

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
(технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2021-6-112-124

УДК 532.542:622.692.4–044.382

Оценка величины утечек через сквозной дефект трубопровода при использовании внутритрубных ремонтных элементов

Е. С. Торопов^{1*}, С. М. Дорофеев², С. Ю. Торопов¹, Е. М. Сорокина²,
Т. Г. Пономарева¹

¹Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

²Тюменское высшее военное инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, г. Тюмень, Россия

*e-mail: toropoves@tyuiu.ru

Аннотация. Потери углеводородов при использовании внутритрубных ремонтных элементов определяются характером течения жидкости в зазоре между трубой и ремонтной гильзой. Точный аналитический расчет параметров течения для реальной гильзы, с учетом ее длины, несимметричности дефекта и других конструктивных особенностей, весьма сложен. В данной статье решена задача точного расчета радиального течения вязкой несжимаемой жидкости в тонком слое между двумя кольцевыми пластинами, имитирующими круговую область с центром, совмещенным с дефектом трубопровода. Область представляет собой две окружности, образованные стенкой трубопровода со сквозным дефектом и поверхностью внутреннего ремонтного элемента. Полученные результаты позволят провести точные расчеты в области, прилегающей к дефекту трубы, и приблизительные расчеты для всего ремонтного элемента.

Ключевые слова: трубопровод; дефекты; утечки; внутритрубный ремонтный элемент; вязкая несжимаемая жидкость; уравнения гидромеханики

Estimation of the value of leaks through a through defect of the pipeline when using in-pipe repair elements

Evgeny S. Toropov¹, Sergey M. Dorofeev², Sergey Yu. Toropov¹,
Elena M. Sorokina², Tatyana G. Ponomareva¹

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

²Tyumen Higher Military Engineering Command School named after Marshal of Engineering Troops A. I. Proshlyakov, Tyumen, Russia

*e-mail: toropoves@tyuiu.ru

Abstract. The loss of hydrocarbons when using in-pipe repair elements is determined by the nature of the fluid flow in the gap between the pipe and the repair sleeve. An accurate analytical calculation of the flow parameters for a real sleeve, taking into account its length, the asymmetry of the defect and other design features, is very difficult. In this article, the problem of accurate calculation of the radial flow of a viscous incompressible fluid in a thin layer between two annular plates simulating a circular region with a center coincide with a pipeline defect is solved. The area consists of two circles formed by the pipeline wall with a through defect and the surface of the internal repair element. The results obtained will allow us for accurate calculations in the area adjacent to the defect of the pipe and approximate calculations for the whole repair element.

Key words: pipeline; defects; leaks; in-pipe repair element; viscous incompressible fluid; equations of hydromechanics

Введение

Существующая система транспорта углеводородов РФ включает в себя более 160 тысяч километров магистральных газопроводов, около 60 тысяч километров магистральных нефтепроводов и сотни тысяч километров промысловых и межпромысловых газонефтепроводов. Для обеспечения стабильной работы всего нефтегазового комплекса необходима система, обеспечивающая бесперебойную эксплуатацию трубопроводов, в том числе на основе проведения необходимых ремонтных и профилактических работ. Ремонт трубопроводов существующими технологиями без остановки перекачки предусматривает ремонт только наружных дефектов потери металла и замену изоляционного покрытия. Все работы при этом ведутся открытым способом. Труднодоступные участки трассы, такие как переходы через водные преграды, обводненные и заболоченные территории могут быть восстановлены только с применением спецоборудования и спецтехники и при сезонности производства работ [1–3].

В последнее время для прокладки трубопроводов через водные преграды применяется в основном способ наклонно направленного бурения (ННБ). Существующие технологии и оборудование позволяют прокладывать трубопроводы для всех типоразмеров труб, включая 1 420 мм. При сооружении переходов через водные преграды заглубление трубопроводов от дна водоема может составлять десятки метров, что исключает их повреждение внешним механическим воздействием и обеспечивает безопасную эксплуатацию [4]. Обладая очевидными преимуществами, позволяющими значительно сократить сроки строительства, затраты на сооружение переходов и обеспечить экологическую безопасность сооружаемых объектов, переходы, построенные методом ННБ, имеют существенный недостаток — они неремонтопригодны. Это означает, что на сегодняшний день в отечественной практике ремонта трубопроводов не существует полностью отработанных технологий, позволяющих проводить локальный ремонт трубопроводов, выполненных наклонно направленным бурением.

