

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТИПА ВОЗДУШНАЯ ПОЛОСТЬ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ОБЛАСТИ СЛАБЫХ И СИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

В.В. Редько, Л.А. Редько

Технологический контроль качества изоляции кабельных изделий позволяет исключить передачу дефектных изделий потребителю и получить обратную связь для регулировки технологических режимов производства. В процессе технологического контроля полимерной изоляции кабельных изделий применяется электроискровой метод контроля. Изучение изменения параметров в процессе контроля является актуальной задачей. В статье рассматривается возможность обнаружения дефектов типа «воздушная полость» полимерной изоляции электрических проводов электроискровым методом контроля на основе контроля электрических параметров дефектного участка. Проведен сравнительный анализ поведения дефектов в области слабых и сильных электрических полей. Теоретически обосновано изменение электрической емкости и сопротивления диэлектрических потерь дефектного участка. Приводятся результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля в изоляции круглого одножильного провода в области слабых и сильных полей; описание и результаты экспериментальных исследований участка изоляции с воздушной полостью. На основе численного моделирования и анализа экспериментальных данных подтверждены теоретические предположения о том, что с увеличением прикладываемого напряжения электрическая емкость дефектного участка возрастает, а сопротивление диэлектрических потерь снижается. Описана возможность повышения информативности электроискрового контроля изоляции кабельных изделий.

Ключевые слова: изоляция кабельных изделий, дефект, контроль, электроемкостной метод контроля, электроискровой метод контроля, электрическое поле, электрическая прочность изоляции, электрическая емкость, диэлектрическая проницаемость.

Электроискровой метод контроля изоляции кабельных изделий [1] используют непосредственно во время производства на экструзионных линиях, на участках скрутки и контрольной перемотки, поэтому для оперативного устранения вызывающих брак причин необходимо обеспечить чувствительность к разным типам дефектов [2].

Геометрия, строение и состав полимера изоляции влияют на его электрические характеристики, и это является основой метода контроля [3]. Поэтому возникает необходимость определения четких границ возможностей обнаружения разных видов дефектов этим методом контроля.

Основной вид дефекта, который обнаруживается в классическом варианте электроискрового дефектоскопа – сквозной дефект. В таком случае возникает электрический пробой изоляции, что свидетельствует о наличии дефекта [4]. Однако физический принцип контроля позволяет обнаруживать и другие виды дефектов. По изменению локальных значений электрической емкости и диэлектрических потерь можно судить об изменениях структуры и химического состава

диэлектрика или об отклонении от нормы в конструкции [5, 6].

На кабельных предприятиях для контроля целостности изоляции используются электроемкостной метод (в области слабых полей) и электроискровой метод (в области сильных полей) [7].

Существуют различия поведения дефекта типа «воздушная полость» в области слабых и в области сильных электрических полей. Целью данной работы является выявление этих отличий. Теоретическим предположением является то, что в области слабых полей локальная электрическая емкость снижается. Это происходит потому, что диэлектрическая проницаемость воздуха существенно ниже диэлектрической проницаемости полимеров, используемых при изготовлении изоляции кабельных изделий. В области сильных электрических полей (напряженность в полимере близка к пробивной) в воздушной полости происходят интенсивные электрические разряды, что приводит к ее высокой проводимости. В результате электрическая емкость дефектного участка изоляции возрастает, как возрастают и диэлек-

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТИПА ВОЗДУШНАЯ ПОЛОСТЬ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ОБЛАСТИ СЛАБЫХ И СИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

трические потери, являющиеся следствием частичных разрядов [8].

На рисунке 1 показан пример расположения дефекта в изоляционном слое и его схема замещения. Емкость изоляции без дефекта для участка размером r :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r r^2}{r} = \varepsilon_0 \varepsilon_r r \quad (1)$$

где: ε_0 – электрическая постоянная, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика изоляции.

Емкость дефекта в области слабых полей:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 r^2}{r_0} \quad (2)$$

где: r_0 – размер дефекта вдоль приложения испытательного напряжения. Относительная диэлектрическая проницаемость дефекта, для упрощения, принята за единицу, так как дефект заполняется, как правило, воздухом.

