГ: длина отвода, угол гибки, радиус гибки, овальность поперечного сечения, высота гофров. Приемку каждого отвода производят по показателям внешнего вида и по допускам линейных размеров.

Опыт эксплуатации линейной части магистральных газопроводов показывает, что для ОХГ, помимо дефектов, обычно выявляемых на прямолинейных и упругоизогнутых трубах, характерны стресс-коррозионные дефекты поперечного направления (пКРН) и гофры. Также, в отличие от прямолинейных и упругоизогнутых труб, для ОХГ характерны две зоны: упругопластическая и упругая. Причем первая из них характеризуется высокими остаточными напряжениями. В этой связи актуально определение остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) ОХГ и получение практических зависимостей для инженерного анализа.

Современные исследования вопросов технического состояния эксплуатируемых объектов показывают эффективность использования технологии Digital Twin (цифрового двойника), в рамках которой создается математическая модель единицы оборудования или технологического процесса [2–5]. Использование математических моделей на основе физических характеристик оборудования позволяет проводить его техническое обслуживание по фактическому состоянию.

Использование технологии цифровых двойников подразумевает наличие всех необходимых физических характеристик материала и параметров гибки для корректного моделирования процесса изготовления ОХГ и последующего анализа НДС при действующих эксплуатационных нагрузках. При этом точность характеристик НДС с цифрового двойника ОХГ будет напрямую зависеть от качества исходных данных. Для ОХГ, уже находящихся в эксплуатации, воссоздать точную цифровую копию практически невозможно,

ввиду отсутствия многих входных параметров для правильной постановки граничных условий в модели, например, таких как число гибов трубной заготовки, единичный угол гибки, шаг передвижки и т.д. Кроме этого, встречаются случаи отступления от технических условий на изготовление ОХГ, о чем могут свидетельствовать результаты шурфовых и внутритрубных обследований газопровода.

В связи с данными обстоятельствами в работе предлагается обобщенная численная модель отвода, которая, как представляется, характеризует остаточное НДС для широкого ряда типоразмеров отводов, изготовленных методом холодной гибки. Численная конечно-элементная модель отвода разработана в программной среде ANSYS в соответствии с теоретическими и экспериментальными исследованиями [2–6], а также требованиями [1].

Величина максимальных деформаций ε , возникающих в стенке деформируемой трубы от действия постоянного по длине изгибающего момента, при соблюдении гипотезы плоских сечений, зависит от наружного диаметра трубы D_n и минимального радиуса кривизны отвода $\rho_{\min}$, достигаемого в процессе гнутья [6]:

$$\varepsilon = \frac{D_n}{2\rho_{\min}}. \quad (1)$$

При напряжениях σ больше предела текучести (пропорциональности [7]) трубной стали σ_T в поперечном сечении изгибаемой трубы образуются зоны с пластической деформацией. При соблюдении гипотезы плоских сечений координата границы зоны текучести y_T будет равна [6]:

$$y_T = \frac{\sigma_T}{E} \cdot \rho_{\min}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости трубной стали, принимаемый равным $2,06 \cdot 10^{11}$ Па.

Для волокон поперечного сечения трубы будет справедливо выражение

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho_{\min}}, \quad (3)$$

где y — положение волокна трубы в системе xOy относительно нейтральной линии изгиба (рисунок 1).

а) расчетная схема; б) качественные эпюры напряжений

Рисунок 1. Схемы для определения остаточного НДС ОХГ

Для определения остаточных напряжений и деформаций воспользуемся теоремой о разгрузке А. А. Ильюшина [8]. В соответствии с ней устанавливается следующий порядок для определения остаточных напряжений и деформаций при разгрузке:

- 1) по уравнениям пластичности определяются напряжения и деформации, вызванные наибольшей нагрузкой;
- 2) по уравнениям упругости определяются напряжения и деформации, которые вызывает нагрузка, равная разности между наибольшей нагрузкой и нагрузкой, оставшейся после разгрузки (напряжения и деформации разгрузки);
- 3) из напряжений и деформаций, соответствующих наибольшей нагрузке, вычитают напряжения и деформации разгрузки. Полученные напряжения и деформации будут являться остаточными.

