

Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Вып. 1 (135). С. 78-88. ISSN 1998-8443 (print)

Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2022. Issue 1 (135). P. 78-88. ISSN 1998-8443 (print)

Научная статья

УДК 621.644.07

doi: 10.17122/ntj-oil-2022-1-78-88

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА, УСИЛЕННОГО БАНДАЖОМ

Роберт Артурович Рамазанов¹, Игорь Финсурович Кантемиров²,

Денис Алексеевич Гулин³, Индира Фанилевна Махмудова⁴

^{1,2,3,4}Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

¹ramarobert@yandex.ru

²ikant@mail.ru

³denis.ufa@list.ru

⁴maxmudova_indira@bk.ru

Автор, ответственный за переписку: Индира Фанилевна Махмудова,
maxmudova_indira@bk.ru

Аннотация. В статье описана методика расчета напряженно-деформированного состояния дефектного трубопровода с бандажом, который может применяться для его ремонта. В работе анализируется влияние механических характеристик материала бандажа на его толщину, а также ее зависимость от коэффициента концентрации напряжений.

Целью работы является разработка методики расчета для обеспечения безопасной эксплуатации магистрального трубопровода при нанесении на него бандажа.

Задачи:

1. выбрать расчетную схему для системы «трубопровод - бандаж»;

2. рассмотреть факторы, влияющие на напряженное состояние бандажа;

3. определить наиболее эффективные материалы и минимальные толщины бандажа в зависимости от их характеристик.

В соответствии с целью и основными задачами исследования применялись методы анализа нормативно-технической документации и научно-исследовательских работ, а также последующее сравнение и обобщение результатов.

По итогам проведенных исследований выявлено, что выбор расчетной схемы системы «трубопровод - бандаж» основывается на времени монтажа бандажа на трубопровод: до или после запуска трубопровода в эксплуатацию.

В результате анализа представленных на рынке полимерных материалов, используемых для ремонта трубопроводов, получена зависимость минимальной толщины стенки от механических характеристик материала дефекта через коэффициент концентрации напряжений.

Поскольку материал бандаж рассматривался как непластичный, то для повышения эффективности использования прочностных свойств материала определена необходимость расчета напряженного состояния бандаж с учетом упругопластической работы его материала.

Ключевые слова: бандаж, напряженно-деформированное состояние, предельное давление, деформационная теория пластичности

Для цитирования: Рамазанов Р. Р., Кантемиров И. Ф., Гулин Д. А., Махмудова И. Ф. Расчет напряженно-деформированного состояния трубопровода, усиленного бандажом // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022. Вып. 1 (135), С. 78-88. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-1-78-88>.

Original article

CALCULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A PIPELINE REINFORCED WITH A BANDAGE

Robert R. Ramazanov¹, Igor F. Kantemirov², Denis A. Gulin³, Indira F. Makhmudova⁴

^{1,2,3,4}Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

¹ramarobert@yandex.ru

²ikant@mail.ru

³denis.ufa@list.ru

⁴maxmudova_indira@bk.ru

Corresponding author: Indira F. Makhmudova, maxmudova_indira@bk.ru

Abstract. The article describes a method for calculating the stress-strain state of a defected pipeline with a bandage, which can be used for its repair. The paper analyzes the influence of the mechanical characteristics of the bandage material on its thickness, as well as

how it depends on the stress concentration factor.

The aim of the work is to develop a calculation methodology to ensure the safe operation of the main pipeline when a bandage is applied to it.

Tasks:

1. To choose a design scheme for the «pipeline-bandage» system;
2. To consider the factors influencing the stress state of the bandage;
3. To determine the most effective materials and minimum thickness of the band depending on their characteristics.

In accordance with the purpose and main objectives of the study, methods of analysis of normative and technical documentation, scientific articles and monographs, as well as subsequent comparison and generalization of the results were applied.

Based on the results of the studies, it was revealed that the choice of the design scheme of the «pipeline - shroud» system is based on the time of the shroud installation on the pipeline: before or after the pipeline is put into operation. As a result of the analysis of the polymer materials available on the market used for the repair of pipelines, the dependence of the minimum wall thickness on the mechanical characteristics of the defect material through the stress concentration factor was obtained. Since the material of the band was considered as non-plastic, in order to increase the efficiency of using the strength properties of the material, the necessity of calculating the stress state of the band, taking into account the elastic-plastic work of its material, was determined.