Эквивалентная емкость участка с дефектом в области слабых полей:

$$C_{\Sigma} = \frac{C_{из} \cdot C_0}{C_{из} + C_0} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 r^2}{r + r_0(\varepsilon_r - 1)} \quad (3)$$

Коэффициент емкости, равный отношению емкости бездефектного участка и емкости участка с дефектом:

$$K_c = \frac{C}{C_{\Sigma}} = \frac{r_0}{r} (\varepsilon_r - 1) + 1 \quad (4)$$

Из приведенного значения видно, что емкость участка с дефектом ниже емкости бездефектного участка. При этом крайним случаем является равенство относительной диэлектрической проницаемости изоляции $\varepsilon_r=1$. В этом случае емкости окажутся равными.

Расчетная напряженность поля в дефекте:

$$E_0 = E_r \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

где: E_r – напряженность поля в диэлектрике.

С учетом того, что контроль проводится при напряженностях близких к напряженности

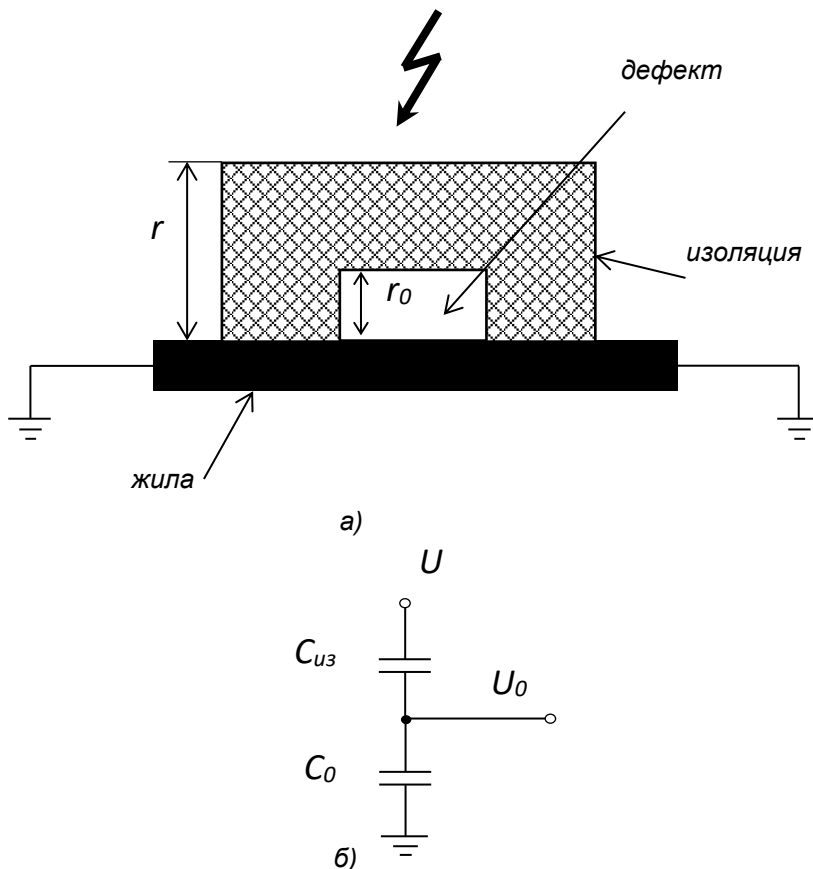


Рисунок 1 – Пример расположения дефекта в изоляционном слое а) и электрическая схема замещения б)

пробоя диэлектрика, соотношение $\varepsilon_r/\varepsilon_0$, как правило, находится в пределах 2..6, а электрическая прочность дефекта кратно ниже электрической прочности изоляции, то при контроле напряжением в области дефекта будут происходить электрические разряды

высокой интенсивности и область дефекта будет обладать высокой проводимостью. В этом случае всё испытательное напряжение будет приложено к целому участку изоляции $r-r_0$.

