

УДК 620.16 : 624.046

## Определение несущей способности магистрального газопровода с расслоениями и внутренними вздутиями

М.М. Алиев<sup>1\*</sup>, С.П. Зайцев<sup>2,1</sup>, Р.Х. Султангареев<sup>3,1</sup>, М.Н. Попова<sup>1</sup>, Т.А. Хуснуллина<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Альметьевский государственный нефтяной институт, Российская Федерация, 423458, Республика Татарстан, г. Альметьевск, ул. Ленина, д. 2

<sup>2</sup> АЛПУМГ ООО «Газпром трансгаз Казань», Российская Федерация, 423400, Республика Татарстан, Альметьевский р-н, РП Нижняя Мактама, Бугульминский тракт, д. 1

<sup>3</sup> ООО «Газпром трансгаз Казань», Российская Федерация, 420073, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, д. 41

\* E-mail: mmaliev@rambler.ru

**Тезисы.** В статье исследуется влияние на несущую способность труб газопровода Оренбург – Заинск различных дефектов, приобретенных трубами в период изготовления, монтажа и эксплуатации. Внутритрубная диагностика совместно с дополнительными диагностическими обследованиями труб в шурфах позволяют выявить внутренние вздутия различной пространственной геометрической формы в виде выпуклых поверхностей разных размеров. Несущая способность дефектных труб оценена на основании натуральных гидравлических испытаний и математических расчетов.

Результаты ресурсных испытаний показали снижение предела прочности металла трубы с расслоениями и внутренними вздутиями на 41,6 %, в то время как расслоения без изменения геометрии стенки трубы снижали предел прочности металла на 18,5 %. Разрыв катушки, изготовленной из трубы аварийного запаса, показал наличие ликвационной полосы, являющейся металлургическим дефектом, а разрыв катушки с внутренним вздутием произошел в зоне расположения опорного сечения вздутия.

Задача определения несущей способности дефектных труб решалась теоретически на базе расчетных схем для пологих оболочек, работающих в условиях параболического свода до момента схлопывания вздутий. Также исследована возможность возникновения вздутий в период эксплуатации газопровода из-за температурных напряжений.

В работе изложены результаты исследования несущей способности магистрального газопровода Оренбург – Заинск, который находится в эксплуатации с 1971 г. Газопровод сооружен подземно из труб типоразмерами 1020×14 мм (ФРГ и Франция) и 1020×16 мм (Швеция), изготовленных из малоуглеродистой стали с пределами прочности не ниже 560 МПа, пределом текучести не ниже 420 МПа. В настоящее время газопровод эксплуатируется с рабочим давлением 3,4 МПа. Ранее отмечалось появление с самого начала эксплуатации газопровода многочисленных дефектов и повреждений различного характера, включая расслоения [1]. Кроме того, последние обследования показали, что на некоторых участках газопровода обнаруживались внутренние вздутия различных геометрических форм и существенных размеров, входящих в плане от 230 до 600 мм, с высотой подъема стрелы 50...60 мм.

Вопросы влияния расслоения металла на сопротивление труб разрушению рассмотрены в ряде публикаций [2–7]. Выявлено, что расслоение не является сугубо технологическим дефектом производства трубы, а может также быть обусловлено условиями ее эксплуатации [7]. В частности, фактором замедленного образования и развития указанных дефектов может стать водородная коррозия стали. Примечательно, что в начальный период эксплуатации исследуемого газопровода по нему транспортировался неочищенный природный газ [1]. Примеси кислых компонентов в газе способствовали накоплению в стали водорода, инициируя структурные изменения кристаллической решетки материала [8].

В литературе [9, 10] также описаны причины образования расслоений при изготовлении стальных труб большого диаметра. Технология производства прямошовных труб диаметром 1020...1420 мм включает на первой стадии подгибку кромок листовой заготовки на кромкогибочном прессе пошаговым способом одновременно с двух

### Ключевые слова:

газопровод, несущая способность, расслоение, внутреннее вздутие, гидравлическое испытание.