В отечественной литературе вопросы внутритрубного ремонта рассматриваются в основном применительно к системам водоотведения и водоснабжения [5–13]. Первые относятся к самотечным системам и не могут

служить основой для создания технологий ремонта напорных трубопроводов, которые имеют, как правило, малые диаметры и городские условия прокладки, что значительно сужает область применения внутритрубных методов ремонта.

Зарубежная практика внутритрубного ремонта трубопроводов выделяет несколько технологий, основными из которых являются установка гильз на локальных дефектах трубы [14] или полимерных «чулков» для протяженных участков трубопроводов длиной в сотни метров [15, 16]. Как правило, это конструкционные и технологические решения профильных фирм, обоснованные только практическим опытом их применения. Предлагаемый способ локального ремонта трубопроводов базируется на применении ремонтных элементов в виде цилиндрических гильз, установленных с минимально возможным зазором в зоне дефекта, создающим большое гидравлическое сопротивление. Это позволяет свести к минимуму расход транспортируемого продукта через дефект трубы и создать минимальный перепад давления на входе в дефект и внешней поверхности трубопровода.

Для разработки физической и математической модели внутритрубного ремонтного элемента (ВРЭ) необходимо теоретическое обоснование области изменения основных параметров течения, особенно в зоне дефекта [17], где эти изменения наиболее существенны, с выходом на значения параметров, при которых расход транспортируемого продукта через сквозной дефект стенки трубопровода был бы минимизирован или сведен к нулю. Так как реальные поверхности трубопровода имеют значительную шероховатость, особенно после длительной эксплуатации, зазор между внешней поверхностью гильзы и внутренней поверхностью трубопровода имеет сложную форму. Для упрощения расчетов считаем, что зазор имеет цилиндрическую форму и постоянную толщину δ .

Цель данной статьи — оценка величины утечек перекачиваемого продукта в трубопроводе со сквозным дефектом при использовании внутритрубных ремонтных элементов.

Объект и методы исследования

В принятой постановке условия работы ВРЭ следующие:

- давление на торцевых зазорах между внутренней стенкой трубопровода и внешней поверхностью ВРЭ в начале и в конце ремонтного элемента постоянно по всей площади зазора;
- давление на концевых участках ВРЭ при входе в зазор равно давлению в дефектном сечении трубопровода, то есть входные давления потока жидкости на концевых участках ВРЭ приняты равными между собой ввиду незначительной длины ремонтного элемента и, соответственно, малых значений перепада давления;
- истечение жидкости из области зазора происходит через дефект в трубопроводе в точке равноудаленной от концевых сечений;
- гидравлическим сопротивлением дефекта пренебрегаем.

Но даже в такой идеализированной постановке аналитическое решение задачи об определении расхода жидкости через дефект трубопровода является достаточно серьезной проблемой.

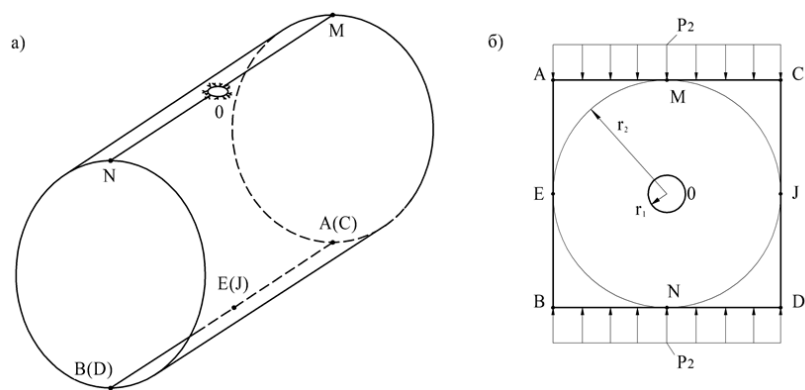


Рис. 1. Развертка участка трубопровода с ВРЭ

Для упрощения модели ВРЭ зададим ее длину (AB) равной длине окружности трубопровода, то есть $AB = L_{\text{окр}}$, как показано на рисунке 1 а. На рисунке 1 б показана развертка ВРЭ на плоскость. Выделим круговую область с центром, совмещенным с дефектом трубопровода. Она представляет собой две окружности, образованные стенкой трубопровода (с дефектом, моделируемым отверстием радиусом r_1) и внешней поверхностью ВРЭ. Зазор δ между внутренней поверхностью трубопровода и внешней поверхностью ВРЭ будем считать постоянным. Радиус выделенной области определяем, как половину длины окружности трубопровода в данном сечении. Развертка участка ВРЭ показана на рисунке 1 б.

