УДК 620.179.18
DOI: 10.14489/td.2025.02.pp.004-013

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБ ДИАМЕТРОМ ДО 1420 ММ



В. А. Сясько,
д-р техн. наук,
Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург,
Россия.
E-mail: 9334343@gmail.com



А. С. Мусихин,
канд. техн. наук,
ООО «Константа»,
Санкт-Петербург,
Россия.
E-mail: musihinalexei@mail.ru



И. С. Гнивуш,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург,
Россия.
E-mail: klin4_g@mail.ru



М. С. Степанова,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
Санкт-Петербург,
Россия.
E-mail: mar1a.s.s@yandex.ru



Д. И. Антонов,
Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург,
Россия.
E-mail: antonovden99@mail.ru

В настоящее время основным методом выявления дефектов сплошности диэлектрических покрытий труб в поточном производстве является электроискровой метод неразрушающего контроля. При этом в процессе контроля используются электроды, имеющие значительную площадь контроля и формирующие значительную электрическую реактивную нагрузку на генератор высокого напряжения. При этом существующие методики аттестации оборудования не устанавливают требования к электрической нагрузке при аттестации.

Разработан генератор высокого импульсного напряжения повышенной мощности на основе двухкаскадного накопителя электрического заряда, рассчитаны основные параметры генератора высокого напряжения, даны рекомендации по дополнению существующих методик аттестации требованиями к эквивалентным электрическим нагрузкам, показано влияние эквивалентных электрических емкости и сопротивления системы «электрод–диэлектрическое покрытие–токопроводящее основание» на импульсное и постоянноточное испытательное напряжение метода.

Рассмотренный процесс электроискрового контроля труб в полевых условиях и в условиях поточного производства показал значительную зависимость испытательного напряжения метода от нагрузочного импеданса системы «электрод–диэлектрическое покрытие–токопроводящее основание». При этом предложенное техническое решение по увеличению скорости накопления заряда в электрической емкости каскада накачки и повышению мощности трансформаторного узла позволяет обеспечивать требуемое нормативной документацией испытательное напряжение в процессе контроля.

Указана необходимость аттестации электроискровых дефектоскопов на тех объектах, на которых они применяются в комплекте с используемыми электродами, что особенно актуально для систем автоматизированного контроля сплошности покрытий труб.

Для случаев использования электродов повышенной емкости (с увеличенной длиной перекрытия l или диаметром контролируемых труб D от 1420 мм) предлагается использовать несколько генераторов высокого напряжения, работающих на некотором удалении друг от друга.

***Ключевые слова*:** сквозной дефект, дефект покрытия, электроискровой метод, покрытие, контроль сплошности, магистральный трубопровод, нанесение покрытия.

V. A. Syasko[1], A. S. Musikhin[2], I. S. Gnivush[3], M. S. Stepanova[3], D. I. Antonov[1]
[1]All-Russian Research Institute of Metrology named after D. I. Mendeleev, St. Petersburg, Russia
[2]Constanta LTD, St. Petersburg, Russia
[3]St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II St. Petersburg, Russia

AUTOMATION OF PULSE ELECTROSPARK TESTING OF DIELECTRIC COATINGS OF METAL PIPES UP TO 1420 MM IN DIAMETER

At present, the main method of detecting defects in the continuity of dielectric pipes coatings in in-line production is the electrospark method of non-destructive testing. In this process, electrodes with a significant control area and forming a significant electrical reactive load on the high-voltage generator are used. In this case, the existing methods of equipment certification do not establish requirements for electrical load during certification.

The authors of the article developed a generator of high pulse voltage of increased power on the basis of a two-stage electric charge accumulator, calculated the main parameters of the generator of high voltage, gave recommendations for supplementing the existing methods of certification requirements for equivalent electrical loads, showed the influence of equivalent electrical capacitance and resistance of the system 'electrode–dielectric coating–conductive base' on the pulse and DC test voltage of the method.

The process of electrospark testing of pipes under field conditions and in-line production conditions considered by the authors has shown a significant dependence of the test voltage of the method on the load impedance of the system 'electrode–dielectric coating–conductive base'. In this case, the technical solution proposed by the authors to increase the rate of charge accumulation in the electrical capacitance of the pumping stage and increase the power of the transformer unit allow to provide the test voltage required by the normative documentation in the process of testing.

