DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-1-108-119

УДК 620.179.14

Р.В. Загидулин (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация), **Т.Р. Загидулин** (ООО «Научно-технический центр «Спектр», г. Уфа, Российская Федерация), **В.Р. Мардамшин** (ПАО «Газпром», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация), **Т.А. Бакиев** (ООО «Газпром трансгаз Уфа», Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА

Rinat V. Zagidulin (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation), **Timur R. Zagidulin** (Scientific and Technical Center «Spector» LLC, Ufa, Russian Federation), **Vadim R. Mardamshin** (Gazprom PJSC, Saint-Petersburg, Russian Federation), **Tagir A. Bakiev** (Gazprom Transgaz Ufa, LLC, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

DEFECTS ESTIMATION OF WELDED CONNECTIONS CONTINUITY ON STEEL PIPELINES BY METAL STRESSED STATE MAGNETIC CONTROL RESULTS

Введение

Для длительно эксплуатирующихся стальных трубопроводов стресс-коррозионные трещины и дефекты сплошности сварных соединений создают большие риски. Они являются концентраторами механических напряжений и обладают способностью быстро развиваться в металле (часто непредсказуемо), приводя к неожиданному разрушению металла стальной трубы.

Цели и задачи

С целью оценки опасности дефекта сплошности предлагается контролировать напряженное состояние металла в областях, прилегающих к зонам пластичности при вершинах дефектов в нагруженном состоянии стальных труб, когда происходит концентрация механических напряжений в металле.

Background

For long-term operating steel pipelines, stress-corrosion cracks and defects in the integrity of welded joints pose great risks. They are mechanical stress concentrators and they have the ability to grow rapidly in metal (often unpredictable), leading to unexpected destruction of the steel pipe metal.

Aims and Objectives

In order to assess the danger of a defect in continuity, it is proposed to control the stress state of the metal in the areas adjacent to the plasticity zones at the tops of defects in the loaded state of steel pipes when the concentration of mechanical stresses in the metal occurs.

Результаты

Приводятся результаты исследования макрошлифов металла образцов с дефектами сплошности сварных соединений стальных труб, полученные после разрушения стенда. Показаны результаты исследования напряженного состояния металла сварных соединений и тела стальной трубы в процессе нагружения испытательного стенда. Установлено, что остаточные механические напряжения в стальной трубе распределяются неравномерно, согласно фактическим внешним и внутренним нагрузкам. Исследование макрошлифов с дефектами сплошности показывает, что их формы могут существенно отличаться от формы моделей дефектов, применяемых в механике разрушения. Указывается на разницу между оценками линейных размеров дефектов сплошности, полученных по макрошлифам и по результатам ультразвуковой дефектоскопии. Показано, что области с повышенным напряженным состоянием металла, установленные при магнитном контроле металла сварных швов стальных труб, совпадают с месторасположением дефектов сплошности и согласуются с результатами исследования макрошлифов стальных образцов. Формирование областей с повышенным напряженным состоянием металла над дефектами сплошности в стальной трубе связывается с наличием пластических зон при вершинах дефектов, где механические напряжения превышают предел текучести металла. Этим объясняется совпадение месторасположений дефектов сплошности сварных соединений, выявленных при ультразвуковой дефектоскопии и областей с повышенным напряженным состоянием металла, установленных при магнитном контроле стальных труб.

Results

The study results of macrosections of metal samples with steel pipes welded joints continuity defects, obtained after the test stand destruction, are given. The study results of the welded joints metal stress state and the steel pipe body in the process of loading the test stand are shown. It is established that the residual mechanical stresses in the steel pipe are distributed unevenly, according to the actual external and internal loads. The macrosections with continuity defects study shows that their forms can differ significantly from the defect models form used in fracture mechanics. It indicates the difference between the estimates of the continuity defects linear dimensions obtained from macrosections and from the results of ultrasonic defectoscopy. It is shown that the areas with an increased metal stress state, established by steel pipes welds metal magnetic control, coincide with the continuity defects location and are consistent with the results of the steel samples macrosections study. The formation of areas with an increased metal stress state above the continuity defects in a steel pipe is associated with plastic zones at the defects tops, where the mechanical stresses exceed the yield strength of the metal. This explains the coincidence of the defects location in the welded joints continuity identified during ultrasonic flaw detection and areas with an increased metal stress state, installed during steel pipes magnetic control.