Keywords: bandage, stress-strain state, limit pressure, deformation plasticity theory

For citation: Ramazanov R. R., Kantemirov I. F., Gulin D. A., Makhmudova I. F. Raschet napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya truboprovoda, usilennogo bandazhom. [Calculation of the Stress-Strain State of a Pipeline Reinforced with a Bandage]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov - Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2022, Issue 1 (135), pp. 78-88. <http://doi.10.17122/ntj-oil-2022-1-78-88>.

В настоящее время новые магистральные трубопроводы строятся значительно реже по сравнению с концом XX века, основная часть трубопроводов была построена более 20 лет назад, в связи с чем происходит постоянное увеличение объемов работ по ремонту и реконструкции объектов магистральных трубопроводов. Длительная эксплуатация трубопроводов непременно приводит к старению и, следовательно, к появлению дефектов и снижению несущей способности трубопроводных конструкций. Все выявленные дефекты по ремонтпригодности принято разделять на дефекты первоочеред-

ного ремонта и дефекты, не подлежащие ремонту.

Для сокращения сроков производства ремонтных работ на локальных дефектах металла трубы предлагается использовать композитные усиливающие бандажи, которые уже нашли своё применение для увеличения несущей способности участка трубопровода, например в стесненных условиях с принудительно сокращенной охранной зоной [1].

Такое использование подразумевает расчет по методу «монтаж до эксплуатации», расчетная схема представлена на рисунке 1.

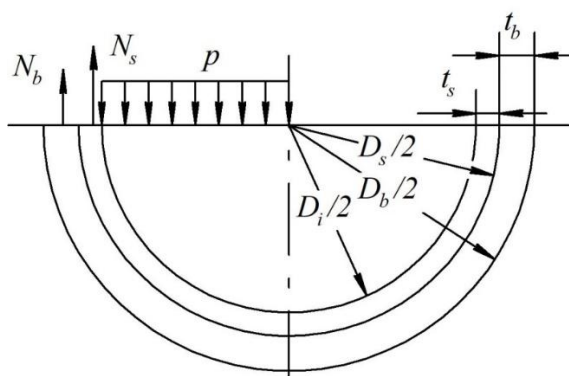


Рисунок 1. Равновесие полукольца, вырезанного из трубы, при действии внутреннего давления (для повышения несущей способности трубопровода)

Figure 1. Equilibrium of a half-ring cut out of a pipe under the action of internal pressure (to increase the bearing capacity of the pipeline)

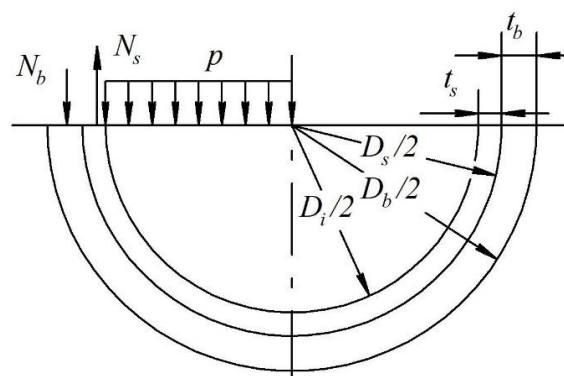


Рисунок 2. Равновесие полукольца, вырезанного из трубы, при действии внутреннего давления (при ремонте участка трубопровода)

Figure 2. Equilibrium of a half-ring cut out of a pipe under the action of internal pressure (when repairing a pipeline section)

В этом случае бандаж монтируют на сваренную и заизолированную плетть трубопровода.

Материал бандажа испытывает на себе растягивающие нагрузки.

Исходными данными служат прочностные характеристики материала бандажа, известное значение усилия натяжения и проектное значение рабочего давления в трубопроводе.

В результате расчета получаем толщину бандажа, которая обеспечит необходимое увеличение несущей способности трубопровода.

Монтаж бандажа по методу «на эксплуатируемый трубопровод» обеспечит совершенно иную работу системы «бандаж - труба».