The authors point out the necessity of certification of electrospark flaw detectors at those objects where they are used in a set with the electrodes used, which is especially important for the systems of automated control of pipes coatings continuity.

For cases of using electrodes of increased capacity (with increased overlap length l or diameter of controlled pipes D from 1420 mm) the authors suggest using several high-voltage generators working at some distance from each other.

***Keywords*:** through defect, coating defect, electrospark method, coating, continuity testing, trunk pipeline, coating application.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024

Received 10.10.2024

Введение

На сегодняшний день для постройки новых и поддержания существующих магистральных и распределительных трубопроводных систем, а также различного стационарного технологического оборудования, систем нефте- и газодобычи требуется большая номенклатура труб самого различного назначения с защитными диэлектрическими покрытиями [1 – 4], предотвращающими (или замедляющими) протекание коррозионных процессов разрушения металла. Очевидно, что наличие сквозных дефектов таких покрытий приводит к потере основных защитных свойств покрытий и сокращению срока службы трубопровода. Для выявления сквозных дефектов на этапе нанесения покрытий труб в производственных линиях организуются технологические участки, предназначенные для электроискрового контроля наружных, а в ряде случаев и внутренних покрытий. Проведение контроля подразумевает формирование в контролируемой области электрического поля высокой напряженности, достаточной для образования искрового разряда в зоне нарушения сплошности покрытия (по воздуху) [5 – 9], но недостаточной для формирования искрового разряда в зоне бездефектного покрытия.

Технологический процесс нанесения внешних и внутренних защитных покрытий металлических труб, как правило, организован в виде поточной производственной линии, в которую встраивается участок проведения электроискрового контроля, подразумевающий прохождение труб различного диаметра через систему электродов (рис. 1), формирующих испытательное напряжение метода, которое может быть импульсным или постоянным [10 – 14]. При этом импульсный режим работы для электроискровых дефектоскопов предпочтителен по ряду причин: он оказывает меньшее воздействие на качество самого покрытия (электрическое старение диэлектрика проявляется в меньшей степени), такой режим работы более энергоэффективен по сравнению с режимом постоянного тока, возможно использование емкостного заземления, а также импульсный режим работы безопаснее при работе с высоким напряжением [15, 16]. С другой стороны, импульсные дефектоскопы формируют импульсы испытательного напряжения с определенной частотой, от которой напрямую зависит максимальная скорость перемещения электрода

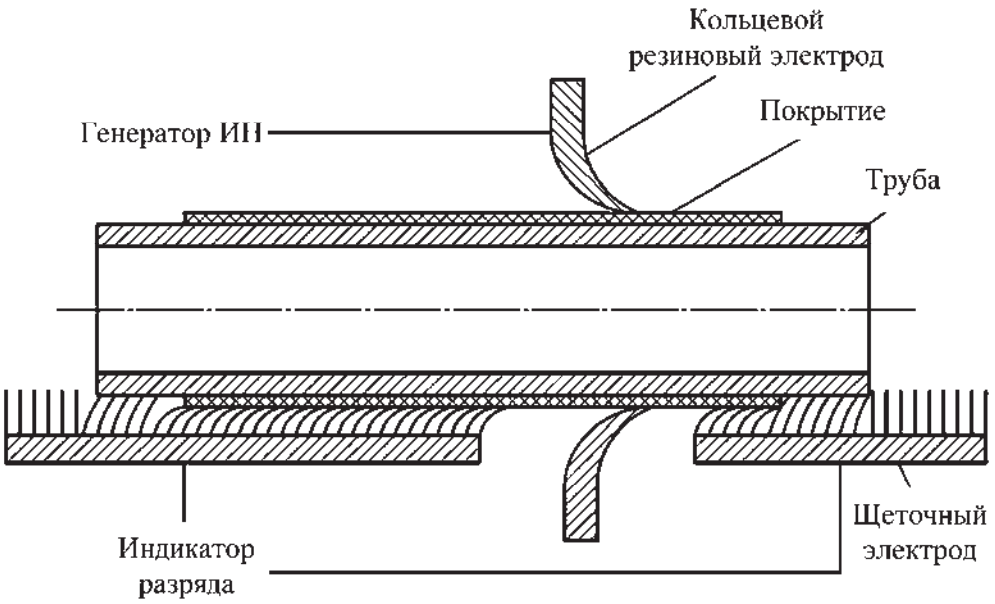


Рис. 1. Схематичное изображение процесса контроля сплошности диэлектрического покрытия металлической трубы электроискровым методом