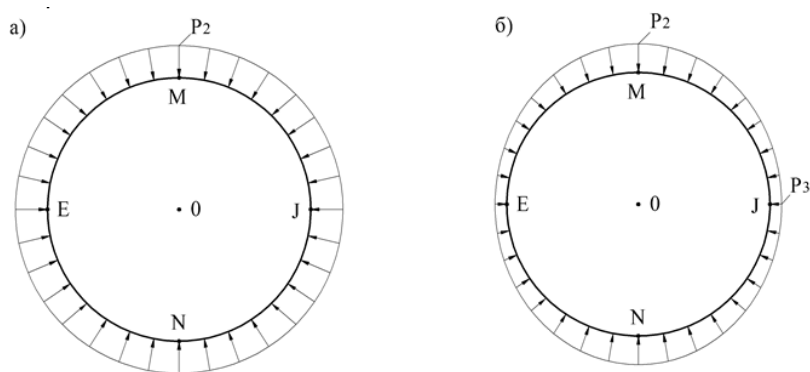


Рис. 2. Распределение давления на входе в зазор δ :
а) — расчетное; б) — фактическое

По условиям работы элемента должно соблюдаться равенство давлений по всей длине зазора между внутренней стенкой трубопровода и внешней поверхностью ВРЭ, в данном случае P_2 — входное давление в концевых сечениях трубопровода и ВРЭ (рис. 2 а). Если рассматривать эпюру фактических давлений в выделенной мнимой круговой области, то она должна иметь вид, показанный на рисунке 2 б, то есть в точках М и N давление будет равным давлению в концевых зазорах P_2 . По мере перемещения от точек М и N по окружности от края гильзы с давлением P_2 к его централь-

ной части к точкам Е и J давление должно падать, достигая в этих точках минимума. Падение давления обусловлено сопротивлением, преодолеваемым потоком жидкости от края ВРЭ до точек на выделенной мнимой окружности.

При расчетах давление по всей длине окружности принимается максимальным и равным P_2 (рис. 2 б). Так как основной целью подбора параметров является минимизация расхода, определяемого перепадом давлений, то полученные численные данные будут иметь некоторый запас в сторону увеличения расхода по сравнению с фактическим.

Рассмотрим задачу о радиальном течении вязкой несжимаемой жидкости в тонком слое толщиной δ между двумя кольцевыми пластинами (рис 3). Внутренний радиус колец r_1 , внешний r_2 . На внутренней поверхности слоя радиуса r_1 поддерживается давление P_1 , на внешней поверхности радиуса r_2 — давление P_2 .

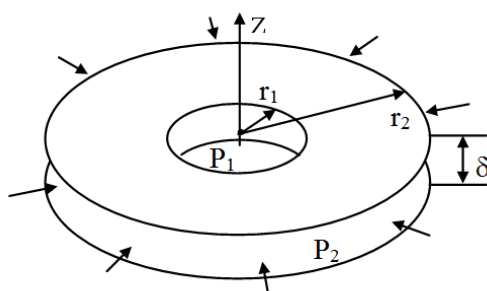


Рис. 3. Течение жидкости в тонком слое

Уравнения гидромеханики для вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат приведены в [18].

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial(rV_z)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Уравнения движения (Навье — Стокса)

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\phi}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \phi} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\phi^2}{r} \right) = \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\nabla^2 V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial V_\phi}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\phi}{\partial r} + \frac{V_\phi}{r} \frac{\partial V_\phi}{\partial \phi} + V_z \frac{\partial V_\phi}{\partial z} - \frac{V_r \cdot V_\phi}{r} \right) = \\ = -\frac{\partial P}{\partial \phi} + \mu \left(\nabla^2 V_\phi + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \phi} - \frac{V_\phi}{r^2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\varphi}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 V,$$

где r, φ, z — цилиндрические координаты; V_r, V_φ, V_z — проекции вектора скорости на оси цилиндрической системы координат; P — давление жидкости; ρ — плотность; μ — динамическая вязкость;

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — Лапласиан в цилиндрической системе координат.