сторон. Формовка основной части завершается газовой сваркой наружного шва и 4-дуговой сваркой внутреннего и внешнего швов трубы. После формовки на кромкогибочном и трубоформовочном прессах не удается добиться требуемой округлости трубы. При этом диаметр трубы оказывается на 0,5...1,5 % меньше требуемого. Для получения необходимого диаметра и улучшения поперечной округлости трубы применяется технологическая операция экспандирование.

Максимальные окружные напряжения в стенке трубы, возникающие единственно из-за экспандирования, превышают предел текучести металла и приводят его к упрочнению [11]. При этом остаточные напряжения, полученные в результате воздействия трубоформовочного пресса, в сумме с напряжением от экспандирования могут превышать предел прочности металла ( $\sigma_b$ ) во внутренних волокнах. Например, для трубы диаметром 1420 мм суммарные окружные напряжения соответственно равны  $1,254 \sigma_b$  и  $0,437 \sigma_b$  [11]. Очевидно, что для трубы диаметром 1020 мм будут получены примерно такие же результаты.

В этом случае максимальные касательные напряжения ( $\tau_{\max}$ ) в некоторых сечениях внутри стенки трубы (при окружном напряжении  $\sigma_1 = 1,254\sigma_b$  и радиальном напряжении  $\sigma_2 = 0$ ) получатся больше  $0,5\sigma_b$ :

$$\tau_{\max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2) = 0,5 \cdot 1,254\sigma_b = 0,627\sigma_b.$$

Это означает, что согласно критерию Треска – Сен-Венана условие прочности будет нарушено. По этой причине на внутренних поверхностях трубы могут образоваться трещины и микрорасслоения сдвигового характера.

Явление расслоения трубной стали связывают также с образованием ликвационных полос при изготовлении листового проката. Ликвационные зоны, возникающие практически в середине трубного проката по толщине, содержат неметаллические включения, загрязняющие расплав. Именно в этой зоне в процессе формирования трубы действуют максимальные касательные напряжения, провоцирующие расслоение металла.

Сталь трубопровода после появления вздутий теряет определенную часть первоначальной прочности на участках начала расслоения с высокой концентрацией напряжений. Так, несущая способность двух длительно эксплуатируемых

магистральных газопроводов оценивалась путем испытания на действие внутреннего давления фрагментов натуральных образцов (катушек) без видимых дефектов, а также плоских элементов, вырезанных из демонтированных участков труб [12]. После испытания на разрушающее гидравлическое давление каких-либо расслоений в катушках обнаружено не было. Расчеты по геометрическим параметрам катушки согласно безмоментной теории, а также результаты испытания плоских образцов показали незначительные отклонения от сертифицированных прочностных показателей. Тем не менее следует отметить, что причины образования вздутий и их влияние на несущую способность газопроводов изучены недостаточно.

Исходя из изложенного в настоящей работе сделана попытка связать образование определенной части внутренних вздутий с температурными напряжениями, возникшими на начальном этапе перекачки сырого газа по газопроводу Оренбург – Заинск.

С учетом слабой изученности и актуальности вопроса была поставлена задача исследовать причины появления расслоений и вздутий на стенках труб магистрального газопровода и их влияние на его несущую способность.

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования по определению несущей способности газопровода на участках труб с расслоениями и образовавшимися при этом внутренними вздутиями было решено провести путем гидравлического испытания образцов – катушек, вырезанных из этих участков. В Альметьевском линейно-производственном управлении магистральных газопроводов (ЛПУМГ) изготовили три образца (рис. 1, таблица). Первый образец (К1) визуально не имел дефектов-вздутий,



Рис. 1. Образцы катушек для испытания

## Размеры образцов-катушек и результаты испытания на разрушающее давление

номер	Катушка		Разрушающее давление, МПа	$\sigma_b$		
	длина, мм	толщина стенки $\delta$ , мм		среднее сертифицированное значение / диапазон изменения, МПа	расчетное значение по результатам испытаний, МПа	отклонение от среднего, %
K1	1340	14	13,2	589 / 560...618	480	18,5
K2	1260		9,6		350	41,6
K3	1270		16,9		616	В пределах сертификационного значения

однако по результатам ультразвукового контроля по всей длине трубы было обнаружено расслоение. Второй образец (K2) имел внутреннее вздутие размером в плане  $230 \times 600$  мм со стрелой подъема 60 мм. Третий, сравнительный, образец (K3) изготовили из трубы оперативного запаса Альметьевского ЛПУМГ.