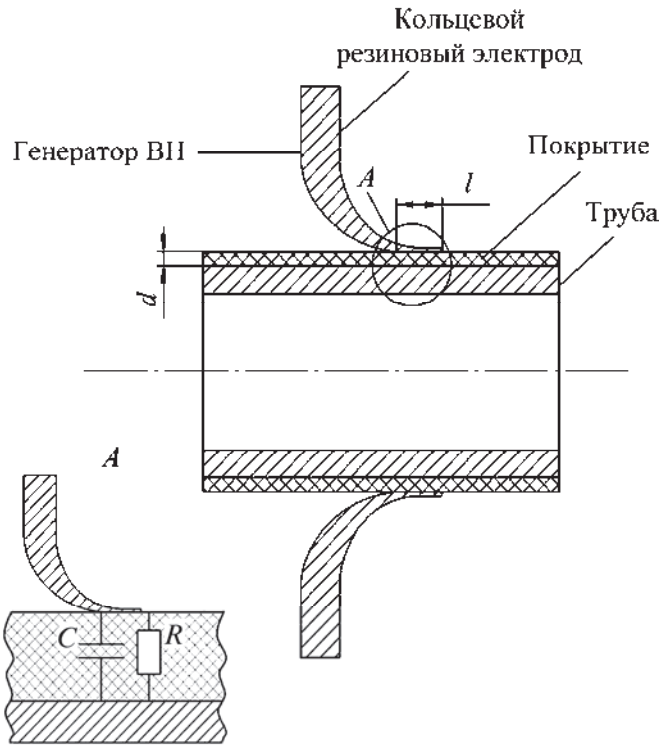


Рис. 2. Схематичное изображение области нахлеста контролирующего электрода на покрытие:
d – толщина диэлектрического покрытия; *l* – ширина области наложения электрода на покрытие

относительно трубы [17]. Также к *генераторам высокого импульсного напряжения* (ГИН) предъявляются повышенные требования по обеспечению наличия и поддержания испытательного напряжения на электроде с учетом возрастающей электрической емкости системы «электрод–покрытие–труба» [18].

Обеспечение стабильности испытательного напряжения осуществляется внутренними средствами регулирования приборов [19, 20] и зависит от конкретной модели. Особую сложность для систем поддержания напряжения представляют электроды, имеющие большую площадь контакта с объектом контроля [21, 22] и использующиеся для контроля покрытий труб диаметром больше 800 мм в поточных линиях. Система «электрод–покрытие–труба» может быть представлена в виде эквивалентной электрической схемы замещения (рис. 2).

При однополярном импульсном напряжении амплитудой около 40 кВ электрический ток, равный 1…3 мА, вызывается электрическим сопротивлением R и емкостью C системы «электрод–покрытие–труба», является достаточной электрической нагрузкой для выхода на предельную мощность ГИН современных электроискровых дефектоскопов. При этом напряжение на выходе ГИН становится нестабильным и, как правило, снижается, уменьшая при этом градиент напряженности электрического поля ΔE в межэлектродном промежутке (рис. 3). В свою очередь снижение ΔE может приводить к пропускам сквозных дефектов покрытия, снижая достоверность электроискрового контроля.

Учитывая, что C и R зависят от конструкции электродных узлов системы «электрод–покрытие–труба», при проектировании оборудования и при его аттестации необходимо рассматривать ГИН и систему электродов как единую систему, параметры которой могут быть подтверждены только в сборе.