Ключевые слова: стальной трубопровод, дефект сплошности металла, сварное соединение, магнитный контроль напряженного состояния металла, макрошлиф металла, зона пластичности при вершине трещины

Key words: steel pipeline, metal continuity defect, welded joint, magnetic control of the metal stress state, metal macrosection, zone of plasticity at the crack tip

После разрушения металла испытательного стенда из него были вырезаны стальные образцы из участков кольцевого и продольных сварных соединений стальных

труб, в которых имелись дефекты сплошности металла, установленные по результатам ультразвукового контроля (УЗК) и магнитного контроля напряженного состояния металла.

Технологические операции по послойному получению макрошлифов дефектных участков металла сварных соединений (макрошлифы изготавливались на плоскошлифовальном станке с шагом не более 0,1 мм) позволили оценить фактическое наличие, линейные размеры и форму поверхности выявленных внутренних дефектов сплошности металла стальных образцов.

Результаты исследования макрошлифов металла некоторых образцов с дефектами сплошности сварных соединений стальных труб представлены в таблицах 1, 2.

На основе исследования макрошлифов металла были сделаны следующие заключения:

- в большинстве случаев формы дефектов сплошности весьма сильно отличаются от формы моделей дефектов, применяемых в механике разрушения и неразрушающем контроле. Встречаются группы из близко расположенных в металле дефектов сплошности;
- линейные размеры дефектов сплошности, выявленных при УЗК, могут значительно отличаться от фактических величин, установленных по результатам исследования макрошлифов сварных соединений;
- при УЗК иногда пропускаются дефекты сплошности, которые создают значительные механические напряжения в металле (таблица 1);
- допускаемые, по результатам УЗК, дефекты сплошности могут иметь острые вершины, которые являются концентраторами механических напряжений в металле.

Из этого следует, что расчетная величина коэффициента интенсивности напряжений [1] ($K = \sigma_0 \sqrt{\pi 2a}$, где σ_0 - номинальное механическое напряжение), которым полностью описывается поле механических напряжений около вершины трещины и определяется степень ее опасности для прочности металла, по результатам УЗК будет иметь невысокую точность.

С другой стороны, снижать достоверность оценки величины коэффициента интенсивности напряжений K будет также определение величины номинальных механических напряжений в металле расчетным путем, значения которых существенно отличаются от фактических.

Об этом свидетельствуют результаты магнитного контроля сварных соединений и тела стальных труб двухтрубной плети, в которой были выявлены области с повышенным напряженным состоянием металла.

На рисунке 1 показаны результаты магнитного контроля напряженного состояния металла в продольных сварных соединениях ненагруженного испытательного стенда (внутреннее давление $P = 0$ МПа, количество циклов нагружения $N = 0$), представленных в виде линейных графиков.

В продольных сварных соединениях стальных труб были выявлены 8 областей с повышенным напряженным состоянием металла (слева направо обозначены НДС1 - НДС8), которым соответствуют локальные максимумы на графиках (отмечены стрелками).

Участки продольных сварных соединений испытательного стенда с повышенным напряженным состоянием металла полностью соотносятся с результатами УЗК, а также с макрошлифами участков сварного соединения с дефектами сплошности металла (таблица 1).

На рисунке 2 показаны результаты магнитного контроля напряженного состояния металла кольцевого сварного соединения стальных труб, представленные в виде круговой диаграммы, при разном давлении P внутри испытательного стенда. В кольцевом сварном шве ненагруженного стенда были выявлены 7 локальных областей с повышенным напряженным состоянием металла (отмечены маркером).

