ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА

УДК 620.179.14+621.317.333.83

DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-60-69

Электромагнитная технология диагностики состояния внутренних защитных покрытий промысловых трубопроводов

Теплухин В. К.¹, Ратушняк А. Н.^{2*}, Ван Сяолун³

¹ ПетроТул-Направленное Бурение, г. Октябрьский, Республика Башкортостан, Россия

² Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

³ Компания «Лидер», г. Сучжоу, Китай

*e-mail: geo_info@mail.ru

Реферат

Цель работы. В настоящее время часть (менее 10 %) промысловых трубопроводов имеют внутреннее защитное покрытие. Отсутствие защиты ведет к отказам трубопроводов в процессе эксплуатации, порывам, обусловленным развитием коррозии. Это приводит к экологическому ущербу, высоким затратам на ликвидацию аварий, неконтролируемым потерям нефти и нефтепродуктов. С целью снижения частоты порывов системы трубопроводов необходимо увеличивать долю трубопроводов с внутренним защитным покрытием. Срок службы трубопроводов с внутренней изоляцией возрастает в 8–10 раз по сравнению с незащищенными трубами. Необходимо разработка технологии контроля технического состояния внутреннего полимерного покрытия труб промыслового сортамента диаметров 114–273 мм, используемых для транспортировки нефтепродуктов.

Методика проведения исследований. Теоретические и методические исследования и детальный анализ результатов физического моделирования.

Анализ результатов. Показана информативность измеряемых характеристик гармонического электромагнитного поля при исследовании дефектов защитного покрытия трубопроводов и высокая технологичность промысловых контрольных исследований при проведении диагностики внутреннего полимерного покрытия труб при перемещении измерительного комплекса внутри труб в автономном режиме с непостоянной скоростью.

Выводы. Проверена и подтверждена эффективность применения в качестве технического решения способа, основанного на симметричной системе расположения зондовых электродов и мостовой схеме измерений характеристик поля электромагнитного сигнала для создания технологического средства диагностики внутреннего полимерного покрытия промысловых трубопроводов в сложных условиях промышленной эксплуатации.

Ключевые слова: защитное внутритрубное полимерное покрытие; диэлектрический слой; математическое моделирование; экспериментальная установка; физическое моделирование.

Введение. Система промысловых трубопроводов нефтепродуктов в РФ имеет в настоящее время протяженность около 12,5 тыс. км, из них только 755 км (менее 6,5 %) уложенных промысловых труб диаметром от 114 до 273 мм имеет внутреннее защитное полимерное покрытие, предназначенное для защиты металла труб от воздействия разрушающих факторов [1]. Отсутствие защиты ведет к отказам трубопроводов в процессе эксплуатации, порывам, обусловленным развитием коррозии. Это приводит к экологическому ущербу, высоким затратам на ликвидацию аварий, неконтролируемым потерям нефти и нефтепродуктов. С целью снижения частоты порывов системы трубопроводов необходимо увели-

чивать долю трубопроводов с внутренним защитным покрытием. Срок службы трубопроводов с внутренней изоляцией возрастает в 8–10 раз по сравнению с незащищенными трубами.

Защитная пленка, применяемая для защиты внутренней поверхности промышленных труб, изготавливается из высокопрочного полимера при условии качественной адгезии к металлу. Средняя толщина пленки 0,4–1,0 мм. Технология внутренней изоляции труб силикатно-эмалевыми покрытиями, полиэтиленовыми оболочками и эпоксидными покрытиями внедрена на целом ряде отечественных предприятий. В данное время практически отсутствуют данные о сроках службы внутреннего защитного полимерного покрытия. В процессе эксплуатации трубопроводов в соответствии с требованиями нормативных документов необходимо проведение периодической диагностики для контроля и оценки технического состояния трубопроводов и своевременного устранения возможных дефектов и повреждений.

В научной литературе основной объем исследований посвящен вопросам дефектоскопии акустическими, электромагнитными и другими методами наземных трубопроводов и скважинных обсадных колонн [2–7].

Диагностика качества защитного покрытия на действующих трубопроводах не выполняется в связи с отсутствием технологии и приборов требуемого назначения. В данной работе представлен вариант технического решения поставленной проблемы – создание системы диагностики полимерного внутритрубного защитного покрытия для труб промышленного сортамента, дан анализ материалов математического и физического моделирования.

Математическое моделирование. Рассмотрим предварительно математическую модель поставленной задачи диагностики качества защитного высокоомного покрытия (рис. 1).

Диэлектрический T -слой определим как тонкий пласт толщиной $d \rightarrow 0$ и удельным электрическим сопротивлением $\rho \rightarrow \infty$, так что их произведение $T = \rho d = \text{const}$ и имеет размерность поперечного сопротивления $\text{Ом} \cdot \text{м}^2$ [8].

В средах с различными удельными электрическими сопротивлениями или обратными величинами – электропроводностями σ_0 (при $z > 0$) и σ_1 (при $z < 0$) – электромагнитное поле, создаваемое вертикальным электрическим диполем, приподнятым на высоту $h > 0$ над контактом сред, описывается вектор-потенциалом с единственной составляющей вида [9–13]

$$A_{z0} = \frac{M_z}{4\pi} \left(\frac{\exp(-k_0 R)}{R} + \int_0^\infty \alpha \exp(-m_0 z) J_0(\lambda r) d\lambda \right), \quad z \geq 0;$$

$$A_{z1} = \frac{M_z}{4\pi} \int_0^\infty \beta \exp(m_1 z) J_0(\lambda r) d\lambda, \quad z \leq 0,$$

где M_z – момент электрического диполя, $M_z = Jdl$; λ – параметр разделения пере-

Рис. 1. Модель с диэлектрическим T -слоем на границе проводящих сред и источника тока

Fig. 1. Model with a dielectric T -layer at the boundary of the conducting media and the current source

менных в функции Бесселя первого рода $J_0(\lambda r)$; $R = \sqrt{r^2 + (z - h)^2}$; $m_i = \sqrt{\lambda^2 + k_i^2}$, k_i – волновые числа сред 0 и 1, $k_i = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_i}$.

Неизвестные коэффициенты α и β можно определить из граничных условий на T -плоскости. Из закона Фарадея в интегральном виде, составляя циркуляцию напряженности электрического поля E^i по замкнутому контуру L , опирающемуся на контур площадью S , $\oint_L (E^i, d\mathbf{l}) = -\frac{d}{dt} \int_S B_n dS$ (B_n – составляющая магнитной индукции по нормали к контуру) (рис. 1) и устремляя толщину слоя к нулю ($d \rightarrow 0$), для тангенциальных составляющих при стационарном режиме источника тока имеем [9]

$$E_{x0} - E_{x1} = \sigma_0 T \frac{\partial E_{z0}}{\partial x} = \sigma_1 T \frac{\partial E_{z1}}{\partial x} \text{ и } E_{y0} - E_{y1} = \sigma_0 T \frac{\partial E_{z0}}{\partial y} = \sigma_1 T \frac{\partial E_{z1}}{\partial y}$$

или на постоянном токе $U_1 - U_0 = i_{z0} T = i_{z1} T$. Для вектор-потенциалов на границе сред при $z = 0$ получим

$$\frac{1}{\sigma_0} \operatorname{div} A_0 - \frac{1}{\sigma_1} \operatorname{div} A_1 = T \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_{z0} = T \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_{z1}.$$

Опуская промежуточные выкладки, получаем:

$$\alpha = \frac{\lambda}{m_0} \frac{\sigma_1 m_0 - \sigma_0 m_1 - \sigma_0 \sigma_1 m_0^2 T}{\sigma_1 m_0 + \sigma_0 m_1 - \sigma_0 \sigma_1 m_0^2 T} \exp(-m_0 h);$$

$$\beta = 2\lambda \sigma_1 \frac{1 - \sigma_0 m_0 T}{\sigma_1 m_0 + \sigma_0 m_1 + \sigma_0 \sigma_1 m_0^2 T} \exp(-m_0 h).$$

В частном случае при $T = 0$ и $\sigma_1 = 0$ (диэлектрик) коэффициенты $\beta = 0$, $\alpha = -\lambda / m_0 \exp(-m_0 h)$ и вектор-потенциал соответствуют случаю проводящего полупространства, описываемого двумя дипольными источниками – истинного и отраженного относительно границы *проводник–диэлектрик* со встречным моментом [12, 13]:

$$A_{z0} = \frac{M_z}{4\pi} \left(\frac{\exp(-k_0 R)}{R} - \frac{\exp(-k_0 \hat{R})}{\hat{R}} \right) \text{ при } z \geq 0, \text{ где } \hat{R} = \sqrt{r^2 + (z + h)^2}.$$

Напряженность электрического поля и вектор-потенциал связаны соотношением $E = \frac{1}{\sigma} \operatorname{grad} \operatorname{div} A - k^2 A$ [9–11], при этом для полубесконечного кабеля с электродом A , приподнятым на высоту $h_A > 0$ над контактом сред с диэлектрическим слоем, имеем:

$$E_{x0} = -\frac{1}{\sigma_0} \int_{h_A}^{\infty} \frac{\partial^2}{\partial x \partial z} A_{z0} d\xi.$$

Для разности напряжений, развиваемых между двумя точками, разнесенными на расстояние L вдоль оси x в точке измерений на высоте $z = h_A$, получим расчетную формулу над контактом сред с диэлектрическим слоем:

$$\Delta U = \int_0^L E_{x0} dx = -\frac{1}{\sigma_0} \int_{h_A}^{\infty} \frac{\partial}{\partial z} A_{z0} d\xi = \frac{J}{4\pi\sigma_0} \left\{ \frac{\exp(-k_0 L)}{L} + \int_0^{\infty} \alpha \exp(-m_0 z) J_0(\lambda L) d\lambda \right\}. \quad (1)$$

На рис. 2 приведены результаты расчета методом [14] $dU = U(T) - U(T=0)$ по формуле (1) при параметрах: $J = 1$ А; $\sigma_0 = 0,1$ См/м; $\sigma_1 = 2 \cdot 10^4$ См/м; частота $f = 10$ кГц; $T = \rho d = 0,001\text{--}10$ Ом $\cdot$ м² (при $d = 4 \cdot 10^{-4}$ м; $\rho = 10^4$ Ом $\cdot$ м величина поперечного сопротивления T -слоя составляет $T = 4$ Ом $\cdot$ м²).

Рис. 2. Зависимость разности напряжений dU от поперечного сопротивления изолирующего T -слоя на частоте 10 кГц
Fig. 2. Dependence between dU stress difference and the transverse resistance of the insulating T -layer at the frequency of 10 kHz

По мере уменьшения величины T от 10 Ом $\cdot$ м² величина разности напряжений увеличивается обратно пропорционально изменению T .

Даже малое изменение величины поперечного сопротивления T -слоя приводит к увеличению величины разности напряжений. Эту зависимость можно использовать при оценке толщины покрытия или обнаружении мест нарушений сплошности.

Физическое моделирование. Техническое решение задачи заключается в следующем. Модель представляет собой металлическую трубу с внешним диаметром 273 мм (к примеру) с внутренним полимерным покрытием, заполненную относительно проводящей средой (проводящий раствор). При наличии разности потенциалов между заполняющей внутренней средой и металлом трубы при незначительном нарушении защитно-изоляционного покрытия проводящая жидкость перекачиваемого продукта проникает к металлу, что создает электрический контакт между внутренней средой и стальной стенкой исследуемого трубопровода. Задачей моделирования является обнаружение места электрического контакта внутритрубного продукта с металлом трубы. Конструкция экспериментального зонда, вариант электрической схемы для его подключения в конструкции зонд–труба представлены на рис. 3.

Применение постоянного тока в данной схеме невозможно по тем причинам, что ток не пойдет через ненарушенное защитно-изоляционное покрытие, поскольку гальваническая цепь является разомкнутой. Применение гармонических режимов возбуждения поля и регистрации в промышленном варианте также невозможно из-за высокого энергопотребления установки. Наиболее целесообразно применение импульсного режима возбуждения и регистрации электромагнитного поля.

Представленная схема, основанная на симметричной системе расположения зондовых электродов и мостовой схеме измерений, предварительно реализована в макетном исполнении и опробована на стендах с образцами промысловых труб 273 и 219 мм.

Рис. 3. Схема генераторно-измерительной системы в трубе с покрытием

Fig. 3. The diagram of the generator-measurement system in the coated pipeline

Физические основы измерительной системы: исследуемый трубопровод можно представить как протяженный электрический конденсатор, у которого обкладками являются металл трубы и сама жидкость, перемещаемая по трубе. Изолятором данного конденсатора служит защитное изоляционное покрытие трубы. Предлагаемый способ предназначен для выявления участков повреждения защитного изоляционного покрытия путем воздействия переменным электрическим полем между двумя электродами, расположенными на поверхности измерительного прибора, находящегося внутри исследуемой трубы.

Электрическая эквивалентная цепь части трубопровода состоит из омического (активного) сопротивления прокачиваемой жидкости и распределенной емкости (конденсатора) участка трубы.

1. Производится регистрация потенциала относительно средней точки «моста». В случае равных условий при замыкании каждого участка мостовой схемы (сбалансированности «моста») регистрируемый потенциал средней точки приближается к нулю. При нарушении равенства условий (например, при наличии сквозного дефекта полимерного покрытия) происходит резкое изменение значения потенциала средней точки, причем знак изменения («плюс» или «минус») зависит от того, в каком интервале мостовой схемы в данный момент находится сквозной дефект.

2. Неповрежденный участок трубопровода в данной схеме представляет собой систему конденсатора с обкладками: 1 – продукт внутри трубопровода, 2 – собственно металл трубы. Изолятор между обкладками «конденсатора» – внутреннее полимерное покрытие.

3. «Дефектный» участок трубы – «конденсатор» с «пробоем» изоляции.

4. Проводя измерения относительной емкости между участками при перемещении измерительной системы по дистанции происходит фиксирование участков со сквозным нарушением изоляции «конденсатора».

5. Настрой параметров измерительной системы (сопротивления и емкости R и C) произведен таким образом, что эффект поврежденного участка выделяется многократно относительно фонового режима на неповрежденных участках.

В качестве источника генераторного сигнала использован стационарный генератор импульсов, частота 5–10 кГц, напряжение 8 В. Форма сигнала – «меандр». К примеру, при разработке рабочей схемы измерительной системы питание просчитано от малогабаритного бытового источника «Крона». Положение дефекта защитного пленочного покрытия отмечается резкой знакопеременной кривой изменения напряжения (рис. 4).

Рис. 4. График регистрируемого сигнала по трубе при наличии дефектов
Fig. 4. The graph of the registered signal along the pipeline with defects

Колебания значений потенциала средней точки мостовой схемы в интервале неповрежденного пленочного покрытия происходят в диапазоне 17,4–43,0 % относительно значения сигнала сбалансированного «моста» и имеют синусоидный вид с шагом около 25 см.

Колебания при условии практически неизменного уровня воды обусловлены колебаниями толщины нанесенной защитной пленки. Относительно слабый разбаланс измерительного моста будет наблюдаться в случаях изменения толщины пленочного покрытия.

Одной из важнейших задач диагностики трубопроводов с внутренним защитным покрытием является оценка толщины полимерного слоя. Толщина полимерного слоя практически определяет емкостные свойства системы «конденсатора», представленного диэлектрической высокоомной пленкой, металлом трубы и проводящей внутритрубой средой (последние две играют роль обкладок).

Известно, что основное значение амплитуды измеряемого сигнала в том числе будет определяться и значением толщины прокладки исследуемого «конденсатора», а именно значением создаваемой емкости $C = \epsilon \epsilon_0 S/d$, где ϵ – диэлектрическая

проницаемость пленки, $\varepsilon \approx 20$ отн. ед.; ε_0 – диэлектрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; S – площадь пленки, м^2 ; d – толщина пленки, м. Длина измерительной камеры 15 мм; внешний диаметр трубы 219 мм; внутренний диаметр – 208 мм.

Из аналитических расчетов следует, что амплитуда изменения емкости, создаваемой полимерным внутренним покрытием, изменяется в зависимости от относительной толщины ($d/d_{\text{ном}}$) пленки при любом наполнении трубы продуктами перекачки.

Рис. 5. Выделение муфтового соединения Целлера
Fig. 5. Detection of Zeller plug-in coupling

В случае если толщина покрытия находится в пределах 0,3–1,0 (к примеру, 0,7) толщины ТУ, соотношение емкости может изменяться всего в 1,1–1,5 раза по отношению к номинальному значению емкости: $C(d_{0,7\text{ном}})/C(d_{\text{ном}}) = 1,43 (+43 \%)$. В случае если толщина покрытия превышает номинальное значение 1,0–1,2 толщины ТУ, соотношение емкости падает по отношению к номинальному значению емкости: $C(d_{1,2\text{ном}})/C(d_{\text{ном}}) = 0,83 (-17 \%)$. Зная емкость конденсатора, создаваемого участком изоляционного покрытия трубы в измерительной секции, и диэлектрическую проницаемость материала покрытия, можно однозначно определить среднюю толщину покрытия.

Сделанные на основании результатов измерений и аналитических расчетов выводы позволяют предварительно оценить положительно потенциальные возможности измерительной системы для качественной оценки толщины пленочного покрытия относительно толщины по ТУ.

Муфта Целлера, соединяющая соседние трубы, надежно выделяется при прямом и обратном движении знакопеременными эффектами на краях муфты при малой стабилизации сигнала в центре муфты (рис. 5). Интервал «стабилизации сигнала» зависит только от скорости перемещения комплекса относительно

муфты. Изменение амплитуды сигнала обусловлено также изменениями реактивного сопротивления – емкости (объем пленочного покрытия) модели муфты относительно цельной трубы.

Детально проанализированы экспериментальные данные:

- при измерении емкостных свойств участка поверхности внутритрубного покрытия образцов труб, зависящих от толщины пленки при условии неизменности параметра сопротивления материала пленки: $\tau = RC$;

- оценке равномерности изолирующего покрытия трубы;

- оценке возможности обнаружения сквозных дефектов пленочного покрытия различных размеров;

- оценке влияния параметров R и C на характер изменения напряжения.

Вывод. Проверена и подтверждена эффективность применения в качестве технического решения способа, основанного на симметричной системе расположения зондовых электродов и мостовой схеме измерений характеристик поля, для создания технологичного мобильного средства диагностики внутреннего полимерного покрытия промышленных трубопроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гейт А. П., Михайлов И. И., Зорин Е. Е. Применение систем автоматизированного ультразвукового контроля для оценки качества кольцевых сварных соединений трубопроводов // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 8. С. 264–272.

2. Власов В. Т., Коровкин Ю. А., Марин Б. Н., Юрчук Е. С. Устройство для ультразвукового контроля трубопроводов: пат. 2018817 Рос. Федерация. МПК G 01 N 29/10. 30.08.1994. URL: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet

3. Власов В. Т., Марин Б. Н., Юрчук Е. С., Коровкин Ю. А. Ультразвуковое устройство для автоматического контроля качества металла трубопроводов: пат. 2042946 Рос. Федерация. МПК G 01 N 29/04. 27.08.1995. URL: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet

4. Шабунев В. И. Способ неразрушающего контроля трубопроводов: пат. 2108569 Рос. Федерация. МПК G 01N29/04. 10.04.1998. URL: http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet

5. Мурашов В. В., Слюсарев М. В. Выявление трещин в деталях из полимерных композиционных материалов и в многослойных клееных конструкциях низкочастотным акустическим методом // Дефектоскопия. 2016. № 6. С. 27–34.

6. Теплухин В. К. Развитие теоретического обеспечения электромагнитной дефектоскопии колонн нефтяных и газовых скважин // Дефектоскопия. 2004. № 12. С. 60–73.

7. Ратушняк А. Н., Теплухин В. К. Теоретические и экспериментальные основы индукционных методов исследований скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2017. 127 с.

8. Исаев Г. А., Кауфман А. А., Рабинович Б. И., Шатохин В. Н. О влиянии негоризонтальных поверхностей раздела на электромагнитные поля, применяемые в электроразведке // Теория электромагнитных полей, применяемых в разведочной геофизике. Новосибирск: Наука, 1970. С. 3–69.

9. Заборовский А. И. Электроразведка. М.: Гостехиздат, 1963. 429 с.

10. Ваньян Л. Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.

11. Уэйт Дж. Р. Геоэлектромагнетизм. М.: Недра, 1987. 235 с.

12. Бурсиан В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. Л.: Недра, 1972. 245 с.

13. Краев А. П. Основы геоэлектрики. Л.: Недра, 1965. 587 с.

14. Longman I. M. A method for the numerical evaluation of finite integrals of oscillatory functions // Math. Comput. 1960. Vol. 14. No. 69. P. 53–59.

Поступила в редакцию 14 мая 2019 года

Сведения об авторах:

Теплухин Владимир Клавдиевич – доктор технических наук, руководитель отдела новых технологий «ПетроТул-Направленное бурение». E-mail: teplukhin-v@yandex.ru

Ратушняк Александр Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института геофизики УрО РАН. E-mail: geo_info@mail.ru

Ван Сяолун – кандидат социологических наук, директор Компании «Лидер». E-mail: dudkinmsu@yandex.ru

Electromagnetic technology of diagnosing the internal protective coating of field pipelines

Vladimir K. Teplukhin¹, Aleksandr N. Ratushniak², Wang Xiaolong³

¹ Directional Drilling Branch of Petro Tool LLC, Oktyabrsky, Republic of Bashkortostan, Russia.

² Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

³ Leader Company, Suzhou, China.

Abstract

Research aim. Currently, part (less than 10%) of field pipelines has an internal protective coating. The lack of protection leads to of pipelines in-service failures and ruptures caused by corrosion. This leads to environmental damage, high costs for emergency elimination, and uncontrolled losses of oil and petroleum products. In order to reduce the frequency of ruptures in the pipeline system, it is necessary to increase the number of pipelines with an internal protective coating. The service life of pipelines with internal insulation increases by 8-10 times compared to unprotected pipes. It is necessary to develop a technology monitoring the technical state of the internal polymer coating of field pipes of 114-273 mm in diameter used for petroleum products transportation.

Research methodology includes theoretical and methodological research and detailed analysis of physical modelling results.

Analysis of results. Harmonic electromagnetic field measured characteristics informativeness is shown in the study of pipelines protective coating defects. High manufacturability of field check studies is shown when diagnosing internal polymer coating of pipes and moving the measuring system inside the pipeline in an autonomous mode with variable speed.

Summary. The efficiency has been tested and confirmed of using a method based on probe electrodes symmetrical arrangement and a bridge circuit to measure electromagnetic signal field characteristics to create a manufacturable tool diagnosing field pipelines internal polymer coating in difficult industrial conditions.

Key words: internal protective polymer coating of pipes; dielectric layer; mathematical modeling; experimental setup; physical modeling.

REFERENCES

1. Geit A. P., Mikhailov I. I., Zorin E. E. Application of automated ultrasonic inspection systems in assessing the quality of girth welds of main pipelines. *Nauka i tekhnologiya truboprovodnogo transporta nefii i nefteproduktov* = Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. 2018; 8: 264–272. (In Russ.)
2. Vlasov V. T., Korovkin Iu. A., Marin B. N., Iurchuk E. S. Facility for ultrasonic inspection of pipelines. Patent RF no. 2018817; 1994. Available from: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (In Russ.)
3. Vlasov V. T., Marin B. N., Iurchuk E. S., Korovkin Iu. A. Ultrasonic facility for pipeline metal automatic quality control. Patent RF no. 2042946; 1995. Available from: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (In Russ.)
4. Shabunevich V. I. Method of nondestructive inspection of pipelines. Patent RF no. 2108569; 1998. Available from: http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet (In Russ.)
5. Murashov V. V., Sliusarev M. V. Revealing cracks in polymer-composite parts and in multilayered glued constructions by a low-frequency acoustic method. *Defektoskopiia* = Russian Journal of Nondestructive testing. 2016; 6: 27–34. (In Russ.)
6. Teplukhin V. K. The development of theoretical foundations for electromagnetic flaw detection of oil and gas wells. *Defektoskopiia* = Russian Journal of Nondestructive testing. 2004; 12: 60–73. (In Russ.)
7. Ratushniak A. N., Teplukhin V. K. Theoretical and experimental for induction methods of well inspection. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2017. (In Russ.)
8. Isaev G. A., Kaufman A. A., Rabinovich B. I., Shatokhin V. N. On the influence of nonlevel contact on the electromagnetic fields used in electrical exploration. In: *The theory of electromagnetic fields applied in exploration geophysics*. Novosibirsk: Nauka Publishing; 1970. p. 3–69. (In Russ.)
9. Zaborovskii A. I. Electrical exploration. Moscow: Gostoptekhizdat Publishing; 1963. (In Russ.)
10. Vanian L. L. The fundamentals of electromagnetic soundings. Moscow: Nedra Publishing; 1965. (In Russ.)
11. Wait J. R. Geo-elektromagnetizm. Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)
12. Bursian V. R. The theory of electromagnetic fields applied in electrical exploration. Leningrad: Nedra Publishing; 1972. (In Russ.)
13. Kraev A. P. The fundamentals of geoelectrical engineering. Leningrad: Nedra Publishing; 1965. (In Russ.)
14. Longman I. M. A method for the numerical evaluation of finite integrals of oscillatory functions. *Math. Comput.* 1960; 14 (69): 53–59.

Information about authors:

Vladimir K. Teplukhin – DSc (Engineering), Head of the Innovative Technologies Department, Directional Drilling Branch of Petro Tool LLC. E-mail: teplukhin-v@yandex.ru

Aleksandr N. Ratushniak – PhD (Engineering), Head of the Laboratory, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: geo_info@mail.ru

Wang Xiaolong – PhD (Sociology), Director, Leader Company. E-mail: dudkinmsu@yandex.ru

Для цитирования: Теплухин В. К., Ратушняк А. Н., Ван Сяолун. Электромагнитная технология диагностики состояния внутренних защитных покрытий промысловых трубопроводов // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 6. С. 60–69. DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-60-69

For citation: Teplukhin V. K., Ratushniak A. N., Wang Xiaolong. Electromagnetic technology of diagnosing the internal protective coating of field pipelines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 6: 60–69 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-6-60-69