После освобождения трубы из захватов гибочного станка часть накопленной потенциальной энергии упругой деформации расходуется на некоторое «выпрямление» изогнутой трубы [2]. Минимальный радиус кривизны отвода будет характеризовать величину приложенной нагрузки на прямолинейную трубу. Остаточный радиус кривизны $\rho_{ост}$ принимается равным унифицированному радиусу гибки [1]. Тогда напряжения и деформации, соответствующие разгрузке, будут характеризоваться изменением величины кривизны $1/\rho_{разг}$ равной:

$$\frac{1}{\rho_{разг}} = \frac{1}{\rho_{мин}} - \frac{1}{\rho_{ост}}. \quad (4)$$

Соответствующие максимальные упругие напряжения разгрузки $\sigma_{разг}$ равны:

$$\sigma_{разг} = \frac{ED_{н}}{2\rho_{разг}} = \frac{ED_{н}}{2} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{мин}} - \frac{1}{\rho_{ост}} \right). \quad (5)$$

Для определения остаточного НДС принимается модель упругопластического деформирования стали с упрочнением (рисунок 2). Напряжения, соответствующие деформации ε за пределом упругости, равны [6]:

$$\sigma = \left(\varepsilon - \frac{\sigma_T}{E} \right) G_T + \sigma_T, \quad (6)$$

где G_T — модуль упрочнения в пластической области, вычисляемый по формуле (7).

Согласно [10], величина показателя степени упрочнения m для конструкционных металлов находится в пределах $0 \leq m \leq 0,3$. В свою очередь, величины G_T и m можно связать между собой следующим выражением [10]:

$$G_T = 0,35mE. \quad (7)$$

Для конструкционных сталей при деформациях до 5 % кривые деформирования при растяжении и сжатии имеют одинаковый вид [9].

Рисунок 2. Билинейная аппроксимация диаграммы деформирования стали

Показатель степени упрочнения m рассчитывается на основании [7, 10]:

$$m = 0,75 \cdot \frac{\lg \frac{S_f}{\sigma_{0,2}}}{\lg \left(\frac{1}{0,002 + \frac{\sigma_{0,2}}{E}} \cdot \ln \frac{100}{100 - \psi_f} \right)}, \quad (8)$$

где S_f — истинное сопротивление разрыву стали, вычисляемое по следующей зависимости:

$$S_f = \sigma_B \cdot \left[1 + 1,4 \cdot \left(\frac{\psi_f}{100} \right) \right]; \quad (9)$$

$\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести трубной стали, принимаемый по данным сертификата завода-изготовителя трубы;

ψ_f — относительное сужение образца из трубной стали при разрыве;

σ_B — предел временного сопротивления стали трубы, принимаемый по данным сертификата завода-изготовителя трубы.

Предел текучести (пропорциональности) согласно [7]:

$$\sigma_T = \left[\frac{\sigma_{0,2}}{(0,002 \cdot E + \sigma_{0,2})^m} \right]^{m/(1-m)}. \quad (10)$$

Остаточные напряжения, согласно теореме о разгрузке, с учетом предыдущих формул, будут равны:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ост}} &= \sigma - \sigma_{\text{разг}} = \left(\frac{y}{\rho_{\text{мин}}} - \frac{\sigma_T}{E} \right) \cdot G_T + \sigma_T - \\ &- E \cdot y \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{мин}}} - \frac{1}{\rho_{\text{ост}}} \right) = \\ &= \sigma_T \cdot (1 - 0,35m) - E y \cdot \left(\frac{1 - 0,35m}{\rho_{\text{мин}}} - \frac{1}{\rho_{\text{ост}}} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

После подстановки y_T в формулу (11) получаем величину остаточных напряжений на границе текучести для сжатой зоны ОХГ:

$$\sigma_{\text{ост}} = -\sigma_T \cdot \frac{\rho_{\text{мин}}}{\rho_{\text{ост}}}. \quad (12)$$

При расчете по формулам (11) и (12) необходимо пользоваться рисунком 1 для определения знака остаточных напряжений.

Эпюры напряжений по высоте поперечного сечения трубы при $\rho_{\text{мин}}$ (обозначены зеленой штриховкой) и $\rho_{\text{ост}}$ представлены на рисунке 1. Напряжения, соответствующие радиусу разгрузки $\rho_{\text{разг}}$, обозначены штриховкой красного цвета. Следует отметить четыре характерные точки в поперечном сечении гнутой части ОХГ: верхняя и нижняя образующие, где максимальными будут продольные деформации, а также точки на границе текучести (принимаемые на равном расстоянии от

нейтральной линии), где максимальными будут продольные остаточные напряжения.