Граничные условия:

$$P(r_1) = P_1, \quad P(r_2) = P_2, \quad V(\delta/2) = V(-\delta/2) = 0. \quad (3)$$

Течение будем считать установившимся, поэтому $\partial V / \partial t = 0$, и никаких начальных условий не требуется.

В силу симметрии должны выполняться следующие условия:

$$V_r = V_r(r, \varphi), \quad V_\varphi = 0. \quad (4)$$

В рассматриваемых задачах скорость течения жидкости V небольшая, число Рейнольдса $Re = V\delta/\nu < 1000$, где $\nu = \mu/\rho$ — кинематическая вязкость, поэтому течение ламинарное [9]. Слои жидкости не перемешиваются и приближенно можно считать

$$V_z = 0. \quad (5)$$

Это приближенное предположение.

Левые части уравнений движения — это силы инерции, действующие на частицу жидкости. При медленном течении вязкой жидкости в тонком слое объемные силы инерции много меньше поверхностных сил трения и давления [18]. Поэтому силами инерции будем пренебрегать.

С учетом сделанных допущений уравнения гидромеханики сильно упрощаются и принимают следующий вид.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(rV)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

Уравнение движения

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \frac{V}{r^2} \right), \quad \frac{\partial P}{\partial \varphi} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Из второго и третьего уравнений движения следует, что давление зависит только от r , то есть $P = P(r)$ [19].

Преобразуем первое уравнение движения (7). Из уравнения неразрывности находим $V + r \partial V / \partial r = 0$, откуда

$$\frac{\partial V}{\partial r} = -\frac{V}{r}.$$

Дифференцируем еще раз по r .

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} = \frac{V}{r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{2V}{r^2}.$$

Подставляем в первое уравнение движения, получим

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \mu \frac{\partial^2 V}{\partial z^2}. \quad (8)$$

Проинтегрируем уравнение неразрывности (6)

$$rV = f(z). \quad (9)$$

Находим

$$V = \frac{f(z)}{r}. \quad (10)$$

Подставим V в (8)

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\mu}{r} \frac{d^2 f(z)}{dz^2}. \quad (11)$$

Левая часть (11) зависит только от r , поэтому и правая часть тоже должна зависеть только от r . Значит

$$d^2 f(z) / dz^2 = \text{const}.$$

Следовательно, функция $f(z)$ должна иметь вид

$$f(z) = Az^2 + Bz + C. \quad (12)$$

Постоянные A, B, C нужно определить.

Проинтегрируем уравнение (11) с учетом (12)

$$P = 2\mu A \ln r + D. \quad (13)$$

Определяем A и D из граничных условий (3). Получим

$$P_1 = 2\mu A \ln r_1 + D.$$

$$P_2 = 2\mu A \ln r_2 + D.$$

Из этих условий находим

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 2\mu A \ln(r_2 / r_1) > 0. \quad (14)$$

Отсюда получим

$$A = \frac{\Delta P}{2\mu \ln(r_2 / r_1)} > 0. \quad (15)$$

$$D = P_1 - 2\mu A \ln r_1 = P_2 - 2\mu A \ln r_2 = \frac{P_1 \ln r_2 - P_2 \ln r_1}{\ln r_2 - \ln r_1}. \quad (16)$$

Определим B и C . Из (10) и (12)

$$V = \frac{Az^2 + Bz + C}{r}.$$

Из граничных условий (3) получим

$$V(\delta/2) = \frac{A\delta^2 + 2B\delta + 4C}{4r} = 0 \Rightarrow A\delta^2 + 2B\delta + 4C = 0.$$

$$V(-\delta/2) = \frac{A\delta^2 - 2B\delta + 4C}{4r} = 0 \Rightarrow A\delta^2 - 2B\delta + 4C = 0.$$

Отсюда находим

$$B = 0, \quad C = -\frac{A\delta^2}{4} = -\frac{\delta^2 \Delta P}{8\mu \ln(r_2 / r_1)}. \quad (17)$$

Окончательно для V получим выражение

$$V = \frac{Az^2 + Bz + C}{r} = \frac{A}{r} \left(z^2 - \frac{\delta^2}{4} \right) = \frac{\Delta P}{2\mu \ln(r_2 / r_1) \cdot r} \left(z^2 - \frac{\delta^2}{4} \right). \quad (18)$$

С помощью непосредственной проверки можно убедиться, что P и V , определяемые формулами (13) и (18), являются точными решениями уравнений (6) и (7) с граничными условиями (3). Значит, предположение (5) оказалось точным решением.