Бандаж также будет растягиваться, но в то же время оказывать сжимающее усилие на трубопровод, за счет чего и появляется возможность работы трубопровода в рабочем режиме.

Расчетная схема представлена на рисунке 2.

Цель расчета - обеспечить безопасную эксплуатацию магистрального трубопровода при нанесении на него бандажа по второму методу.

Результатом прочностного расчета будет являться определенное значение минимальной толщины бандажа, изготовленного из материала с известными прочностными характеристиками. Кроме того, должны быть известны геометрические характеристики трубопровода, вид и размеры дефекта, а также минимальное давление, которое должен выдержать трубопровод для дальнейшей эксплуатации.

Рассмотрим равновесие полукольца системы «трубопровод - бандаж» при действии внутреннего давления (при ремонте участка трубопровода) в кольцевом направлении, которое будет описываться следующим выражением:

$$\sigma_{2s} \cdot t_s - \sigma_{2b} \cdot t_b = \frac{pD_i}{2}, \quad (1)$$

где σ_{2s} - кольцевое напряжение в стали, МПа;

t_s - толщина стенки трубопровода, м;

σ_{2b} - кольцевое напряжение в материале бандажа, МПа;

t_b - толщина бандажа, м;

p - внутреннее давление в трубопроводе, МПа;

D_i - внутренний диаметр трубопровода, м.

Кольцевые напряжения, возникающие в месте дефекта, предлагается учесть использованием коэффициента концентратора напряжений

$$\sigma_{2s} = \alpha_{\sigma} \cdot \frac{pD_i}{2}, \quad (2)$$

где α_{σ} - коэффициент концентрации напряжений.

Сам коэффициент концентрации напряжений вычисляется в зависимости от вида дефекта (коррозионные язвы, механические риски, царапины, надрезы и задиры, характеризующиеся длиной l , шириной d , глубиной h и радиусом закругления в вершине ρ для трубы с толщиной стенки t_s).

Расчет толщины бандажа, а точнее количества слоев наматываемого материала предлагается производить в зависимости от его прочностных характеристик.

Допустимое значение напряжения в бандаже определим как предел упругости бандажа с учетом напряжений, возникающих при намотке. В результате получено следующее соотношение для количества слоев бандажа:

$$n = \frac{pD_i}{2} \cdot \frac{\alpha_{\sigma} - 1}{\sigma_{u2b}t_{b0} - N}, \quad (3)$$

где n - количество слоев;

t_{b0} - толщина слоя бандажа;

σ_{u2b} - предел упругости бандажа в кольцевом направлении;

N - усилие натяжения рулонных материалов.

Полученное значение необходимо округлить в большую сторону для предотвращения перенапряжения в сечении материала бандажа.

Для оценки реального напряженно-деформированного состояния системы трубопровод-бандаж предлагается к уравнению (1) сделать добавку и уже при известном значении толщины бандажа оценить работу стали и бандажа в продольном и кольцевом направлениях.

Будем считать материал бандажа непластичным материалом, тогда его свойства подчиняются закону Гука. Также принимается, что сталь в продольном направлении не достигает пластических деформаций. При абсолютной адгезии в условиях эксплуатации деформации трубы и бандажа равны друг другу как в продольном, так и в кольцевом направлениях.

Выразим деформацию в кольцевом направлении:

$$\varepsilon_2 = \frac{1 - \nu_{12b}\nu_{21b}}{E_{2b}} \cdot \sigma_{2b} - \frac{\nu_{12b}}{E_{0s}} \cdot (\sigma_{1s} - \nu_{0s} \cdot \sigma_{2s}), \quad (4)$$

где E_{2b} - модуль Юнга анизотропного материала бандажа в кольцевом направлении, МПа;

ν_{21b} - коэффициент Пуассона от действия кольцевого напряжения в продольном направлении анизотропного материала бандажа;

ν_{12b} - коэффициент Пуассона от действия продольного напряжения в кольцевом направлении анизотропного материала бандажа.

E_{0s} - модуль Юнга стали в упругой области, МПа;

ν_{0s} - коэффициент Пуассона стали в упругой области.