Гидравлические испытания каждого образца проводились в три этапа с последовательным подъемом давления сначала до рабочего – 3,4 МПа, далее до 5,4 МПа, а после визуального осмотра до разрушающего (см. таблицу). В результате испытаний образец K1 разрушился при давлении 13,2 МПа. Если исходить из безмоментной теории, при  $\delta = 14$  мм такому давлению соответствует предел прочности металла  $\sigma_b = 480$  МПа. С учетом среднего сертифицированного значения  $\sigma_b = 589$  МПа снижение предела прочности металла за период эксплуатации составляет 18,5 %. При визуальном осмотре катушки K1 обнаружено расслоение металла в продольном направлении с переходом на заглуженную часть через кольцевой шов (рис. 2).

При испытании образца K2 с внутренним вздутием получено, как и ожидалось,

наименьшее разрушающее давление 9,6 МПа (рис. 3). Согласно теории такому давлению соответствует  $\sigma_b = 350$  МПа, что равносильно снижению  $\sigma_b$  на 41,6 % относительно сертифицированного значения. На записи, сделанной в процессе видеофиксации испытаний, отчетливо слышны два хлопка, последовавшие друг за другом в течение нескольких секунд. По мнению авторов, первый из них соответствовал схлопыванию внутреннего вздутия, а второй – разрушению образца. Разрушение произошло в зоне расположения вздутия.

Образец K3, изготовленный из трубы оперативного запаса, разрушился при гидростатическом давлении 16,9 МПа, которому соответствует  $\sigma_b = 616$  МПа, почти совпадающее с максимальным сертифицированным значением 618 МПа. На рис. 4 четко видна ликвационная полоса, расположенная по толщине сечения в середине. Поскольку данная труба не была в эксплуатации, ликвационная полоса сохранила первоначальное положение. Начальный участок разрыва по характеру соответствует образованию шейки при испытаниях стандартных образцов.



Рис. 2. Расслоение стенки металла K1 по длине разрыва 1000 мм с раскрытием до 120 мм



Рис. 3. 100-миллиметровый разрыв образца K2 в продольном направлении с раскрытием шириной 1 мм в зоне участка вздутия



**Рис. 4. Разрыв металла катушки КЗ в продольном направлении по всей длине катушки 1270 мм с раскрытием до 150 мм на расстоянии 100 мм от продольного шва**

### Причины образования внутренних вздутий в газопроводе Оренбург – Заинск

В трубах с ликвационными плоскостями под воздействием давления перекачиваемого газа вздутия не могут появиться, так как для этого необходимы сжимающие напряжения, направленные по окружности внутри трубы.

Практически с самого начала эксплуатации на газопроводе начали проявляться многочисленные повреждения [1]. В момент ввода в эксплуатацию по газопроводу транспортировался сырой газ с рабочим давлением 2,6 МПа. При этом перепад давлений в цепочке «скважина – газопровод» составлял около 10 МПа, а температура газа на входе в газопровод в некоторые периоды доходила до минус 38 °С. Таким образом, учитывая подземное расположение газопровода с положительной температурой на внешней поверхности, можно предположить, что скачок температуры по толщине трубопровода мог составлять 50...60 °С.

Температурные напряжения  $\sigma_T$  при таком перепаде температур внутри трубы будут отрицательными и определяются по формуле [13]

$$\sigma_T = \frac{E\alpha\Delta T}{3(1-\nu)(r_n - r_b)} \left[ 3r_b - \frac{2(r_n^3 - r_b^3)}{r_n^2 - r_b^2} \right], \quad (1)$$

где  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости стали;  $\nu = 0$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha = 125 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  – коэффициент температурного расширения стали;  $r_n$  и  $r_b$  – наружный и внутренний радиусы трубы соответственно.

При  $\delta = 14$  мм для трубы наружным диаметром 1020 мм получим  $r_b = 496$  мм и  $r_n = 510$  мм. Сжимающее окружное

напряжение  $\sigma_T^b$  во внутреннем сечении при  $\Delta T = 60$  °С составит 105 МПа.