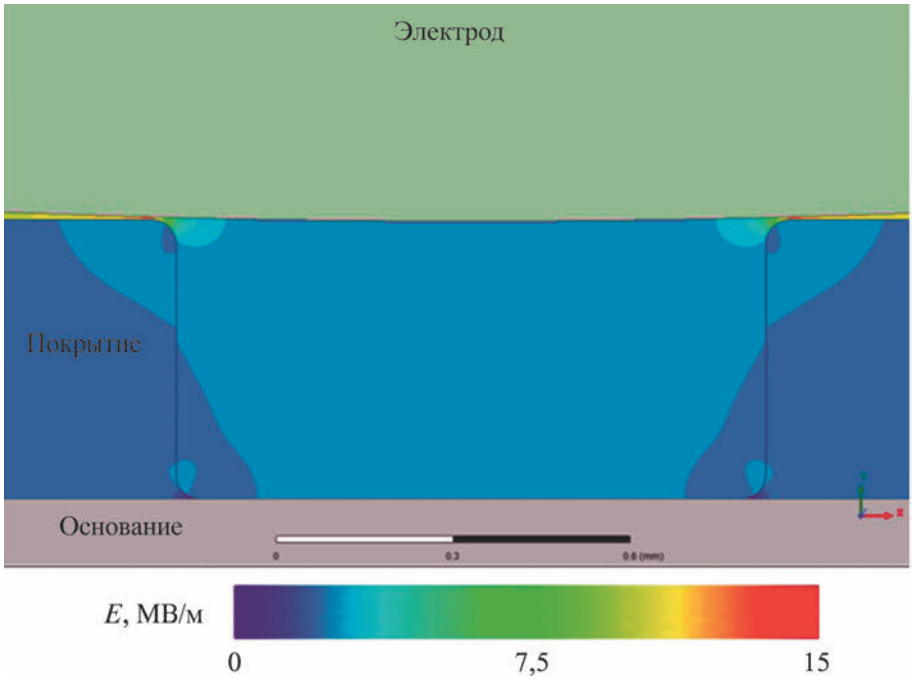


Рис. 3. Конечно-элементная модель распределения напряженности электрического поля в сквозном дефекте покрытия диаметром 1 мм, создаваемом пружинным электродом. Крупный план дефекта

Материалы и методы

Систему «электрод–покрытие–труба» можно представить как цилиндрический конденсатор, соответственно, его емкость рассчитывается по формуле [23]

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln\left(\dfrac{\dfrac{D}{2}+d}{\dfrac{D}{2}}\right)},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость покрытия; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; l – ширина области наложения электрода на покрытие; D – диаметр металлической трубы; d – толщина диэлектрического покрытия.

Активный импеданс X_R, зависящий от материала покрытия, рассчитывается по формуле

$$X_R = \frac{\rho}{2\pi l}\ln\left(\frac{\dfrac{D}{2}+d}{\dfrac{D}{2}}\right),$$

где ρ – удельное объемное электрическое сопротивление.

Ширина области наложения электрода на покрытие l определяется исходя из максимально допустимой кривизны контролируемых труб. С учетом того, что кривизна труб должна составлять не более 0,2 % общей длины [16], максимальная длина производимых труб составляет 12 м, следовательно, $l \approx 30$ мм.

Для трубы диаметром D = 1420 мм с полиэтиленовым диэлектрическим покрытием (ρ = 10^{15} Ом/см) толщиной d = 6 мм $X_R = 1{,}19\cdot10^{16}$ Ом.

Емкостной импеданс X_C, зависящий от несущей частоты f импульса испытательного напряжения и емкости C системы, равен [23]

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Для f = 20 кГц при C = 165 пФ

$$X_C = 4{,}8\cdot10^4 \text{ Ом}.$$

Импеданс эквивалентной электрической схемы замещения области контроля $X_\text{Н}$ зависит преимущественно от $X_\text{Н}$:

$$X_\text{Н} = \frac{RX_C}{R+X_C} = 4{,}8\cdot10^4 \text{ Ом}.$$

Как видно из рис. 4, активной составляющей импеданса системы «электрод–покрытие–труба» при определении мощности ГИН можно пренебречь. Однако реактивная составляющая импеданса X_C при контроле сплошности покрытий труб с помощью кольцевых электродов (электродов, имеющих большую площадь контакта с покрытием) является достаточной электрической нагрузкой для ГИН многих современных электроискровых дефектоскопов, не позволяющей стабильно поддерживать на контролирующем электроде заданное испыта-