Среднее нормальное напряжение стали при плоском напряженном состоянии не учитывает влияние радиальной составляющей. Средняя линейная деформация связана со средним нормальным напряжением соотношением объемной упругости.

В рамках деформационной теории пластичности упругопластическое деформирование трубы может быть описано следующим равенством

$$2\sigma_{2s} - \sigma_{1s} = 2 \cdot \frac{\sigma_{is}}{\varepsilon_{is}} \cdot \left(\varepsilon_2 - \frac{1 - 2\nu_{0s}}{E_{0s}} \cdot \frac{\sigma_{1s} + \sigma_{2s}}{3} \right), \quad (5)$$

где σ_{is} - интенсивность нормальных напряжений в стали, МПа;

ε_{is} - интенсивность линейных деформаций стали.

Интенсивность нормальных напряжений стали описывается следующим выражением:

$$\sigma_{is} = \sqrt{\sigma_{1s}^2 + \sigma_{2s}^2 - \sigma_{1s}\sigma_{2s}}. \quad (6)$$

Продольное напряжение в трубопроводе от действия внутреннего давления и температурного перепада определяются как:

$$\sigma_{1s} = \nu_s \frac{pD_i}{2t_s} - \alpha E_s \Delta t \pm \frac{E_s (D_i + 2t_s)}{2\rho}, \quad (7)$$

где ν_s - переменный коэффициент Пуассона стали;

E_s - переменный модуль Юнга стали, МПа;

α - коэффициент линейного расширения металла трубы, град⁻¹;

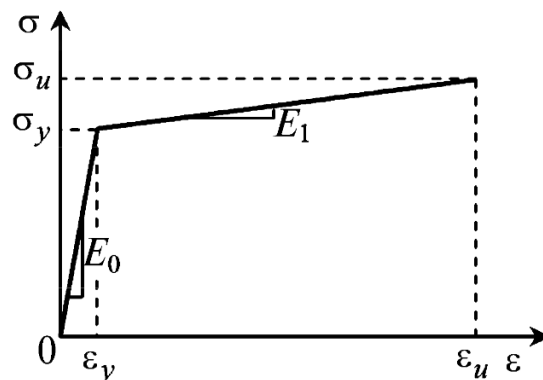
Δt - расчетный температурный перепад, принимаемый положительным при нагревании, °С;

ρ - минимальный радиус упругого изгиба оси трубопровода, м.

Для стали переменный коэффициент Пуассона и переменный модуль Юнга рас-

считываются по известным формулам, приведенным в [2].

Примем аппроксимированную до билинейной зависимости диаграмму «напряжение - деформация» трубопроводной стали (рисунок 3).



E_0 - модуль упругости стали;

E_1 - касательный модуль на участке упругопластического деформирования;

σ_y и ε_y - напряжение и деформация точки перехода на участок упругопластического деформирования;

σ_u и ε_u - напряжение и деформация, соответствующие пределу прочности материала стальной трубы

Рисунок 3. Аппроксимированная диаграмма одноосного растяжения стали при деформировании в кольцевом направлении

Figure 3. Approximate diagram of uniaxial tension of steel during deformation in the annular direction

Проблема определения значения напряжения течения не решена. В литературе приводятся конкретные величины для различных марок стали и форм дефектов.

Теоретической зависимости нет, и величину напряжения течения определяют, как

правило, экспериментально. Так как интенсивность напряжений - это приведенная интенсивность касательных напряжений, выраженная через эквивалентное нормальное напряжение при простом растяжении, т.е. эквивалентное напряжение растяжения, то справедлива следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon_{is} = \frac{2\sigma_{is}}{3E_{0s}}(1 + 2\nu_{0s}) & \text{при } \sigma_{is} \leq \sigma_y, \\ \varepsilon_{is} = \frac{\sigma_{is} - \sigma_y}{E_{1s}} + \frac{\sigma_y}{E_{0s}} & \text{при } \sigma_{is} > \sigma_y. \end{cases} \quad (8)$$

Касательный модуль упругости E_{1s} по упрощенной диаграмме численно равен тангенсу угла наклона касательной, проведенной из точки текучести в точку разрыва, и рассчитывается по следующей формуле [3]:

$$E_{1s} = \frac{\sigma_u \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) - \sigma_y}{\ln \left(1 + \frac{\delta}{100}\right) - \varepsilon_y}, \quad (9)$$

где δ - относительное удлинение.