Заменяя в формуле (1)  $3r_b$  на  $3r_n$ , можно вычислить величину растягивающих напряжений  $\sigma_T^h$  во внешней поверхности трубы. В рассматриваемой задаче определим  $\sigma_T^h = 104,5$  МПа. С учетом незначительности  $\sigma_T^h$  можно предположить, что созданные давлением транспортируемого газа окружные напряжения будут приниматься внешними волокнами. При этом сжимающие температурные напряжения стремятся привести внутренние слои к потере устойчивости.

Если температура в радиальном направлении изменяется по логарифмическому закону, то температурные напряжения на внутренней поверхности будут определяться по формуле [13]

$$\sigma_T^b = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu)\ln \frac{r_n}{r_b}} \left[ 1 - \frac{2r_n^2}{r_n^2 - r_b^2} \ln \frac{r_n}{r_b} \right]. \quad (2)$$

Подставляя численные значения исходных данных в формулу (2), получим  $\sigma_T^b = 113,5$  МПа.

Принимая  $\sigma_T^b$  из условия  $\sigma_T^b \geq \sigma_{кр}$  (где  $\sigma_{кр}$  – критическое значение сжимающего окружного напряжения во внутреннем сечении), можно проверить условия образования вздутий. Для этого участок внутреннего сечения представим как полосу толщиной  $0,5\delta = 7$  мм. Критическое напряжение определим по формуле [14, с. 251–252]

$$\sigma_{кр} = k \frac{E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\delta}{B} \right)^2, \quad (3)$$

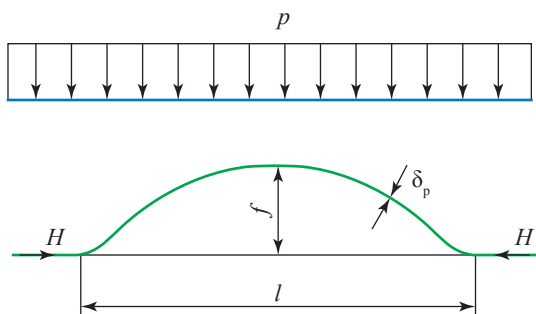
где  $B = 22$  см – ширина полосы;  $k$  – коэффициент, зависящий от размеров вздутия в плане. Например, при равенстве ширины и длины полосы  $k = 9,4$ . Тогда из формулы (3) определим

$$\sigma_{кр} = 113 \text{ МПа} \approx \sigma_T^b.$$

Таким образом, сжимающие температурные напряжения способны образовать вздутие.

Рассмотрим задачу определения давления ( $p$ ), приводящего к схлопыванию внутренних вздутий, встречающихся в газопроводе Оренбург – Заинск (рис. 5).

Рассматривая выпуклую поверхность как цилиндрическую пологую оболочку



**Рис. 5. Расчетная схема внутреннего вздутия в виде тонкостенной оболочки параболической формы с податливыми опорами:  $f$  – стрела подъема оболочки;  $l$  – пролет оболочки;  $\delta_p$  – толщина расслоения**

параболической формы в сечении, определим опорную реакцию ( $H$ ) оболочки на ее единичную длину  $l$ . Получим:

$$H = \sigma_1 \delta_p = \frac{pl^2}{8f}, \quad (4)$$

где  $\sigma_1$  – горизонтальное напряжение в опорном сечении, МПа;  $l = 220$  мм;  $f = 60$  мм;  $\delta_p = 7$  мм.

Приравняв  $\sigma_1 = \sigma_{кр} = 113$  МПа, определим давление схлопывания по формуле (4):

$$p = \frac{8f\sigma_{кр}\delta_p}{l^2} = \frac{8 \cdot 113 \cdot 6 \cdot 0,7}{22^2} = 7,8 \text{ МПа.}$$

Как уже отмечалось, разрушающее давление жидкости при гидравлическом испытании катушек с внутренними вздутиями было

зафиксировано в пределах 9,6 МПа. Можно предположить, что значение  $p = 7,8$  МПа, полученное теоретическим путем, достаточно для того, чтобы вздутие исчезло. Далее при увеличении давления, очевидно, разрушение происходит сначала в опорных сечениях вздутия, а в дальнейшем распространяется в наружную поверхность катушки.