Найдем среднюю по толщине слоя скорость

$$V_{cp} = \frac{1}{\delta} \int_{-\delta/2}^{\delta/2} V(r, z) dz = \frac{A}{r\delta} \int_{-\delta/2}^{\delta/2} \left(z^2 - \frac{\delta^2}{4} \right) dz = -\frac{A\delta^2}{6r}.$$

С учетом выражения для A получим

$$V_{cp} = -\frac{\delta^2 \Delta P}{12\mu \ln(r_2 / r_1) \cdot r}. \quad (19)$$

Знак «—» показывает, что скорость потока направлена к центру.

Определим расход жидкости

$$Q = 2\pi r \delta |V_{cp}| = \frac{\pi \delta^3 \Delta P}{6\mu \ln(r_2 / r_1)}. \quad (20)$$

Полученная формула совпадает с формулой, полученной в [9] как приближенное решение рассматриваемой задачи.

При выводе (20) сила инерции частиц жидкости не учитывалась. Сила инерции направлена в сторону, противоположную ускорению [20], то есть от центра, поэтому замедляет движение частиц жидкости, а значит, и уменьшает расход. Поэтому при учете сил инерции расход должен быть меньше. Следовательно, формула (20) дает оценку верхней границы для реальной величины утечки.

Для определения величины утечки необходимо задать r_1 и r_2 . Величина r_2 определяется длиной ВРЭ и диаметром трубопровода, как описано выше. Величину r_1 можно определить следующим образом.

Пусть известна величина утечки через дефект Q м³/с. Форма дефекта может быть любой: трещина, коррозионный дефект и др. Будем считать, что дефект имеет форму круглого отверстия диаметром d в стенке трубы толщиной h , то есть утечка происходит через трубку диаметром d и длиной $l = h$ под действием перепада давления $\Delta P = P_{mp} - P_0$, где P_{mp} — давление в трубопроводе, P_0 — давление снаружи трубопровода. Из формулы Пуазейля [18] определим радиус трубки

$$r = \sqrt[4]{\frac{8\mu l Q}{\pi \Delta P}}, \quad (21)$$

где μ — динамическая вязкость; ρ — плотность перекачиваемой жидкости. Радиус отверстия r_1 принимаем равным найденному значению r . После этого по формуле (20) можно определить утечку после проведения ремонта с помощью ВТЭ.

Рассмотрим пример. Пусть до проведения ремонта утечка $Q_0 = 10^{-4}$ м³/с = 100 см³/с (в сутки 8,64 м³), диаметр трубопровода $D = 1$ м, толщина стенки трубы (длина трубки l) $h = 15$ мм, величина зазора (шероховатость трубы) $\delta = 0,03$ мм (с учетом подготовки зоны дефекта), динамическая вязкость $\mu = 0,002$ кг/м·с, перепад давлений $\Delta P = 1$ МПа. По формуле (21) получим $r = 0,296$ мм.

Длина ВТЭ равна $\pi D = 3,14$ м, радиус $r_2 = \pi D / 2 = 1,57$ м. Утечку Q_p после проведения ремонта с помощью ВТЭ определим по формуле (20). Получим $Q_p = 8,24 \cdot 10^{-7}$ м³/с = 0,824 см³/с. Видим, что при установке ВТЭ утечка уменьшилась в $Q_0 / Q_p = 10^{-4} / 8,24 \cdot 10^{-7} \approx 120$ раз.

Обсуждение

Вопросы внутритрубного ремонта трубопроводов — одно из актуальных направлений исследований в области ремонтных работ для недоступных участков трассы. К таким участкам относятся подводные переходы, построенные методами наклонно направленного бурения и наклонно

направленного бурения со щитом. Для обеспечения безопасной и стабильной работы трубопроводов необходимо внедрение новых методов ремонта, соответствующих технологий и оборудования.