Анизотропный материал бандажа предполагает различные свойства в различных направлениях. По правилу смесей найдется значения модуля Юнга вдоль и поперек волокон [4].

Коэффициент Пуассона можно также рассчитать по правилу смесей в направлении вдоль волокна, а в поперечном направлении - при условии ортотропности материала по соотношению между модулями Юнга и коэффициентами Пуассона [4, 5].

Предельное давление, которое может испытывать трубопровод при наличии дефекта, МПа [6]:

$$P_u = \frac{\sigma_m t_s}{R} \cdot \frac{A_0 - A}{A_0 - A \cdot M^{-1}}, \quad (10)$$

где σ_m - предел текучести, при билинейной зависимости «напряжение-деформация» примем $\sigma_m = \sigma_y$, МПа;

R - радиус трубы, м;

A - площадь потери металла на проекции дефектного участка в продольном сечении стенки трубы, мм²;

A_0 - первоначальная (без коррозии) площадь продольного сечения стенки трубы по длине дефектного участка, мм²;

M - коэффициент Фолиаса.

Для оценки напряженно-деформированного состояния системы «трубопровод - бандаж» необходимо определить также заводское испытательное давление (формула приведена в [2]). Меньшее из определенных давлений (заводское испытательное или предельное для трубы с дефектом) принимается для расчета.

Расчет производится при помощи численных методов.

Оценим адекватность представленной методики расчета для различных материалов бандажа. В качестве дефекта была выбрана риска на внешней поверхности металла трубопровода. Такой дефект классифицируется как «короткий».

Остальные исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Для наглядности представим результаты расчета в виде графика (рисунок 4), показывающего зависимость толщины бандажа от выбранного материала при различных значениях коэффициента концентрации напряжений:

- предел прочности бандажа от 100 до 1600 МПа;
- коэффициент концентрации напряжений от 1,5 до 3,5.

Полученные значения минимальной толщины бандажа могут найти практическое применение для известных значений предела прочности бандажа. Для этого были проанализированы представленные на рынке полимерные материалы, используемые для ремонта трубопроводов. Характеристики материалов представлены в таблице 2.

Таблица 1. Исходные данные для расчета
Table 1. Initial data for calculation

Диаметр трубопровода D , мм	1220
Толщина стенки t_s , мм	20
Усилие натяжения рулонных материалов N , кН/м	1,472
Внутреннее давление в трубопроводе P , МПа	7,5
Предел прочности стали σ_{us} , МПа	550
Предел текучести стали σ_{ys} , МПа	410