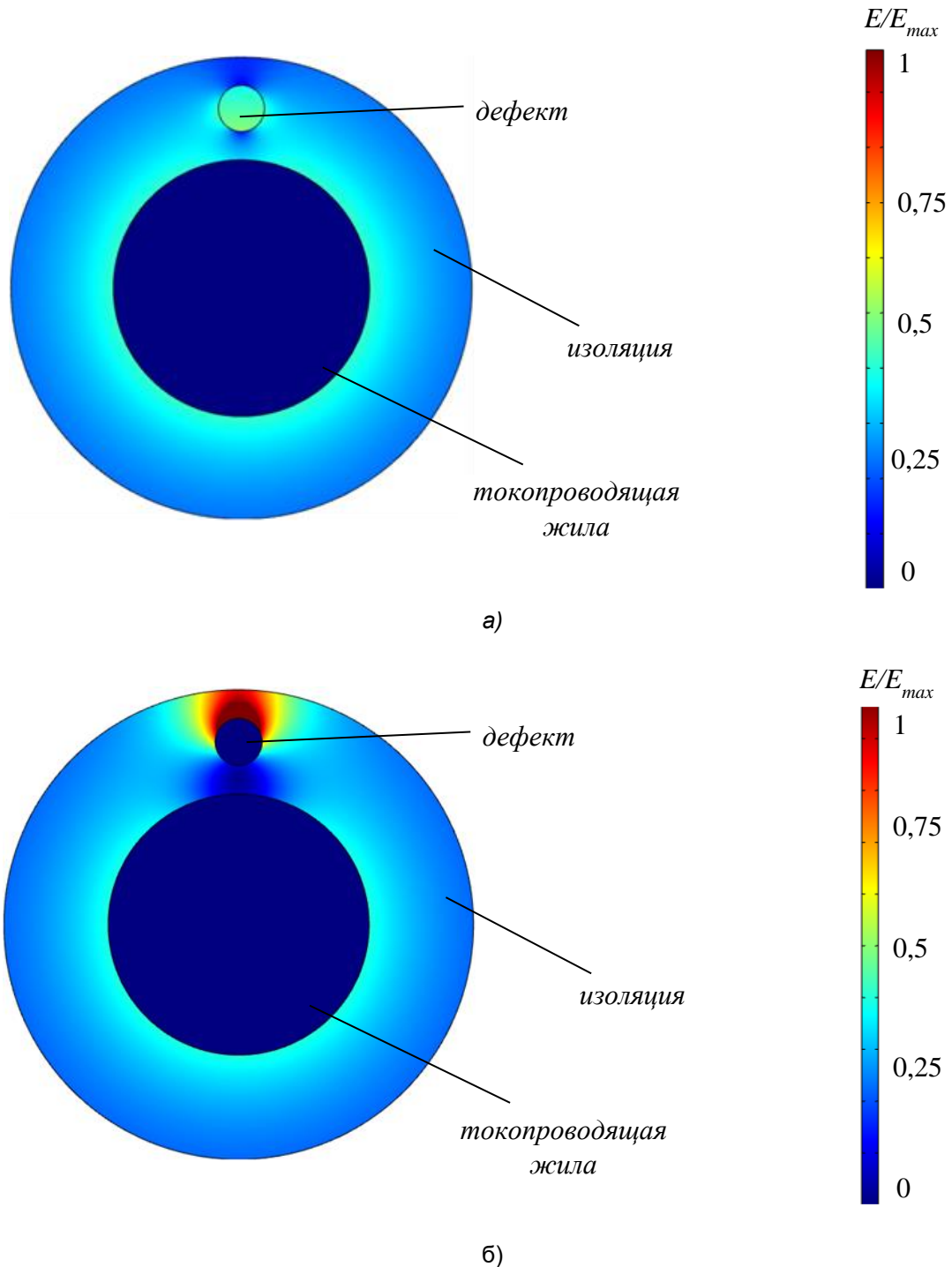


Рисунок 2 – Распределение напряженности электрического поля в изоляции круглого одножильного провода: а) в области слабых полей, б) в области сильных полей

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТИПА ВОЗДУШНАЯ ПОЛОСТЬ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ОБЛАСТИ СЛАБЫХ И СИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

Электрическая емкость дефекта потеряет физический смысл, а эквивалентная емкость участка изоляции с дефектом увеличится и будет равна:

$$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r r^2}{r - r_0} \quad (6)$$

Коэффициент емкости в области сильных полей:

$$K_c = \frac{C}{C_{\Sigma}} = \frac{r}{r - r_0} \quad (7)$$

В программе численного моделирования методом конечных элементов были получены картины распределения напряженности поля одножильного круглого провода с дефектом типа «воздушная полость» в области слабых (рисунок 2а) и сильных (рисунок 2б) полей.

В подтверждение, высказанных ранее, предположений были проведены экспериментальные исследования участка изоляции с воздушной полостью. Для удобства изготовления конструкция участка изоляции была несколько изменена. Ее схема приведена на рисунке 3.

Материал изоляции – фторопласт. Размеры элементов макета, следующие: толщина изоляторов 0,25 мм, как для верхнего, так и для двух боковых. Размер сторон верхнего изолятора 50 мм × 70 мм. Размер сторон бо-

ковых изоляторов 18 мм × 50 мм. Размер сторон дефекта (воздушного участка) 14 мм × 30 мм. Размер электрода 30 мм × 50 мм. Размеры верхнего изолятора превышают размер электрода для того, чтобы предотвратить электрический пробой между электродом и основанием. Конструкция закреплена воедино с помощью клея. Несмотря на низкую адгезию фторопласта с клеями общего применения, ее оказалось достаточно для проведения экспериментов. Слой клея имел толщину около 0,1 мм, что внесло коррективы в модель дефектного участка. В результате высота воздушного участка составила 0,45 мм.