Появление наработок, решающих конкретные задачи в этом направлении, безусловно, является определенным шагом в решении более общих проблем в области внутритрубного ремонта трубопроводов и обеспечения их возможности восстановления, а также принятия превентивных профилактических противоаварийных мер. Данная работа направлена на решение конкретной задачи — расчета радиального течения вязкой несжимаемой жидкости в тонком слое между двумя кольцевыми пластинами, имитирующими область, прилегающую к сквозному дефекту трубопровода. В результате получено точное решение для локальной области аварийного истечения жидкости, позволяющее подобрать необходимые параметры для дальнейших расчетов ВРЭ. Данная тема, безусловно, является актуальной и требует практической реализации.

При данном конструктивном решении ВРЭ не устраняет полностью утечку, но во много раз уменьшает ее объем. Вместе с тем для полного устранения утечки создаются благоприятные условия, так как перепад давления между внутренней полостью трубопровода в зоне дефекта сводится к минимуму, что позволяет значительно снизить требования к прочностным характеристикам применяемых герметиков.

Выводы

На основе решения задачи о радиальном течении вязкой несжимаемой жидкости в тонком слое между двумя кольцевыми пластинами разработан метод оценки величины утечки после проведения ремонта трубопровода с помощью ВРЭ. Предлагаемый метод дает верхнюю оценку величины утечки.

Полученные решения для области, прилегающей к сквозному дефекту трубопровода, позволяют подобрать необходимые параметры для дальнейших расчетов ВРЭ.

Библиографический список

1. Левитин, Ю. И. Бестраншейный ремонт местных повреждений подземных трубопроводов / Ю. И. Левитин. — Текст : непосредственный // РОБТ. Российское общество бестраншейных технологий. — 1997. — № 8. — С. 37–39.
2. Левин, С. И. Подводные трубопроводы / С. И. Левин. — Москва : Недра, 1970. — 280 с. — Текст : непосредственный.
3. Торопов, С. Ю. Использование бестраншейных методов ремонта для восстановления трубопроводных систем / С. Ю. Торопов, В. В. Бердышев, Б. Г. Котляр. — Текст : непосредственный // Материалы конференции молодых ученых. Ч. 2 : Молодые ученые в решении проблем АПК. — Тюмень : Ризограф, 2003. — С. 218–220.
4. Торопов, С. Ю. Вопросы ремонта газопроводов, эксплуатирующихся на болотах и обводненных территориях / С. Ю. Торопов, Н. В. Николаев. — Текст : непосредственный // Всесоюзная научно-техническая конференция «Нефть и газ Западной Сибири». — Тюмень, 1998. — С. 78–82.
5. Белякова, Е. В. Современные бестраншейные технологии / Белякова Е. В., Головин К. А. — Текст : непосредственный // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. — 2009. — № 3. — С. 238–244.