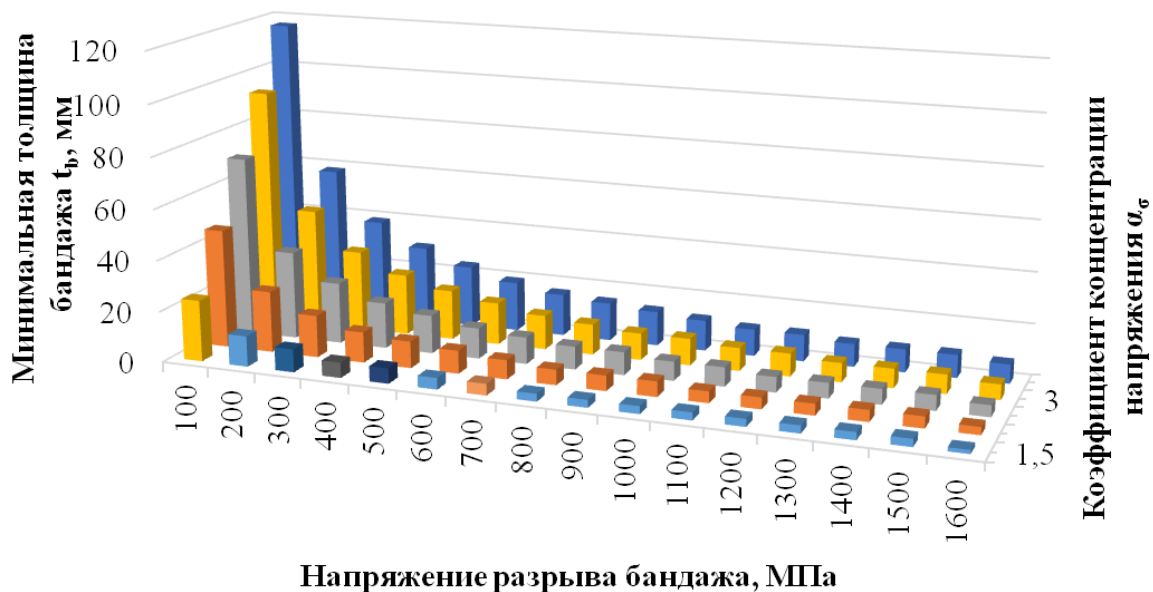


Рисунок 4. Зависимость напряжения разрыва бандажа от минимальной толщины бандажа и коэффициента концентрации напряжения

Figure 4. Dependence of the bandage rupture stress on the minimum bandage thickness and the stress concentration factor

Таблица 2. Технические характеристики материалов
Table 2. Material specifications

Материал	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Углепластик (лента) АО «Композит»	900	150	0,265
Органопластик АО «Композит»	1600	80	0,34
Стеклопластик АО «Композит»	600	50	0,28
Стеклопластик (эпоксидный полимер 5-211Б и Е стекло)	200	24,26	0,15
КСЛ	350÷684	21,6÷28,0	0,3
ГАРС	950÷1390	24,8÷52,0	0,3
ГАРС-2	600	38	0,3
ГРС	900	52	0,3
УОЛ-301-1	1370	140	0,3
Манжеты Clock Spring	900	38	0,3
Стеклопластик ВПС-53/120	460	21,7	0,28
Лента Политерм	12	0,2	0,4
Материал манжет фирмы WrapMaster	620,5	34,4375	0,4

Выводы

1. Расчет напряженно-деформированного состояния бандажа должен определяться правильным выбором расчетной схемы системы «бандаж - труба».

2. Для полного использования прочностных свойств материала в дальнейшем рекомендуется рассмотреть напряженное состояние бандажа с учетом упругопластической работы его материала.

3. Применение бандажа для ремонта дефектов должно определяться возможностями используемых машин, а также возможностью использования бандажа для ремонта тех или иных дефектов с известными значениями коэффициентов концентрации напряжений. Рекомендуется также проводить технико-экономическое обоснование для каждого типа дефектов с учетом характеристик полимерного материала бандажа.

Список источников

1. Лобова Е.А., Гулин Д.А., Фазлетдинов Р.А., Мусалымов Р.Р. Эффективность применения композитных полимерных бандажей при строительстве и ремонте трубопроводов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 1. С. 30-36.
2. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой, ФАУ ФЦС, 2013. 92 с.
3. Васильев В.А., Самошин А.В. Обзор возможностей современных САЕ-программ и при-

References

1. Lobova E.A., Gulin D.A., Fazletdinov R.A., Musalyamov R.R. Effektivnost' primeneniya kompozitnykh polimernykh bandazhei pri stroitel'stve i remonte truboprovodov [Efficiency of Application of Polymer Composite Bandages in the Construction and Repair of Pipelines]. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodородного syr'ya - Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*, 2018, No. 1, pp. 30-36. [in Russian].
2. SP 36.13330.2012. Magistral'nye truboprovody

ближенных методик аппроксимации диаграмм « σ - ϵ » для решения задач упругопластического деформирования // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3 (21). С. 108-114. DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-15.

4. Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Прогнозирование эффективности ремонта элементов магистральных трубопроводов посредством композиционных бандажей // Математическое моделирование и информационные технологии в сварке и родственных процессах: матер. VII Международ. конф. / Под ред. И.В. Кривцуна. Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2014. С. 83-89.

5. Смердов А.А. Возможности управления коэффициентами Пуассона современных многослойных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2011. № S1. С. 52-60.

6. Филатов А.А., Кочетов В.И., Велиулин И.И., Хасанов Р.Р. Восстановление работоспособности дефектных труб с помощью упрочняющих конструкций // Территория «Нефтегаз». 2018. № 7-8. С. 36-40.