\*\*\*

Таким образом, исследованы трубы магистрального газопровода, имеющие внутренние расслоения и вздутия. Гидравлические испытания трубных катушек с доведением их до разрушения показали, что дефекты в виде расслоений по всему телу катушки приводят к снижению предела прочности стали на 18,5 %, а при наличии вздутий во внутреннюю полость трубы способны снизить его на 41,6 %. Однако с учетом рабочего давления трубопровода, равного 3,4 МПа, указанные дефекты могут быть оставлены в эксплуатации.

Для теоретической оценки несущей способности газопровода с дефектами в виде внутреннего вздутия предложено выбрать, согласно пространственной форме и размерам вздутия, один из возможных вариантов расчетной схемы в виде пологой тонкостенной оболочки, закрепленной по краям на податливых опорах. При близких друг к другу размерах вздутия в плане расчетную схему можно принять в виде тонкостенного купола.

## Список литературы

1. Митрофанов А.В. Анализ причин и характера коррозионных повреждений в начальный период эксплуатации магистрального газопровода / А.В. Митрофанов, Н.А. Гафаров, Б.В. Киченко и др. // Защита от коррозии и охрана окружающей среды. – М: ВНИИОЭНГ, 1996. – № 10. – С. 2–11.
2. Ботвина Л.Р. Безопасность магистральных и технологических трубопроводов: влияние расслоений на их работоспособность / Л.Р. Ботвина, Н.А. Махутов, В.Н. Пермяков // Нефть, газ и бизнес. – 2002. – № 1. – С. 41–46.
3. Гареев А.Г. Исследование водородного охрупчивания металла, приводящего к разрушению металлоконструкции / А.Г. Гареев, О.А. Насибуллина, Р.Г. Ризванов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. – № 1 (107). – С. 107–115.
4. Зорин А.Е. Оценка опасности расслоений металла труб под действием сложного НДС методом математического моделирования / А.Е. Зорин, А.Э. Толстов // Надежность и безопасность эксплуатации линейной части магистральных газонефтепроводов: сб. науч. тр. компании «ЭКСИКОМ». – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2019. – № 2. – С. 65–74.
5. Колотовский А.Н. Работоспособность трубопроводов высокого давления при наличии внутренних расслоений металла / А.Н. Колотовский, А.Я. Яковлев, И.Н. Бирилло и др. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2009. – 224 с.
6. Комаров А.В. Оценка работоспособности нефтегазопроводов с внутренними расслоениями стенок труб: дис. ... к.т.н.: 25.00.19 / А.В. Комаров. – Ухта, 2012. – 161 с.

7. Толстов А.Э. Экспериментальные исследования влияния расслоений металла на работоспособность трубопроводов / А.Э. Толстов, А.Е. Зорин, Е.Е. Зорин // Экспозиция Нефть Газ. – 2018. – №7 (67). – С. 62–65.
8. Конищев К.Б. Особенности механизма коррозионного растрескивания под напряжением металла труб в средах, содержащих сероводород и диоксид углерода / К.Б. Конищев, А.М. Семёнов, А.С. Чабан и др. // Вести газовой науки: науч.-тех. сб. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2019. – № 3 (40): Повышение надежности магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию под напряжением. – С. 60–66.
9. Шинкин В.Н. Остаточные напряжения при экспандировании стальных труб / В.Н. Шинкин // Молодой ученый. – 2015. – № 20. – С.88–93.
10. Шинкин В.Н. Упругопластическая деформация металлического листа на трехвалковых вальцах / В.Н. Шинкин // Молодой ученый. – 2015. – № 13 (93). – С. 225–229.
11. Шинкин В.Н. Расчет максимальных напряжений в стенке трубы при экспандировании с учетом остаточных напряжений заготовки после трубоформовочного пресса SMS Meer / В.Н. Шинкин, А.П. Коликов, В.И. Мокроусов // Производство проката. – 2012. – № 7. – С. 25–29.
12. Алиев М.М. Оценка несущей способности двух магистральных газопроводов после длительной эксплуатации испытанием на разрывную нагрузку / М.М. Алиев, Р.Р. Кантюков, Ф.М. Мустафин и др. // Газовая промышленность. – 2015. – № 12. – С. 56–59.
13. Сопrotивление материалов / под общ. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Вища школа, 1979. – 694 с.
14. Шиманский Ю.А. Справочник по строительной механике корабля / Ю.А. Шиманский. – Л.: Судпромгиз, 1959. – Т. 2. – 529 с.