6. Курочкин, В. В. Бестраншейные методы прокладки нефтепроводов / В. В. Курочкин, Н. Т. Овчинников, А. А. Безверхов. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт нефти. – 2000. – № 5. – С. 25–30.
7. Торопов, С. Ю. Оборудование для аварийного ремонта газонефтепроводов / С. Ю. Торопов, С. М. Дорофеев, И. В. Прокопьев. – Текст : непосредственный // Труды международной научно-технической конференции. – Тюмень, 2005. – Часть II. – С. 170–172.
8. Современные методы ремонта трубопроводов / Н. Х. Халлыев, Т. Н. Абасова, В. Г. Селиверстов [и др.]. – Москва : ИРЦ Газпром, 1997. – 44 с. – (Газовая промышленность. Обзорная информация. Серия: Транспорт и подземное хранение газа). – Текст : непосредственный.
9. Механика жидкости и газа. Спецглавы : учебное пособие / В. Е. Щерба, В. В. Шалай, Е. А. Павлюченко, Е. Ю. Носов ; Минобрнауки России, Омский государственный технический университет. – Омск : ОмГТУ, 2020. – 90 с. – Текст : непосредственный.
10. Lu, H. Trenchless Construction Technologies for Oil and Gas Pipelines : State-of-the-Art Review / H. Lu, S. Behbahani, M. Azimi [et al.]. – Text : electronic // Journal of Construction Engineering and Management. – 2020. – Vol. 146, Issue 6. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001819](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001819).
11. Leakage detection techniques for oil and gas pipelines : State-of-the-art / H. Lu, T. Iseley. – Text : electronic // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2020. – Vol. 98. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103249>.
12. Lu, H. How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis / H. Lu, J. Matthews, T. Iseley. – Text : electronic // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 261. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121215>.
13. Stress analysis of urban gas pipeline repaired by inserted hose lining method / H. Lu, X. Wu, H. Ni [et al.]. – Text : electronic // Composites Part B : Engineering. – 2020. – Vol. 183. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107657>.
14. Торопов, С. Ю., Внутритрубные ремонтные гильзы на основе сплавов с памятью формы / С. Ю. Торопов, Е. С. Торопов. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2006. – № 6. – С. 70–76.
15. Возиянов, В. И. Обновление старых трубопроводов с помощью протяжки полиэтиленовых труб бестраншейным способом / В. И. Возиянов, Н. А. Гнилорыбов. – Текст : непосредственный // РОБТ. Российское общество бестраншейных технологий. – 1998. – № 1. – С. 19–20.
16. Торопов, С. Ю. Работа пластмассового трубопровода, проложенного внутри стального / С. Ю. Торопов, Н. В. Николаев. – Текст : непосредственный // Сборник научных трудов «Вопросы состояния и перспективы развития нефтегазовых объектов в Западной Сибири». – Тюмень : ТюмГНГУ, 2003. – С. 152–160.
17. Li, Sh. FSI research in pipeline systems – A review of the literature / S. Li, B. W. Karney, G. Liu. – DOI 10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.020. – Direct text // Journal of Fluids and Structures. – 2015. – Vol. 57. – P. 277–297.
18. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа : учебник / Л. Г. Лойцянский. – 7-е изд., испр. – Москва : Дрофа, 2003. – 840 с. – Текст : непосредственный.
19. Фихтенгольц, Г. М. Основы математического анализа : учебник / Г. М. Фихтенгольц. – 9-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2008. – Часть 1. – 440 с. – Текст : непосредственный.
20. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики : учебник / С. М. Тарг. – 21-е изд., стер. – Москва : ЛЕНАНД, 2018. – 415 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Levitin, Yu. I. (1997). Bestransheyyny remont mestnykh povrezhdeniy podzemnykh truboprovodov. ROBT. Rossiyskoe obshchestvo bestransheynykh tekhnologiy, (8), pp. 37-39. (In Russian).
2. Levin, S. I. (1970). Podvodnye truboprovody. Moscow, Nedra Publ., 280 p. (In Russian).
3. Toropov, S. Yu., Berdyshev, V. V., & Kotlyar, B. G. (2003). Ispol'zovanie bestransheynykh metodov remonta dlya vosstanovleniya truboprovodnykh system. Materialy konfer-

entsii molodykh uchenykh. Ch. 2: Molodye uchenye v reshenii problem APK. Tyumen, Rizograf Publ., pp. 218-220. (In Russian).

4. Toropov, S. Yu., & Nikolaev, N. V. (1998). Voprosy remonta gazoprovodov, ekspluatiruyushchikhsya na bolotakh i obvodnennykh territoriyakh. Vsesoyuznaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri". Tyumen, pp. 78-82. (In Russian).

5. Belyakova, E. V., & Golovin, K. A. (2009). Sovremennye bestransheynye tekhnologii. Proceedings of the Tula States University - sciences of Earth, (3), pp. 238-244. (In Russian).

6. Kurochkin, V. V., Ovchinnikov, N. T., & Bezverkhov, A. A. (2000). Bestransheynye metody prokladki nefteprovodov. Truboprovodnyy transport nefti, (5), pp. 25-30. (In Russian).

7. Toropov, S. Yu., Dorofeev, S. M., & Prokop'ev, I. V. (2005). Oborudovanie dlya avariynogo remonta gazonefteprovodov. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Chast' II. Tyumen, pp. 170-172. (In Russian).

8. Khallyev, N. H., Abasova, T. N., Seliverstov, V. G., Parfenov, A. I., & Kuprina, N. D. (1997). Sovremennye metody remonta truboprovodov. Moscow, IRTS Gazprom Publ., 44 p. (In Russian).