Величина остаточных напряжений также может быть рассчитана по следующей эмпирической зависимости, предложенной в [6]:

$$\sigma_{\text{ост}} = \left(2k_1 \frac{y}{D_H} - 1 \right) \cdot \sigma_T, \quad (13)$$

где k_1 — коэффициент профиля, определяемый по формуле:

$$k_1 = 1,7 \cdot \frac{1 - \left(\frac{D_{\text{вн}}}{D_H} \right)^3}{1 - \left(\frac{D_{\text{вн}}}{D_H} \right)^4}, \quad (14)$$

где $D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр трубы.

Достоверность эмпирических зависимостей (13) и (14) была подтверждена специальными экспериментальными исследованиями упругопластического изгиба балок различного профиля из углеродистой стали разных марок [6]. Как показали данные исследования, при упругопластическом изгибе имеют место высокие остаточные напряжения, которые для кольцевого (трубного) профиля достигают абсолютных значений до $0,3 \cdot \sigma_T$ и $0,7 \cdot \sigma_T$ в крайних слоях поперечного сечения и на границе текучести соответственно.

Для определения степени деформации стенки трубы рассмотрим диаграмму деформирования стали (рисунок 2). Процесс искривления трубы начинается с упругого поведения стали — по линии АБ. При напряжениях в стенке трубы выше предела текучести стали (линия БВ) накапливаются пластические деформации. После снятия изгибающей нагрузки происходит процесс «разгрузки» напряжений с точки В по линии, параллельной АБ, при этом полная деформация ε в точке В составит [8]:

$$\varepsilon = \frac{D_H}{2\rho_{\text{мин}}} = \varepsilon_{\text{пл}} + \varepsilon_{\text{упр}} = \varepsilon_{\text{пл}} + \frac{\sigma_T}{E}, \quad (15)$$

где $\varepsilon_{\text{пл}}$ — пластическая деформация;

$\varepsilon_{\text{упр}}$ — упругая деформация.

Формула (15) позволяет контролировать уровень остаточной деформации на стадии проектирования и изготовления ОХГ.

При определении достоверности полученных результатов отметим, что пластическое деформирование является сложным процессом, которое обусловлено сопутствующими физическими явлениями, такими как формоизменение, упрочнение материала, релаксация напряжений и т.д. В [8] проведен приближенный анализ возможной точности

основных параметров поверительного эксперимента, таких как размеры деформируемых образцов, усилия машин, механические свойства материалов и их НДС. Отмечается, что в наиболее благоприятном случае расхождение результатов поверительного эксперимента и теоретического результата расчета не должно превышать порядка 10 %.

Для определения характеристик остаточного НДС рассматривается отвод 1. ГО. 3°. 1420. 17,5 – ТУ 14-3-662-78 – 17Г1С. ГОСТ 24950-81, со следующими механическими свойствами стали: условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 510$ МПа, предел временного сопротивления $\sigma_B = 640$ МПа, относительное сужение при разрыве $\psi_f = 65$ %. Показатель степени упрочнения m , рассчитанный по формуле (8), равен 0,12. Соответственно модуль упрочнения в пластической области равен $G_T = 8652$ МПа.

Предварительные модельные расчеты позволили определить $\rho_{\min}$ величиной в 46,15 м.

В таблице 1 и на рисунке 3 представлены основные результаты данной работы. Характеристики остаточного НДС отвода, определенные численным методом, были рассмотрены в его среднем сечении А-А (рисунок 1). Верификация (или определение достоверности) полученных результатов проводилась на основании эмпирических и теоретических зависимостей, рассмотренных выше. Результаты расчетов, сведенные в таблицу 1, показывают хорошую согласованность между собой при максимальных расхождениях в 3,5–5,6 %. Максимальные остаточные напряжения на границе зоны текучести y_T достигают величины 361 МПа, что составляет более 70 % от предела текучести трубной стали (рисунок 3, з). В свою очередь, в среднем сечении ОХГ они составляют порядка 350 МПа (рисунок 3, д).