Расчетная емкость конструкции между электродом и основанием в области слабых полей составила 22 пФ при $\varepsilon_r=2,1$

Экспериментально результирующая емкость макета определялась методом вольтметра-амперметра на переменном токе с учетом фазового сдвига и частоты [9,10].

Приложенное напряжение изменялось от 1 В до 12 кВ. Ограничение верхнего предела напряжения определялось электрической прочностью конструкции и требованиями нормативных документов. В соответствии с [3] для испытаний изоляции толщиной 0,5 мм требовалось напряжение амплитудой 10 кВ.

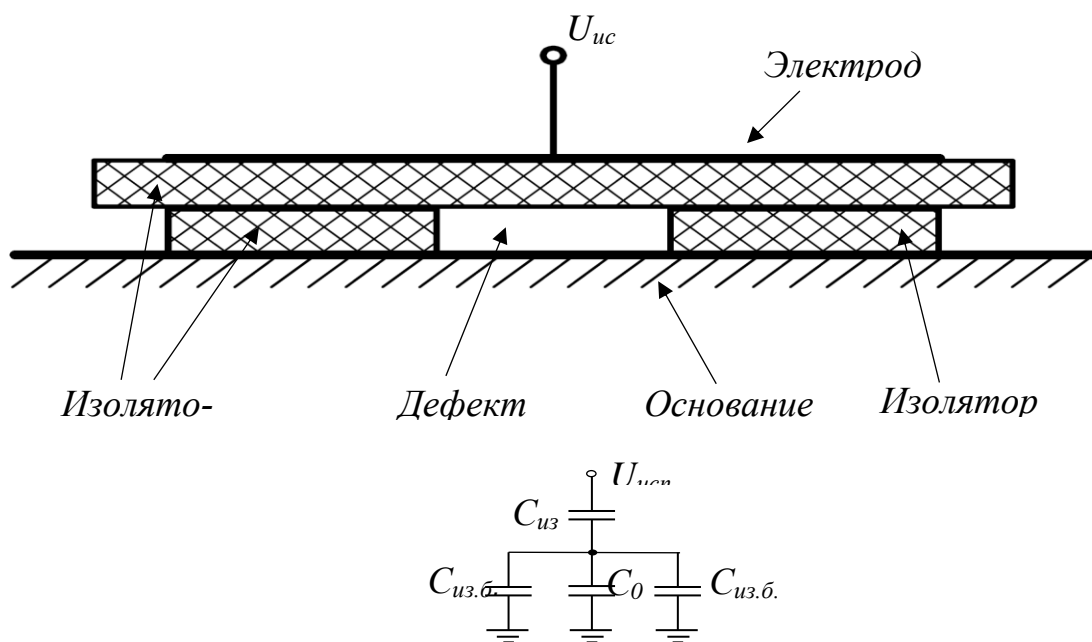


Рисунок 3 – Конструкция экспериментального макета дефекта в изоляционном слое - а) и электрическая схема замещения - б)

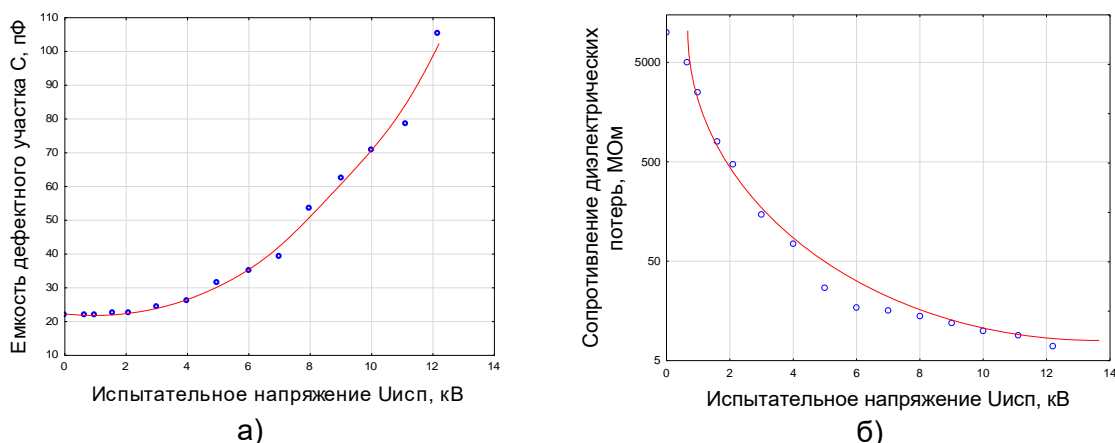


Рисунок 4 – Зависимость емкости дефектного участка – а) и сопротивления диэлектрических потерь – б) от прикладываемого напряжения

Результаты эксперимента приведены на рисунке 4.