Участки кольцевого сварного шва испытательного стенда с повышенным напряженным состоянием металла также полностью соотносятся с результатами УЗК и с макрошлифами участков сварного соединения с дефектами сплошности металла (таблица 2).

Таблица 1. Макрошлифы некоторых дефектов сплошности в продольных сварных швах

Обозначение дефекта сплошности	Описание дефекта и его геометрические размеры	Фотография макрошлифа
Дефект Д1	<p>Свищ - выход поры на поверхность металла</p> <p>Диаметр - 2 мм, глубина залегания - 4 мм</p>
Дефект Д2	<p>Скопление пор</p> <p>Диаметр - от 0,2 до 0,5 мм, глубина залегания - 1 мм</p>
Дефект Д6	<p>Шлаковые включения</p> <p>Длина - 5 мм, ширина - 1 мм, глубина залегания - 4,5 мм</p>
Дефект сплошности в области НДС 2 - не выявлен при УЗК	<p>Дефект разделки кромок</p> <p>Длина - 2 мм, ширина - 1,5 мм</p>

Таблица 2. Макрошлифы некоторых дефектов сплошности в кольцевом сварном шве

Обозначение дефекта сплошности	Описание дефекта и его геометрические размеры	Фотография макрошлифа
Дефект № 2	<p><i>Поры</i> диаметр - до 1,5 мм</p> <p><i>Шлаковые включения</i> длина - до 6 мм, ширина - 2 мм, глубина залегания - 2 мм</p>
Дефект № 4	<p><i>Шлаковое включение</i> длина - 5 мм, ширина - 7 мм, глубина залегания - 3,5 мм</p>
Дефект № 5	<p><i>Свищ</i> длина - 4,5 мм, ширина - 2 мм, глубина залегания - 2мм</p>

а)

б)

а) на первой стальной трубе (НДС1-НДС4); б) на второй стальной трубе (НДС5-НДС8)

Рисунок 1. Повышенное напряженное состояние металла в продольных сварных швах испытательного стенда

Рисунок 2. Месторасположение областей с напряженным состоянием металла в кольцевом сварном шве

Видно, что их месторасположение в сварном соединении стальных труб не меняется при нагружении испытательного стенда давлением технической воды до $P = 2,5$ МПа и увеличении количества циклов до $N = 150$. При нагружении испытательного стенда эффективное механическое напряжение в областях кольцевого сварного шва с напряженным состоянием металла уменьшается на 7-20 %.

Это свидетельствует о том, что при нагружении стенда давлением $P > 0$ в металле кольцевого сварного шва происходит суммирование остаточных (растягивающих и сжимающих) и действующих (только растягивающих окружных и растягивающих продольных) механических напряжений.

Это приводит к некоторому снижению величины суммарных эффективных механических напряжений металла по периметру

кольцевого сварного соединения стальных труб стенда и снижает риск его разрушения.

На рисунке 3 приведены графические развертки поверхности ненагруженного испытательного стенда (давление $P = 0$ МПа, количество циклов нагружения $N = 150$) с распределением напряженного состояния металла в виде поверхности и контурной диаграммы, представленные в программном приложении индикатора механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа [2].

Графическое представление напряженного состояния металла стальной трубы в виде поверхности позволяет оперативно оценивать месторасположение амплитуд, а представление данных в виде контурной диаграммы - оценивать формы и месторасположение зон концентрации механических напряжений металла.

а)

б)

а) поверхность; б) контурная диаграмма

Рисунок 3. Напряженное состояние металла ненагруженного испытательного стенда (давление $P = 0$ МПа)

Видно, что напряженное состояние металла испытательного стенда является неоднородным - существуют множество областей с повышенным напряженно-деформированным состоянием металла, которые расположены:

- в нижней части стальных труб (угловые положения от 5 до 8 ч), из-за возникновения изгибной деформации испытательного стенда под действием силы тяжести технической воды в полости стальных труб;

○ в околошовных областях сварных соединений стальных труб, из-за остаточных механических напряжений, возникающих при усадке металла после сварки стыков.