## Experimental and theoretical determination of bearing capacity for a trunk gas pipeline with laminations and internal swellings

M.M. Aliyev<sup>1\*</sup>, S.P. Zaytsev<sup>2,1</sup>, R.Kh. Sultangareyev<sup>3,1</sup>, M.N. Popova<sup>1</sup>, T.A. Khusnullina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Almet'yevsk State Oil Institute, Bld. 2, Lenina street, Almet'yevsk, Republic of Tatarstan, 423458, Russian Federation

<sup>2</sup> Gazprom Transgaz Kazan LLC, Almet'yevsky Linear Production Department of Main Gas Pipelines, Bld. 1, Bugulminskiy trakt, Lower Maktama, Almet'yevskiy district, Republic of Tatarstan, 423400, Russian Federation

<sup>3</sup> Gazprom Transgaz Kazan LLC, Bld. 41, Adelya Kutuya street, Kazan, Republic of Tatarstan, 420073, Russian Federation

\* E-mail: mmaliev@rambler.ru

**Abstract.** This article examines the load-bearing capacity of the Orenburg–Zainsk gas pipeline affected by various pipe imperfections originated during manufacturing, assembling and operation of tubes. The in-line inspections together with the additional shaft diagnostics enable exposure of the internal tube ballooning like convex faces of different spatial geometry and dimensions. The load-bearing capacity of the defected pipes has been estimated by means of the in situ hydraulic tests and mathematical calculations.

Life testing shows that the ultimate tensile strength of pipe metal drops down by 41,6% when a pipe has both stratifications and internal swellings, and decreases only by 18,5% in case of stratification without changes of pipe geometry. Break of a roll made of a tube from the emergency stock has demonstrated existence of a segregation streamer being a metallurgical damage, and break of another roll with an internal swelling has taken place within a basic section of this swelling.

Determination of the load-bearing capacity of the injured pipes has been fulfilled theoretically using the calculation schemes for shallow shells which work in conditions of a parabolic spandrel until the blubs collapse. The possibility of swelling due to the temperature stresses in course of pipeline operation is also studied.

**Keywords:** gas pipeline, load-bearing capacity, stratification, internal swelling, hydraulic testing.

### References

1. MITROFANOV, A.V., N.A. GAFAROV, B.V. KICHENKO, et al. Analysis of the causes and nature of corrosion damage in the initial period of operation of a main gas pipeline [Analiz prichin i kharaktera korrozionnykh povrezhdeniy v nachalnyy period ekspluatatsii magistralnogo gazoprovoda]. *Zashchita ot korrozii i okhrana okruzhayushchey sredy*, 1996, no. 10, pp. 2–11. ISSN 2411-7013. (Russ.).