Из приведенных зависимостей видно, что электрическая емкость дефектного участка возросла примерно в пять раз, а сопротивление диэлектрических потерь снизилось более чем в тысячу раз. Результаты экспериментов подтвердили теоретические предположения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе исследований результаты позволят повысить информативность электроискрового контроля и могут быть использованы при конструировании электроискровых дефектоскопов. Показано, что поведение дефектов изоляции типа «воздушная полость» различно в области слабых и в области сильных электрических полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Редько В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий [Электронный ресурс] : монография / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт неразрушающего контроля (ИНК), Кафедра физических методов и приборов контроля качества (ФМПК). — 1 компьютерный файл (pdf; 3.8 MB). — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — Заглавие с титульного экрана. — Электронная версия печатной публикации. — Доступ из корпоративной сети ТПУ. — Системные требования: Adobe Reader. Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m213.pdf>
2. Редько В.В., Л.Б. Бурцева. Аттестация высоковольтных испытателей изоляции// Ползуновский вестник. № 3/1 2011 г. С.111-113.
3. ГОСТ 23286-78. Кабели, провода и шнуры. Нормы толщин изоляции, оболочек и испытаний

напряжением.

4. Леонов А. П., Редько В. В. Выявление дефектов в изоляции кабелей и проводов при испытаниях по категории ЭИ-2 [Электронный ресурс] // Кабели и провода. — 2015. — № 1. — [С. 15-20]. — Заглавие с экрана. — Доступ по договору с организацией-держателем ресурса. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=23575657>

5. Старикова Н. С., Редько В. В., Вавилова Г. В. Контроль состояния изоляции кабельных изделий при изменению электрической емкости при высоковольтных испытаниях [Электронный ресурс] // Информационные технологии неразрушающего контроля : сборник научных трудов Российской школы конференции с международным участием, Томск, 27-30 октября 2015 г./ Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2015. — [С. 124-127]. — Заглавие с титульного экрана. — Свободный доступ из сети Интернет. — Adobe Reader. Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2015/C111/024.pdf>

6. Гольдштейн А.Е., Вавилова Г.В. Измеритель погонной емкости одножильного провода для технологического контроля// Ползуновский вестник. 2015. № 3. С. 38-42.

7. Determination of sensitivity for in-process control of cable product insulation [Electronic resource] / V. V. Redko [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2015. — Vol. 81 : Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. — [012083, 8 p.]. — Title screen. — Доступ по договору с организацией-держателем ресурса. — Adobe Reader. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/81/1/012083>

8. Техника высоких напряжений/ под ред. Д.В. Разевига. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1976. — 471 с.

9. Problems of Automatic Test of Insulation in Cable Production [Electronic resource] / V. V. Redko [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 671 : Innovations in Non-Destructive Testing (SibTest 2015). — [012049, 5 p.]. — Title

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ТИПА ВОЗДУШНАЯ ПОЛОСТЬ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ
КОНТРОЛЕ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ В ОБЛАСТИ СЛАБЫХ И СИЛЬНЫХ ПОЛЕЙ

screen. — Доступ по договору с организацией-
держателем ресурса. Режим доступа:
<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/671/1/012049>

10. Редько В.В., Редько Л.А., Старикова Н.С.
Повышение информативности электроискрового
технологического контроля изоляции кабельных
изделий// Ползуновский вестник. 2013. № 2. С.
168-171.

Редько Виталий Владимирович,
к.т.н., доцент отделения контроля и диа-
гностики Инженерной школы неразрушаю-
щего контроля и безопасности Томского
политехнического университета, тел.
(3822) 417307, e-mail: ultratone@tpu.ru;

Редько Людмила Анатольевна, к.т.н.,
доцент отделения контроля и диагностики
Инженерной школы неразрушающего кон-
троля и безопасности Томского политехни-
ческого университета, тел. (3822) 417307,
e-mail: laredko@tpu.ru.