Анализ напряженного состояния металла испытательного стенда показывает, что разница суммарных эффективных механических напряжений в верхней и в нижней частях стальных труб, в силу указанных причин, может составить от 36 % до 50 %.

На рисунке 4 показано напряженное состояние металла нагруженного испытательного стенда (давление $P = 5,4$ МПа, количество циклов $N = 150$).

На основе сравнительного анализа полученных данных с напряженным состоянием металла ненагруженного стенда (рисунок 3) было установлено, что увеличение давления в испытательном стенде приводит к примерно линейному росту эффективных механических напряжений в наиболее напряженных участках стальных труб, при этом:

- в нижней части испытательного стенда (угловые положения от 5 до 7 ч) - на 12-14 %;
- в области продольного сварного соединения второй стальной трубы (угловое положение на 11 ч) - на 21-48 %.

Таким образом, увеличение механического напряжения металла в локальных областях продольных сварных соединений стальных труб с повышенным напряженным состоянием металла происходит более интенсивно, чем в напряженных областях металла, которые расположены на бесшовном участке испытательного стенда.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для достоверной оценки коэффициента интенсивности напряжений K для дефектов сплошности металла в стальной трубе необходимо знать фактические величины номинальных механических напряжений, которые для реальных стальных труб являются весьма неоднородными.

В механике разрушения показано, что при вершине дефекта сплошности формируется пластическая зона, где механические напряжения превышают предел текучести, и металл испытывает пластическую деформацию.

В зависимости от физического состояния, величина механических напряжений в пластической зоне при вершине реального дефекта сплошности будет находиться в интервале значений, ограниченных пределом текучести σ_T и пределом прочности металла σ_B [3-6].

Очевидно, что при отсутствии нагрузки в стальной трубе в пластических зонах при вершинах дефектов сплошности сварных соединений будут оставаться остаточные деформации, формирующие остаточные механические напряжения металла. Именно эти остаточные эффективные механические напряжения, экспериментально измеренные индикаторами механических напряжений металла, приведены на рисунках 1, 2.

Размер зоны пластичности при вершине дефекта сплошности можно оценить по расчетной формуле для плоского напряженного состояния металла (по Дж. Ирвину) [1]:

$$R_P = \frac{K^2}{4\pi\sigma_T^2} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \theta + \cos \theta \right), \quad (1)$$

где θ - полярный угол точки в металле относительно вершины дефекта.

Численные расчеты по формуле (1) показывают, что размеры зоны пластичности металла при вершинах трещин сопоставимы с линейными размерами дефектов сплошности и толщиной стенки стальной трубы.

Рассмотрим краевой дефект сплошности в стальной пластине конечной толщины, смещение граней которого осуществляется по схеме нормального отрыва (рисунок 5). Величина коэффициента интенсивности напряжений для этого дефекта определяется по формуле [1]:

$$K = \sigma_0 \sqrt{a} \left(2 - 0.41 \lambda + 18.7 \lambda^2 - 38.48 \lambda^3 + 53.85 \lambda^4 \right), \quad (2)$$

где параметр $\lambda = a/t$;

a - длина грани дефекта сплошности типа трещины;

t - толщина стальной пластины.

а)

б)

а) поверхность; б) контурная диаграмма

Рисунок 4. Напряженное состояние металла нагруженного испытательного стенда (давление $P = 5,4$ МПа)

Рисунок 5. Зона пластичности при вершине краевой трещины нормального отрыва в плоском напряженном состоянии металла

Из формул (1)-(2) следует, что для реального краевого дефекта сплошности Д1 ($a = 4$ мм, $t = 8$ мм, таблица 1) в продольном сварном шве стальной трубы при давлении в испытательном стенде $P = 5,0$ МПа размер зоны пластичности металла при вершине дефекта сплошности будет составлять $R_p = 2,8$ мм, то есть пластическая зона металла практически достигает граничной поверхности стальной трубы (рисунок 5).