2. BOTVINA, L.R., MAKHUTOV, V.N. PERMYAKOV. Safety of main and technological pipelines: the impact of stratifications on their performance [Bezopasnost magistralnykh i tekhnologicheskikh truboprovodov: vliyaniye rassloyniy na ikh rabotosposobnost]. *Neft, Gaz i Bizness*, 2002, no. 1, pp. 41–46. ISSN 2218-4929. (Russ.).
3. GAREYEV, A.G., O.A. NASIBULLINA, R.G. RIZVANOV. Investigation of hydrogen embrittlement of metal leading to destruction of metal structures [Issledovaniye vodorodnogo okhrupchivaniya metalla, privosyashchego k razrusheniyu metallokonstruktsii]. *Problemy Sborn, Podgotovki i Transporta Nefti i Nefteproduktov*, 2017, no. 1 (107), pp. 107–115. ISSN 1998-8443. (Russ.).
4. ZORIN, A.Ye., A.E. TOLSTOV. Assessment of danger of stratification of pipe metal affected by complex stress strain by means of mathematical modeling [Otsenka opasnosti rassloyniya metalla trub pod deystviyem slozhnogo NDS metodom matematicheskogo modelirovaniya]. In: *Reliability and safety of operation of the linear part of the main gas and oil pipelines* [Nadezhnost i bezopasnost ekspluatatsii lineynoy chasti magistralnykh gazonefteprovodov]: collected scientific papers of the EKSİKOM company. Moscow: Gubkin University, 2019, pp. 65–74. (Russ.).
5. KOLOTOVSKIY, A.N., A.Ya. YAKOVLEV, I.N. BIRILLO, et al. *Operability of high-pressure pipelines in presence of internal metal stratifications* [Rabotosposobnost truboprovodov vysokogo davleniya pri nalichii vnutrennikh rassloyniy metalla]. Moscow: TsentrLitNefteGaz, 2009. (Russ.).
6. KOMAROV, A.V. *Assessment of the performance of oil and gas pipelines with internal stratifications of pipe walls* [Otsenka rabotosposobnosti neftegazoprovodov s vnutrennimi rassloyniyami stenok trub]. Candidate thesis (engineering). Ukhta State Technical University. Ukhta, 2012. (Russ.).
7. TOLSTOV, A.E., A.Ye. ZORIN, Ye.Ye. ZORIN. Experimental studies of the influence of metal stratifications on the performance of pipelines [Eksperimentalnyye issledovaniya vliyaniya rassloyniy metalla na rabotosposobnost truboprovodov]. *Ekspozitsiya Neft Gaz*, 2018, no. 7 (67), pp. 62–65. ISSN 2076-6785. (Russ.).
8. KONISHEV, K.B., A.M. SEMENOV, A.S. CHABAN, et al. Specifics of pipe metal stress corrosion within the media containing H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> [Osobennosti mekhanizma korrozionnogo rastreskivaniya pod napryazheniyem metalla trub v sredakh, sodержashchikh serovodorod i dioksid ugleroda]. *Vesti Gazovoy Nauki*: collected scientific technical papers. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC, 2019, no. 3 (40): Improving reliability of gas mains subject to stress corrosion cracking, pp. 60–66. ISSN 2306-8949. (Russ.).
9. SHINKIN, V.N. Residual stresses during expansion of steel pipes [Ostatochnyye napryazheniya pri ekspandirovani stalnykh trub]. *Molodoy Uchenyy*, 2015, no. 20, pp. 88–93. ISSN 072-0297. (Russ.).
10. SHINKIN, V.N. Elastic-plastic deformation of a metal sheet on three-roll rollers [Uprugoplasticheskaya deformatsiya metallicheskogo lista na trekhvalkovykh valtsakh]. *Molodoy Uchenyy*, 2015, no. 13(93), pp. 225–229. ISSN 072-0297. (Russ.).
11. SHINKIN, V.N., A.P. KOLIKOV, V.I. MOKROUSOV. Calculation of maximum stresses in a pipe wall during expansion taking into account residual stresses of the billet after the SMS Meer pipe forming press [Raschet maksimalnykh napryazheniy v stenke trubyy pri ekspandirovani s uchetom ostatochnykh napryazheniy zagotovki posle truboformovochnogo pressa SMS Meer]. *Proizvodstvo Prokata*, 2012, no. 7, pp. 25–29. ISSN 1684–257X. (Russ.).
12. ALIYEV, M.M., R.R. KANTYUKOV, F.M. MUSTAFIN, et al. Evaluation of the bearing capacity of two main gas pipelines after long-term operation by testing for breaking load [Otsenka nesushchey sposobnosti dvykh magistralnykh gazoprovodov posle dlitelnoy ekspluatatsii ispytaniyem na razryvnyuyu nagruzku]. *Gazovaya Promyshlennost*, 2015, no. 12, pp. 56–59. ISSN 0016-5581. (Russ.).
13. PISARENKO, G.S. (ed.). *Resistance of materials* [Soprotivleniye materialov]. Kiyev: Vishcha shkola, 1979. (Russ.).
14. SHIMANSKIY, Yu.A. Handbook of ship construction mechanics [Spravochnik po stroitelnoy mekhanike korablya]. Leningrad: Sudpromgiz, 1959, vol. 2, pp. 251–252. (Russ.).