Таблица 1. Результаты расчета остаточного НДС ОХГ

Характеристики НДС (максимальные значения)	Численная модель	Расчет по формулам	Относительная погрешность, %
Этап нагружения			
Напряжения (в среднем сечении), МПа	595,0	587,1	1,3
Полные деформации (в среднем сечении), %	1,6259	1,5777	3,0
Этап разгрузки			
Максимальные остаточные напряжения, МПа	361,0	361,5 (по формуле (12))	0,2
		382,3 (по формуле (13))	5,6
Остаточные напряжения на верхней образующей (в среднем сечении), МПа	141,5	148,2 (по формуле (11))	4,5
		136,7 (по формуле (13))	3,5
Пластические деформации (в среднем сечении), %	1,3372	1,3497	0,9

а) полные деформации ε ; б) напряжения σ при гнутье трубы, Па; в) пластические деформации $\varepsilon_{пл}$, полученные при гнутье трубы; г) остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ в ОХГ, Па; д) остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ в среднем сечении ОХГ, Па

Рисунок 3. Результаты численного расчета остаточного НДС ОХГ 1. ГО. 3°. 1420. 17,5 – ТУ 14-3-662-78 – 17Г1С. ГОСТ 24950-81

Длина l_2 гнутой части ОХГ для математической модели была определена по следующей зависимости (рисунок 1):

$$l_2 = \frac{\rho_{\text{ост}} \cdot \pi \cdot \alpha_{\text{ост}}}{180}, \quad (16)$$

где $\alpha_{\text{ост}}$ — угол гнутья отвода, град. Данная зависимость предполагает, что верхняя образующая трубы (в сжатой зоне) огибает минимальную окружность радиуса $\rho_{\text{мин}}$ на стадии нагружения и $\rho_{\text{ост}}$ после разгрузки. Однако, как показали результаты численного расчета, гнутая часть ОХГ не «разгибается» до точной формы мнимой окружности, а приобретает незначительный параболический вид. Данное

обстоятельство, вероятнее всего, обусловлено упрочнением стали и пластическими деформациями.

Выводы

Результаты проведенной нами верификации подтверждают правильность разработанной численной модели для анализа остаточного НДС ОХГ после изготовления. Качественная картина НДС показывает знакопеременный характер распределения остаточных напряжений по высоте поперечного сечения, при этом их высокий уровень в определенной степени снижает деформационную способность материала ОХГ.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 24950-81. Отводы гнутые и вставки кривые на поворотах линейной части стальных магистральных трубопроводов. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1982. 20 с.
2. Селезнев В.Е., Алешин В.В., Клишин Г.С. и др. Численный анализ пожарной опасности магистральных газопроводов / Под ред. В.Е. Селезнева. М.: Едиториал УРСС, 2004. 328 с.
3. Шабалов И.П., Великоднев В.Я., Настич С.Ю., Каленский В.С. Применение концепции Digital Twin для трубной продукции на примере отвода холодного гнутья в условиях строительства современных магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 2017. № 12 (761). С. 62–69.
4. Судзуки Н., Аракава Т., Ямаура Т. и др. Применение труб с высокой деформационной способностью при изготовлении методом холодного изгиба криволинейных отводов с большим углом // Газовая промышленность 2017. № 4 (762) (специальный выпуск). С. 66–71.
5. Riagusoff I. Thesi, Kenedi P., Guimarães de Souza L., Lopes Pacheco P. Modeling of Pipe Cold Bending: a Finite Element Approach // VI National Congress of Mechanical Engineering. URL: <https://www.researchgate.net/publication/282861951> (дата обращения: 02.12.2018).
6. Мошнин Е.Н. Гибка и правка на ротационных машинах. Технология и оборудование. М.: Машиностроение, 1967. 272 с.
7. СТО Газпром 2-3.5-252-2008. Методика продления срока безопасной эксплуатации магистральных газопроводов ОАО «Газпром». Введ. 2009-04-15. М.: ООО «Газпром эксп», 2009. VI. 99 с.
8. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. Инженерные методы расчета операций пластической обработки материалов. М.: Машгиз, 1961. 462 с.
9. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 233 с.
10. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.