Так как магнитные системы индикаторов механического напряжения металла ИН-01м и ИН-02 способны намагничивать металл стальной трубы на глубину до 5-10 мм, то ими можно реально измерить величины механических напряжений, формируемых в зонах пластичности металла при вершинах внутренних дефектов сплошности сварных соединений и в прилегающих к ним областях металла.

Этим обстоятельством объясняется совпадение месторасположений дефектов сплошности сварных соединений, выявленных при УЗК, и областей с повышенным напряженным состоянием металла, установленных при магнитном контроле металла испытательного стенда.

Для объективной оценки опасности дефекта сплошности следует контролировать напряженное состояние металла в областях, прилегающих к зонам пластичности при вер-

шинах дефектов сплошности, в состоянии нагружения стальных труб, так как при этом будет происходить концентрация механических напряжений, способных привести к дальнейшему росту трещин и разрушению металла.

Так, магнитный контроль напряженного состояния металла нагруженного испытательного стенда позволил установить наибольшую опасность для прочности металла дефекта сплошности Д5 в продольном сварном соединении стальной трубы, так как в области его расположения было зафиксировано эффективное механическое напряжение значительной амплитуды (на рисунке 4 отмечено окружностью).

На рисунке 6 показан линейный график напряженного состояния участка продольного сварного соединения стальной трубы с дефектом сплошности металла Д5.

Сравнивая амплитуды сигналов в линейных графиках, соответствующих дефекту сплошности Д5, полученных для ненагруженного (рисунок 1, б, участок НДС 6) и нагруженного испытательного стенда (рисунок 6, а), можно установить, что величина эффективного механического напряжения, измеренная над зоной пластичности при вершине дефекта сплошности Д5 возросла на 62 %, в то время как для соседнего дефекта сплошности Д4 в продольном сварном соединении стальной трубы - не более чем на 16 %.

а)

б)

Рисунок 6. Напряженное состояние металла около дефекта сплошности Д5 в продольном сварном соединении (а) и общий вид разрушенного участка испытательного стенда (б)

Достоверность оценки опасности дефекта сплошности Д5, полученной по результатам магнитного контроля напряженного состояния металла, была подтверждена при проведении дальнейших испытаний стенда на статическую прочность металла: при давлении в стенде $P = 14,4$ МПа произошло разрушение металла в участке продольного сварного соединения второй стальной трубы, расположенного в области дефекта сплошности металла Д5 (рисунок 6, б).

Выводы

1. Результаты ультразвукового контроля сварных соединений стальных труб, содержащих дефекты сплошности, не позволяют надежно оценивать их опасность для прочности металла на основе методов механики разрушения.

2. Магнитный контроль напряженного состояния металла позволяет выявлять области, прилегающие к зонам пластичности металла при вершинах дефектов сплошности в сварных соединениях стальной трубы.

Установленные области с повышенным напряженным состоянием металла находятся в согласии с результатами ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений стального трубопровода.

3. Комплексный магнитный контроль напряженного состояния металла и ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений стального трубопровода в режиме эксплуатации позволяют определять потенциально опасные дефекты сплошности, создающие наибольшую вероятность разрушения металла.

Список литературы

1. Николаева Е.А. Основы механики разрушения. Пермь: Издательство Пермского государственного технического университета, 2010. 103 с.
2. Загидулин Т.Р., Загидулин Р.В. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния металлоконструкций индикатором механического напряжения металла ИН-02 сканирующего типа. Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15, № 4. С. 143-149.
3. Кузеев И.Р., Наумкин Е.А., Кудашев Р.Р. и др. Изменения механических характеристик материала гибких насосно-компрессорных труб в условиях циклического нагружения // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2015. Т. 2. № 2. С. 47-53.
4. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1989. 624 с.
5. Лобанов Л.М., Пашин Н.А., Логинов В.П. и др. Влияние электродинамической обработки на напряженное состояние сварных соединений стали Ст 3 // Автоматическая сварка. 2007. № 7. С. 10-12.
6. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 1. Новосибирск: Наука, 2005. 494 с.