[SP 36.13330.2012. Trunk Pipelines]. Moscow, Gosstroj, FAU FTsS Publ., 2013. 92 p. [in Russian].

3. Vasilev V.A., Samoshin A.V. Obzor vozmozhnostei sovremennykh SAE-programm i priblizhennykh metodik approksimatsii diagramm « σ - ϵ » dlya resheniya zadach uprugoplasticheskogo deformirovaniya [The Review of Modern CAE-Programs and the Approached Approximation Techniques of Diagrams « σ - ϵ » for the Decision Problems of Elastic-Plastic Deformation]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' - Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2017, No. 3 (21), pp. 108-114. DOI: 10.21685/2307-5538-2017-3-15. [in Russian].

4. Milenin A.S., Velikoivanenko E.A., Rozyinka G.F., Pivtorak N.I. Prognozirovaniye effektivnosti remonta elementov magistral'nykh truboprovodov posredstvom kompozitsionnykh bandazhei [Forecasting the Efficiency of Repair of Main Pipeline Elements Using Composite Bandages]. *Materialy VII Mezhdunarodnoi konferentsii «Matematicheskoe modelirovaniye i informatsionnyye tekhnologii v svarke i rodstvennykh protsessakh»* [Proceedings of the VII International Conference «Mathematical Modeling and Information Technologies in Welding and Related Processes»]. Ed. by I.V. Krivtsuna. Kiev, Mezhdunarodnaya assotsiatsiya «Svarka» Publ., 2014, pp. 83-89. [in Russian].

5. Smerdov A.A. Vozmozhnosti upravleniya koeffitsientami Puassona sovremennykh mnogoslownykh kompozitsionnykh materialov [Possibilities of Management of Poisson's Factors of Modern Multilayered Composites]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroeniye - Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2011, No. S1, pp. 52-60. [in Russian].

6. Filatov A.A., Kochetov V.I., Veliyulin I.I., Khasanov R.R. Vosstanovleniye rabotosposobnosti defektnykh trub s pomoshch'yu uprochnyayushchikh konstruksii [Restoration of the Defective Pipes Operational Condition with Strengthening Constructions]. *Territoriya «Neftegaz» - Oil and Gas Territory*, 2018, No. 7-8, pp. 36-40. [in Russian].

Информация об авторах

• Рамазанов Роберт Артурович
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Аспирант кафедры «Проектирование
и строительство объектов нефтяной и газовой
промышленности»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 8/3
e-mail: ramarobert@yandex.ru

Information about the authors

• Ramazanov Robert A.
Ufa State Petroleum Technological University
Postgraduate Student of Design and Construction
of Oil and Gas Industry Facilities Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: ramarobert@yandex.ru

• Кантемиров Игорь Финсурович, д-р техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Заведующий кафедрой «Проектирование
и строительство объектов нефтяной и газовой
промышленности»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 8/3
e-mail: ikant@mail.ru

• Kantemirov Igor F., Doctor of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Head of Design and Construction
of Oil and Gas Industry Facilities Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: ikant@mail.ru

• Гулин Денис Алексеевич, канд. тех. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Проектирование
и строительство объектов нефтяной и газовой
промышленности»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 8/3
e-mail: denis.ufa@list.ru

• Gulin Denis A., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Design and Construction
of Oil and Gas Industry Facilities Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: denis.ufa@list.ru

• Махмудова Индира Фанилевна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Аспирант кафедры «Проектирование
и строительство объектов нефтяной и газовой
промышленности»
Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 8/3
e-mail: maxmudova_indira@bk.ru

• Makhmudova Indira F.
Ufa State Petroleum Technological University
Postgraduate Student of Design and Construction
of Oil and Gas Industry Facilities Department
8/3, Kosmonavtov str., Ufa, 450064, Russia
e-mail: maxmudova_indira@bk.ru

Статья поступила в редакцию 10.11.2021; одобрена после рецензирования 15.12.2021; принята к публикации 10.01.2022.

The article was submitted 10.11.2021; approved after reviewing 15.12.2021; accepted for publication 10.01.2022.