REFERENCES

1. GOST 24950-81. *Otvody gnutye i vstavki krivye na povorotakh lineynoy chasti stal'nykh magistral'nykh truboprovodov* [GOST 24950-81. Bent Branches and Elbows at Line Bends for Transmission Steel Pipelines Specifications]. Moscow, Standards Publ., 1982. 20 p. [in Russian].
2. Seleznev V.E., Aleshin V.V., Klishin G.S. et al. *Chislennyi analiz pozharnoi opasnosti magistral'nykh gazoprovodov* [Numerical Analysis of a Fire Hazard of the Main Gas Pipelines]. Moscow, Editorial URSS, 2004. 328 p. [in Russian].
3. Shabalov I.P., Velikodnev V.Ya., Nastich S.Yu., Kalenskii V.S. *Primenenie kontseptsii Digital twin dlya trubnoi produktsii na primere otvoda kholodnogo gnut'ya v usloviyakh stroitel'stva sovremennykh magistral'nykh gazoprovodov* [Application of the Digital Twin Concept for Pipe Products by the Example of the Cold Bending in the Conditions of Construction of the Modern Main Gas Pipelines]. *Gazovaya promyshlennost' — Gas Industry*, 2017, No. 12 (761), pp. 62–69. [in Russian].
4. Sudzuki N., Arakava T., Yamaura T. et al. *Primenenie trub s vysokoi deformatsionnoi sposobnost'yu pri izgotovlenii metodom kholodnogo izgiba krivoliniykh otvodov s bol'shim uglom* [Application of Pipes with High Deformation Ability at Manufacture by Method of a Cold Bend of Curvilinear Branches with a Larger Corner]. *Gazovaya promyshlennost' — Gas Industry*, 2017, No. 4 (762), pp. 66–71. [in Russian].
5. Riagusoff I. Thesi, Kenedi P., Guimarães de Souza L., Lopes Pacheco P. *Modeling of Pipe Cold Bending: a Finite Element Approach*. VI National Congress of Mechanical Engineering. URL: <https://www.researchgate.net/publication/282861951> (accessed 19.12.2018).
6. Moshnin E.N. *Gibka i pravka na rotatsionnykh mashinakh. Tekhnologiya i oborudovanie* [Bending and Editing on Rotary Machines. Technology and Equipment]. Moscow, Mechanical Engineering, 1967, 272 p. [in Russian].
7. SТО Gazprom 2-3.5-252-2008. *Metodika prodleniya sroka bezopasnoi ekspluatatsii magistral'nykh gazoprovodov ОАО «Gazprom»* [STO Gazprom 2-3.5-252-2008. Technique of Extension of Safe Operation of Main Gas

Pipelines of JSC Gazprom]. Moscow, LLC Gazprom Expo, 2009. 99 p. [in Russian].

8. Smirnov-Alyayev G.A. *Soprotivlenie materialov plasticheskomu deformirovaniyu. Inzhenernye metody rascheta operatsii plasticheskoi obrabotki materialov* [Strength of Materials to Plastic Deformation. Engineering Computational Methods of Operations of Plastic Processing of Materials]. Moscow, Mashgiz Publ., 1961. 462 p. [in Russian].

9. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual Stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 233 p. [in Russian].

10. Makhutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruksii na prochnost'* [Straining Criteria of Destruction and Calculation of Elements of Designs on Durability]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981, 272 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Закирьянов Марс Васильевич, аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа, УГНТУ, г Уфа, Российская Федерация

Mars V. Zakiryanov, Post-Graduate Student of Oil and Gas Transport and Storage Department, USPTU, Russian Federation

e-mail: mars.zakiryanov.1988@mail.ru

Файзуллин Булат Саяфетдинович, аспирант кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, УГНТУ, г Уфа, Российская Федерация

Bulat S. Faizullin, Post-Graduate Student of Gas and Oil Pipelines and Storage Facilities Construction and Repair Department, USPTU, Russian Federation

e-mail: bulat-fayzullin@inbox.ru

Коробков Геннадий Евгеньевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры транспорта и хранения нефти и газа, УГНТУ, г Уфа, Российская Федерация

Gennadiy Ye. Korobkov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of Oil and Gas Transport and Storage Department, USPTU, Russian Federation

e-mail: korobkov45@mail.ru

Янчушка Анна Павловна, канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры математики, УГНТУ, г Уфа, Российская Федерация

Anna P. Yanchushka, Candidate of Economic Sciences, Associated Professor, Assistant Professor of Mathematics Department, USPTU, Russian Federation

e-mail: kafedra-matematiki@rambler.ru