References

1. Nikolaeva E.A. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of Fracture Mechanics]. Perm National Research Polytechnic University Publ., 2010, 103 p. [in Russian].
2. Zagidulin T.R., Zagidulin R.V. Magnitnyi kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsii indikatorom mekhanicheskogo napryazheniya metalla IN-02 skaniruyushchego tipa [Metal Structures Stressed and Strained State Magnetic Inspection by in-02 the Scanning Metal Strain Indicator]. *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal «Neftegazovoe delo» - Scientific and Technical Journal «Oil and Gas Business»*, 2017, Vol.15, No. 4, pp. 143-149. [in Russian].
3. Kuzeev I.R., Naumkin E.A., Kudashov R.R. i dr. Izmeneniya mekhanicheskikh kharakteristik materiala gibkikh nasosno-kompressornykh trub v usloviyakh tsiklicheskogo nagruzheniya [Changes in the Mechanical Characteristics of the Material of Flexible Tubing Pipes under Cyclic Loading Conditions]. *Nauchnye trudy NIPI Neftegaz GNKAR – Scientific Works of the Research and Design Institute for Oil and Gas SOCAR*, 2015, Vol. 2, No. 2, pp. 47 - 53. [in Russian].
4. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivleniye materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 624 p. [in Russian].
5. Lobanov L.M., Pashin N.A., Loginov V.P. i dr. Vliyanie elektrodinamicheskoi obrabotki na napryazhennoe sostoyanie svarnykh soedinenii stali St 3 [Effect of Electrodynamics Processing on the Stressed State of Welded Joints of Steel St 3]. *Avtomaticheskaya svarka – Automatic Welding*, 2007, No. 7, pp. 10 - 12. [in Russian].

6. Makhutov N.A. *Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'* [Structural Strength, Life and Man-Made Safety]. Ch. 1. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005. 494 p. [in Russian].

Авторы

• Загидулин Ринат Васикович, д-р техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Технологические машины
и оборудование»,
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: doctech.zagriv@post.com

• Загидулин Тимур Ринатович, канд. техн. наук
ООО «Научно-технический центр «Спектр»
Технический директор
Российская Федерация, 450078, г. Уфа,
ул. Кирова, 89
e-mail: ztr@post.com

• Мардамшин Вадим Рафаилович
ПАО «Газпром»
Главный специалист отдела 338/9/4
Российская Федерация, 196105,
г. Санкт-Петербург, Московский проспект, 156
e-mail: vrmardamshin@gmail.com

• Бакиев Тагир Ахметович, д-р техн. наук
Инженерно-технический центр
ООО «Газпром трансгаз Уфа»
Начальник
Российская Федерация, 450054, г. Уфа,
ул. Р. Зорге, 59
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Заведующий кафедрой «Гидрогазодинамика
трубопроводных систем и гидромашин»
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,
ул. Космонавтов, 1
e-mail: tagirbak@mail.com

The Authors

• Zagidulin Rinat V., Doctor of Engineering Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Technological Machines and Equipment
Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: doctech.zagriv@post.com

• Zagidulin Timur R., Candidate of Engineering
Sciences
Scientific and Technical Center «Spector» LLC
Technical Director
89, Kirov str., Ufa, 450078, Russian Federation
e-mail: ztr@post.com

• Mardamshin Vadim R.
Gazprom PJSC
Chief Specialist of Department 338/9/4
156, Moscow ave., Saint-Petersburg, 196105,
Russian Federation
e-mail: vrmardamshin@gmail.com

• Bakiev Tagir A., Doctor of Engineering Sciences
Engineering and Technical Center,
Gazprom Transgaz Ufa LLC
Head
59, R. Zorge str., Ufa, 450054,
Russian Federation
Ufa State Petroleum Technological University
Head of Hydro- and Gas Dynamics of Pipeline
Systems and Hydraulic Machines Department
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,
Russian Federation
e-mail: tagirbak@mail.com