9. Shcherba, V. E., Shalay, V. V., Pavlyuchenko, E. A. & Nosov, E. Yu. (2020). Mekhanika zhidkosti i gaza. Spetsglavy. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 90 p. (In Russian).

10. Lu, H., Behbahani S., Azimi, M., Matthews, J. C., Han, Sh., & Iseley, T. (2020). Trenchless Construction Technologies for Oil and Gas Pipelines: State-of-the-Art Review. Journal of Construction Engineering and Management, 146(6). (In English). Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001819](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001819)

11. Lu, H., Iseley, T., Behbahani, S., & Fu, L. (2020). Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: State-of-the-art. Tunnelling and Underground Space Technology, (98). (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103249>

12. Lu, H., Matthews, J., & Iseley, T. (2020). How does trenchless technology make pipeline construction greener? A comprehensive carbon footprint and energy consumption analysis. Journal of Cleaner Production, 261. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121215>

13. Lu, H., Wu, X., Ni, H., Azimi, M., Yan, X., & Niu, Y. (2020). Stress analysis of urban gas pipeline repaired by inserted hose lining method. Composites Part B: Engineering, 183. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107657>

14. Toropov, S. Yu., & Toropov, E. S. (2006). In-line repair tubes on the basis of shape memory alloys. Higher Educational Institutions News. Neft' i Gas, (6), pp. 70-76. (In Russian).

15. Voziyarov, V. I., & Gnilorybov, N. A. (1998). Obnovlenie starykh truboprovodov s pomoshch'yu protyazhki polietilenovykh trub bestransheynym sposobom. ROBT. Rossiyskoe obshchestvo bestransheynykh tekhnologiy, (1), pp. 19-20. (In Russian).

16. Toropov, S. Yu., & Nikolaev, N. V. (2003). Rabota plastmassovogo truboprovoda, prolozhennogo vnuti stal'nogo. Sbornik nauchnykh trudov "Voprosy sostoyaniya i perspektivy razvitiya neftegazovykh ob'ektov v Zapadnoy Sibiri". Tyumen, Tyumen State Oil and Gas University Publ., pp.152-160. (In Russian).

17. Li, Sh., Karney, B. W. & Liu, G. (2015). FSI research in pipeline systems - A review of the literature. Journal of Fluids and Structures, 57, pp. 277-297. (In English). DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2015.06.020

18. Loytsyanskiy, L. G. (2003). Mekhanika zhidkosti i gaza. 7th edition, revised. Moscow, Drofa Publ., 840 p. (In Russian).

19. Fikhtengol'ts, G. M. (2008). Osnovy matematicheskogo analiza. 9th edition, revised. Chast' 1. St. Petersburg, Lan' Publ., 440 p. (In Russian).

20. Targ, S. M. (2018). Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki. Moscow, LENAND Publ., 415 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Торопов Евгений Сергеевич, к. т. н., доцент кафедры транспорта и технологий нефтегазового комплекса, филиал Тюменского индустриального университета, г. Ноябрьск, e-mail: toropoves@tyuiu.ru

Information about the authors

Evgeny S. Toropov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transport and Technology of Oil and Gas Complex, Industrial University of Tyumen (Noyabrsk branch), e-mail: toropoves@tyuiu.ru

Дорофеев Сергей Михайлович, к. ф.-м. н., доцент кафедры естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин, Тюменское высшее военное-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, г. Тюмень

Торопов Сергей Юрьевич, д. т. н., профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Сорокина Елена Михайловна, к. ф.-м. н., доцент кафедры естественно-научных и общепрофессиональных дисциплин, Тюменское высшее военное-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, г. Тюмень

Пономарева Татьяна Георгиевна, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Sergey M. Dorofeev, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Natural Science and General Professional Disciplines, Tyumen Higher Military Engineering Command School named after Marshal of Engineering Troops A. I. Proshlyakov, Tyumen

Sergey Yu. Toropov, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Elena M. Sorokina, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor at the Department of Natural Science and General Professional Disciplines, Tyumen Higher Military Engineering Command School named after Marshal of Engineering Troops A. I. Proshlyakov, Tyumen

Tatyana G. Ponomareva, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen