

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗМЕРОВ ТРЕЩИН СИЛИКАТНО-ЭМАЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ ТРУБЫ

© 2020 г. Я.М. Гаджиев^{1*}, Э.Н. Ибрагимова^{2**}

¹Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
Аз 5000, Сумгаит, ул. Азизбекова, 2-ой квартал, 2/33

²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Аз.1119, Баку, ул.
Нахичеванского, 20
E-mail: * yasharm@gmail.com; ** elladai@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.06.2019; после доработки 30.07.2019
Принята к публикации 16.08.2019

Проведено экспериментальное исследование нахождения геометрических форм и размеров макро- и микротрещин на внутренней окружности силикатно-эмалевого покрытия трубы. Разработана схема программно-управляемой установки по измерению токов утечки через макро- и микротрещины в покрытии трубы. При помощи созданной дефектоскопической установки проведено исследование распределения плотности дефектов трубы вдоль силикатно-эмалевого покрытия и построения графической зависимости параметров этих дефектов от координат их локализации. В теоретической части была выведена зависимость токов утечки от длины и глубины залегания микротрещин вдоль силикатно-эмалевого покрытия трубы. Установка позволяет получить наиболее полную картину о распределении плотности трещин вдоль внутренней поверхности исследуемого объекта.

Ключевые слова: дефектоскопическая установка, схема управления, измерение токов утечки, геометрические размеры трещин, электрическое сопротивление трещин.

DOI: 10.31857/S0130308220010078

ВВЕДЕНИЕ

Многолетние экспериментальные исследования показывают, что силикатно-эмалевые покрытия трубы в условиях повышенных температур эксплуатации, давлений и высокоминерализованной среды можно успешно применять в нефтяной, химической, энергетической и др. отраслях промышленности [1,2].

В процессе нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы по различным причинам возможны нарушения сплошности целостности слоя покрытий. Нарушение сплошности хотя бы в одном месте приводит к выходу из строя всей системы трубопроводов, то есть способствуют дискредитации идеи защиты труб от агрессивной среды с помощью силикатно-эмалевого покрытия (ЭСП).

Причинами таких нарушений может быть как наличие дефекта в исходных материалах покрытий, так и появление трещин на поверхности силикатно-эмалевых покрытий трубы.

Следует отметить, что положительный опыт, накопленный в производстве нефтехимических труб с ЭСП в различных регионах России и Каспийского моря, вызвал большой интерес как российских, так и зарубежных специалистов к исследованиям процесса образования макро- и микротрещин на внутренней поверхности покрытий для различных размеров стандартных труб. Поэтому нанесение ЭСП на внутреннюю поверхность трубы требует детального исследования причин появления трещин и измерения размеров макро- и микротрещин в покрытиях вдоль всей поверхности ЭСП труб, для процесса нанесения ЭСП на внутреннюю поверхность трубы необходимо тщательное изучение природы возникновения макро- и микротрещин покрытий, а также измерение их размеров по всей внутренней поверхности стандартных труб с длинами 3—12 м [1, 2].

Более трудным, но важным практическим является определение координат локализации и геометрических размеров трещин в ЭСП труб.

В связи с этим разработана дефектоскопическая установка для исследования трещин на внутренней поверхности ЭСП трубы. Идея основана на измерении параметров коронного электрического ряда (КЭР) вдоль внутренней поверхности трубы, покрытой силикатно-эмалевым защитным слоем.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Технологическая схема экспериментальной измерительной установки приведена на рис. 1, в которой отражены основные узлы и ключевые компоненты установки. Функции и предназначения

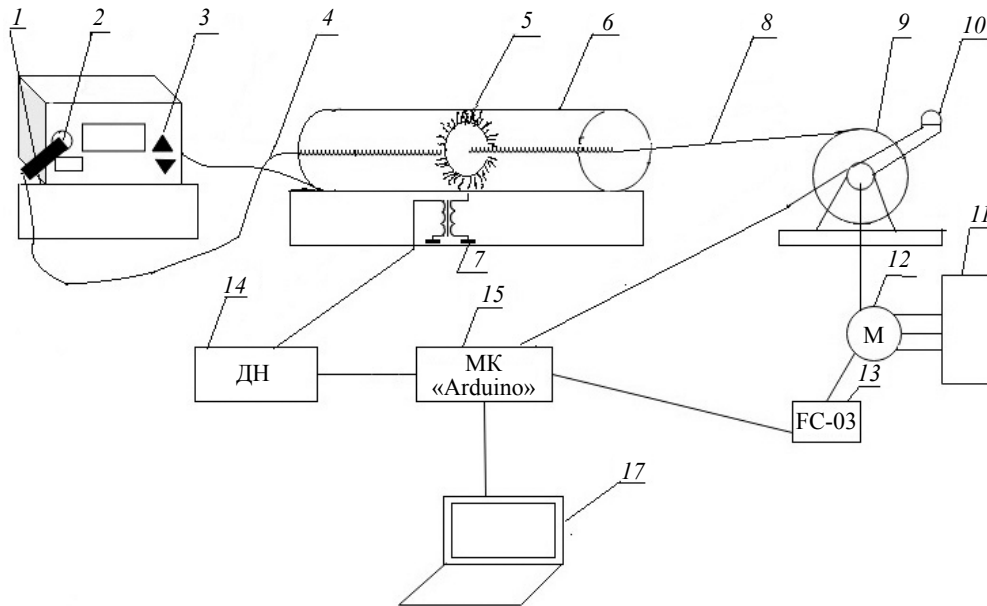


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной измерительной установки:

1 — регулируемый высоковольтный ВТ-1; 2 — кабели подачи высоковольтного испытательного напряжения; 3 — регулятор высоковольтного напряжения; 4 — соединительный высоковольтный кабель; 5 — тестирующий зонд типа «ерш»; 6 — исследуемая труба с внутренним силикатным покрытием; 7 — преобразовательный трансформатор для регистрации утечки и преобразования их в измеряемое напряжение; 8 — шнур тянущий тестирующий зонд типа «ерш»; 9 — вращающийся барабан; 10 — потенциометрический измеритель вращения; 11 — регулятор вращения мотора; 12 — электромотор 12-АО-2; 13 — двигатель-измеритель частоты вращения мотора; 14 — датчик напряжения; 15 — микроконтроллер «Arduino»; 17 — компьютер, управляющий режимами эксперимента.

этих узлов являются принципиально достаточными для воссоздания полной картины процесса проведения экспериментов по исследованию токов утечки через внутреннее силикатно-эмалевое покрытие трубы.

Объектом исследования является промышленная труба (6) с нанесенным внутренним слоем ЭСП. Испытательное напряжение (≤ 40 кВ) подается на «ерш»-образный (5) испытательный зонд, который при помощи прикрепленного тянущего шнура (8) перемещается вдоль внутренней поверхности трубы и тем самым последовательно сканирует изнутри трубу высоким напряжением (4).

Токи утечки снимаются измерительным трансформатором (7) и преобразуются в напряжение, измеряемое при помощи контроллера «Arduino» (15).

Контроллер (15) также принимает и обрабатывает сигналы, соответствующие координате нахождения зонда (5) в трубе (6).

Как видно из рисунка, схема управления и измерения дефектоскопической установки функционально состоит из трех частей, разработанных для выполнения следующих операций при проведении экспериментов по определению локализации трещин во внутренних силикатно-эмалевых покрытиях металлических труб:

а) измерение токов утечки от «ерша» (6) через трещины в силикатно-эмалевом покрытии и далее через измерительный трансформатор (1) и датчик (14) для измерения напряжения;

б) измерение длины части шнура с «ершом» (8), находящимся внутри испытательной трубы, для определения координаты положения «ерша» в трубе;

в) измерение скорости вращения асинхронного двигателя (12) и сравнение его с заданной величиной;

г) управление скоростью перемещения «ерша» за счет замедления или же ускорения скорости вращения асинхронного двигателя, тянущего шнур, который прикреплен к «ершу» через барабан (9).

Измерительные функции управления на установке дефектоскопа реализуются на базе микроконтроллера «Arduino» (15) со специальным программным обеспечением, разработанным для вышеуказанных конкретных измерений и функций управления. Функции управления и измерения выполнены в следующем порядке.

Измерение токов утечки через силикатно-эмалевое покрытие (рис. 2 а), представлена принципиальная электрическая схема измерительной части дефектоскопической установки для определения геометрических размеров трещин в покрытиях труб и для исследования природы их образования.

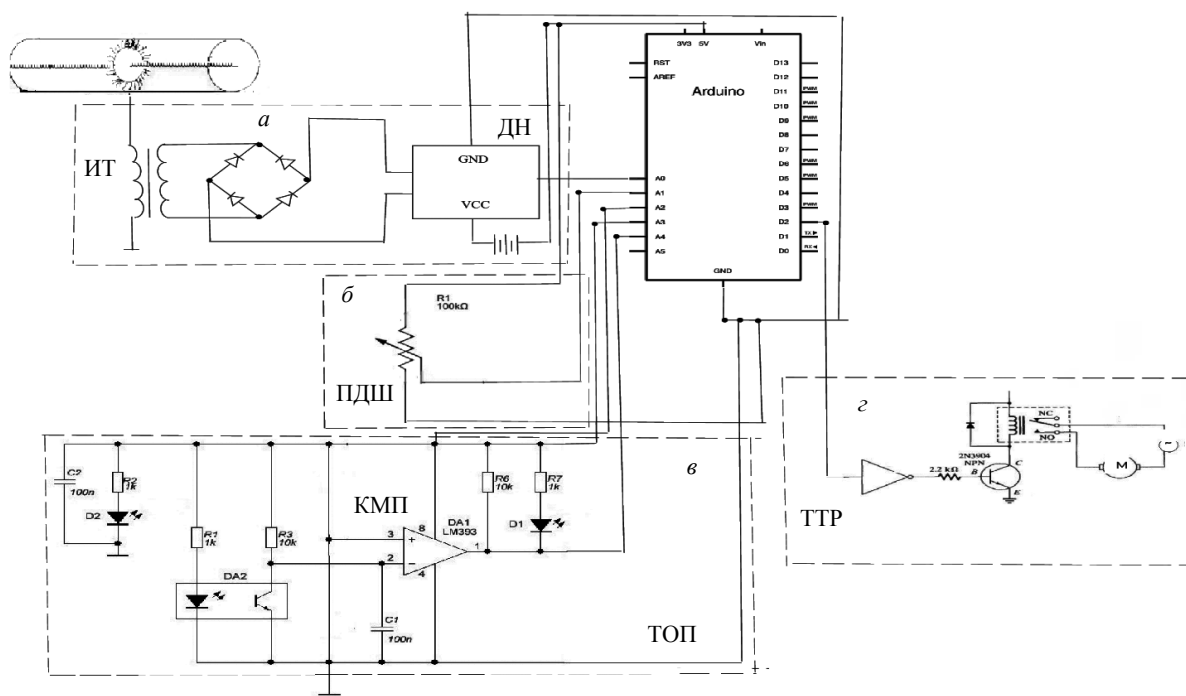


Рис. 2. Принципиальная схема управления и измерения на дефектоскопической установке, созданной на основе микроконтроллера «Arduino»:

a — измерение токов утечки через силикатно-эмалевое покрытие; *б* — определение текущей координаты локализации «ерша» в трубе; *в* — измерение скорости вращения асинхронного двигателя; *г* — управление (подключением/отключением трехфазным двигателем) напряжением, подаваемым на все три обмотки статора двигателя; ПДШ — потенциометр; ДН — датчик напряжения; ИТ — измерительный трансформатор; ТТР — транзисторная оптопара; КМП — компаратор.

Как видно из измерительной схемы, приведенной на рис. 2 (*a* — выделено штриховой линией), токи утечки от «ерша», проникающие через трещины в силикатно-эмалевом покрытии, проходят через первичную обмотку трансформатора (ИТ), со вторичной обмотки которого трансформированное напряжение подается на диодный выпрямитель и далее поступает на датчик напряжения (ДН) [3, 6].

Датчик напряжения (ДН) является масштабируемым согласователем измеряемого тока утечки с разрешаемой величиной входного напряжения микроконтроллера «Arduino».

Сигнал с датчика напряжения (ДН) подается на A_0 и GND-аналоговые входы «Arduino».

Последний с помощью разработанной программы калибрует и вычисляет параметры тока утечки и заносит текущие значения в память «Arduino», а также дублирует эти данные в РС.

Определение текущей координаты локализации «ерша» в трубе (см. рис. 2 *б*) происходит за счет измерения величины сопротивления потенциометра (ПДШ), бегунок которого механически соединен с вращающимся блоком (барабаном). Шнур, к которому подсоединен «ерш», через блок привязывается к ротору двигателя, который вытягивает шнур из измеряемой трубы. Таким образом, измеряемое сопротивление потенциометра будет линейно пропорционально длине части шнура с «ершом», находящимся в внутри испытательные трубы. Это помогает привязать измеряемые данные по токам утечки к текущим координатам положения ерша в трубе. С выходов VCC и GND калиброванное напряжение +5 В подается на потенциометр ПДШ, а напряжение с его бегунка подключается к аналоговому входу (A_1) «Arduino». Программным путем выстраивается зависимость между величиной выходного сопротивления ПДШ от координаты «ерша» в трубе.

Далее эти данные были использованы для построения искомой зависимости тока утечки от положения «ерша» в трубе [4, 5].

Измерение скорости вращения асинхронного двигателя (см. рис. 2 *в*) производится при помощи транзисторной оптопары (ТОП) (DA2), закрепленной перпендикулярно ротору электродвигателя и считывающей число его вращений. Сигналы с ТОП поступают на инверсный (–) вход компаратора (КМП), собранного на основе операционного усилителя. На другой вход компаратора подается опорное напряжение с аналогового выхода (A_2) «Arduino». Опорное напряжение определяется программным путем от «Arduino» и тем самым задает величину напряжения соответствующего желаемой скорости вращения двигателя. Итоговый сигнал компаратора с КМП подается на аналоговый вход (A_3) «Arduino» и после программной обработки поступает на аналоговый выход (A_4) [3, 6].

Далее этот сигнал поступает в схему управления вращением асинхронного электродвигателя.

В представленной схеме трехфазный двигатель управляется подключением/отключением фазных (~380 В) напряжений, подаваемых на все три обмотки статора двигателя (см. рис. 2з). Подача напряжений осуществляется через трехфазное реле (ТТР), управляемое сигналом, поступающим от цифрового выхода (D_2) через инвертор и NPN-транзистор.

Таким образом, сигнал отключения электродвигателя, поступающего от «Arduino» на реле, происходит в двух случаях: если достигается желаемая скорость вращения двигателя или в случае, когда «ерш» достигает конца исследуемой трубы [4, 6].

Сигналы с «Arduino» путем включения/отключения добиваются замедления или же ускорения скорости вращения асинхронного двигателя, тянущего через барабан шнур, который прикреплен к «ершу».

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электроискровой дефектоскоп данной установки позволяет произвести измерения электрического сопротивления трещин покрытия, выявляемых при прохождении зонда с высоковольтным напряжением вдоль внутренней поверхности трубы. Эти измерения определяют геометрические размеры обнаруженных трещин на внутренней поверхности трубы согласно известной формуле [1, 2] в следующей последовательности. Зная значение электрического сопротивления трещин, по этой формуле можно вычислить геометрические размеры трещин:

$$r = \rho \frac{l}{S}, \quad (1)$$

где r — электрическое сопротивление в зоне трещины, определяемое по экспериментальным измерениям; ρ — удельное сопротивление трещин покрытия трубы, принимается по максимальному значению $\rho = 10$ Ом·мм [2]; l — длина трещин вдоль внутренней окружности покрытия трубы; S — площадь поперечного сечения трещин, которая вычисляется следующим образом:

$$S = b\delta, \quad (2)$$

где b — ширина трещин, максимальное значение которого $b = 1,0$ мм [1, 2]; δ — толщина покрытия трубы.

По известному закону Ома с учетом толщины покрытия имеем

$$I = \frac{U\delta}{r}. \quad (3)$$

Для нашего случая U принимает значение $U = 40$ КВ.

Подставляя выражение r из формулы (1) с учетом (3) окончательно имеем

$$I = 40 \frac{\delta^2}{\rho l}. \quad (4)$$

Таким образом, формула (4) позволяет определить значения сила тока (I) от значения толщины покрытия (δ) и длины (l) трещин в покрытии трубы.

На рис. 3а приведены результаты экспериментальных исследований зависимости силы тока утечки (I) через трещину от значений толщины покрытия (δ) и длины (l) трещин при средних показаниях измерителей дефектоскопической установки. Экспериментальные исследования показывают, что при средних значениях толщины покрытия $\delta_1 = 0,3$ мм, $\delta_2 = 0,6$ мм, $\delta_3 = 1,2$ мм, плавно уменьшается зависимость силы тока от длины трещин (l). Для $\delta_1 = 1,2$ мм наблюдается резкое его уменьшение с увеличением длины трещин (l) вплоть до максимального значения $l = 1,5$ мм. Для толщин покрытия $\delta_2 = 0,3$ мм, $\delta_3 = 0,6$ мм с увеличением длины трещин (l) сила тока слабо меняется согласно показаниям прибора дефектоскопической установки.

На рис. 3б при значениях средних длин трещин $l_1 = 0,5$ мм, $l_2 = 1,0$ мм, $l_3 = 1,5$ мм с увеличением толщины покрытия трубы резко изменяется значение силы тока утечки, эти изменения связаны с усилением адгезии между внутренними поверхностями металла и силикатно-эмалевым покрытием стандартной трубы [2, 3].

Таким образом, экспериментально выявленные графические зависимости параметров покрытия позволяют определить геометрических размеры трещин покрытия в широком наборе любых диаметров и длин стандартных труб.

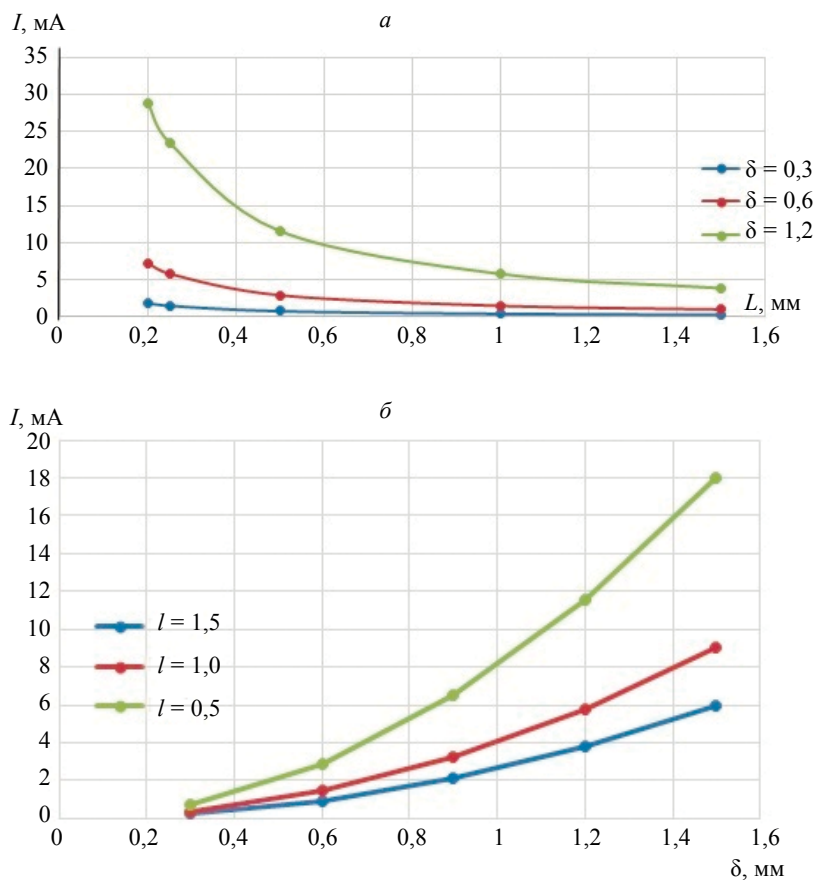


Рис. 3. График экспериментальной зависимости токов утечки: *а* — график экспериментальной зависимости токов утечки от толщины покрытий; *б* — график экспериментальной зависимости токов утечки от длины трещин.

ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование распределения микротрещин на внутренней поверхности силикатно-эмалевого покрытия для промышленных размеров стандартных труб. При этом разработанная дефектоскопическая установка позволяет определить значения координат обнаруженных различных трещин покрытия труб.

2. Представлена схема дефектоскопической установки управления для проведения измерения силы токов утечки через трещины в силикатно-эмалевом покрытии труб. Приведены результаты экспериментальных исследований графической зависимости силы токов утечки через трещины для различных толщин покрытия и длин образованных трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ibragimov N.Yu., Ibragimova E.N.* Apparatus for identifying microcracks on the inner surface of glazed pipes // *Glass and Ceramics*. 2018. V. 75. P. 272—274.
2. *Ibragimov N.Yu., Ibragimova E.N.* Investigation of Geometric Parameters of Cracks in Silicate Enamel Coatings of Steel Pipes // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. V. 54. P. 107—109.
3. *Simon M.* Programming Arduino: Getting Started with Sketches, second edition. United States: Copyright Mc-Grow Hill Education, 2016. 174 p.
4. *Ибрагимов Н.Ю., Ибрагимова Э.Н.* Дефектоскопическая установка трещиномер силикатных покрытий труб // *Дефектоскопия*. 2017. № 11. С. 55—57.
5. *Hacıyev Y.* Digital modulator for fiber-optical network // *Application of information and communication technologies-AICT*. 2015. V. 1. P. 214—219.
6. *Hacıyev Y.* Programmable laser light modulators for lidar systems // *Application of information and communication technologies-AICT*. 2017. V. 1. P. 386—391.