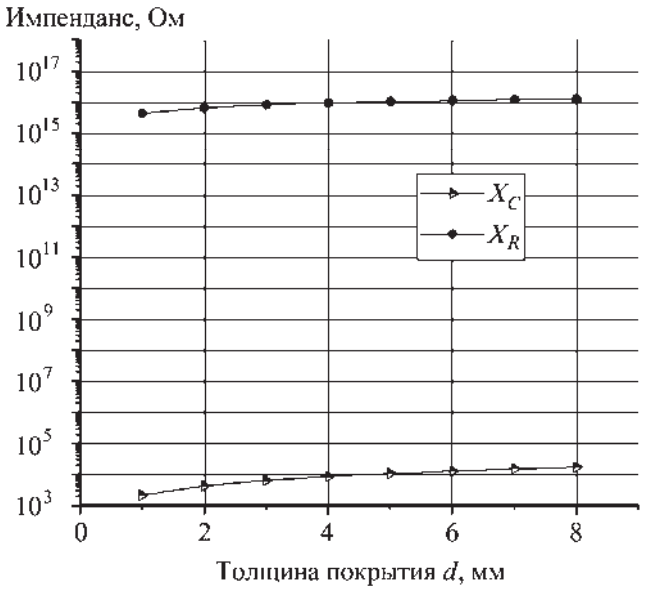


Рис. 4. Зависимость активного X_R и реактивного X_C импедансов системы «электрод–покрытие–труба» от толщины контролируемого покрытия

тельное напряжение, что в ряде случаев значительно снижает достоверность электроискрового контроля.

Исходя из этого при проектировании автоматизированных систем электроискрового контроля возникает необходимость учета мощности ГИН и частоты следования импульсов для обеспечения стабильности заданной амплитуды импульсов испытательного напряжения в диапазоне рабочих значений X_C на требуемой скорости прохождения трубы сквозь кольцевой электрод (скорости проведения контроля).

Так как мощность ГИН определяется электрической емкостью системы «электрод–диэлектрическое покрытие–электропроводящее основание», необходимо сопоставить реальные конструкции электродов и соответствующие им значения электрической емкости системы (рис. 5).

Очевидно, что с увеличением площади контакта электрода с поверхностью покрытия увеличивается и емкость, нагружающая ГИН. Для автоматизированных систем электроискрового контроля целесообразно проводить контроль всего объекта (трубы) за один проход [24]. Помимо этого, для ГИН, встроенных в поточную линию, важным фактором является частота следования импульсов испытательного напряжения, так как от нее зависит максимальная скорость $v_т$ прохождения труб через зону контроля. Для современных поточных линий $0{,}3 \le v_т \le 0{,}6$ м/с, что соответствует $50 \le f \le 100$ Гц. Учитывая, что современные ГИН поточных электроискровых дефектоскопов имеют частоту следования импульсов 30…50 Гц [17], при повышенных скоростях перемещения трубы вдоль зоны контроля возникают участки, попадающие в зону контроля между импульсами испытательного напряжения. Следовательно, такой контроль никак нельзя назвать достоверным.

В целях обеспечения требуемой мощности ГИН и частоты следования импульсов на основе разработанной авторами статьи в САПР LTspice модели переходных процессов была предложена схема повышения мощности источника высокого импульсного напряжения, основанная на двукратном увеличении скорости заряда накопительного конденсатора C1 и повышении номинального выходного тока трансформаторного узла (рис. 6, *б*). При этом повышение выходной мощности ГИН приводит к кратному повышению тока потребления схемы и увеличению габаритных размеров прибора, в то время как для обеспечения стабильного высокого напряжения на электроде при использовании электродов, формирующих относительно небольшую $C_н$ (например, веерный электрод), достаточно использовать общепринятую схему накачки с маломощным импульсным трансформатором (рис. 6, *а*).

Важнейшим показателем электроискрового дефектоскопа является энергия, накапливаемая в $C_н$, образуемая электродом и объектом контроля, при прохождении импульса $U_н$.

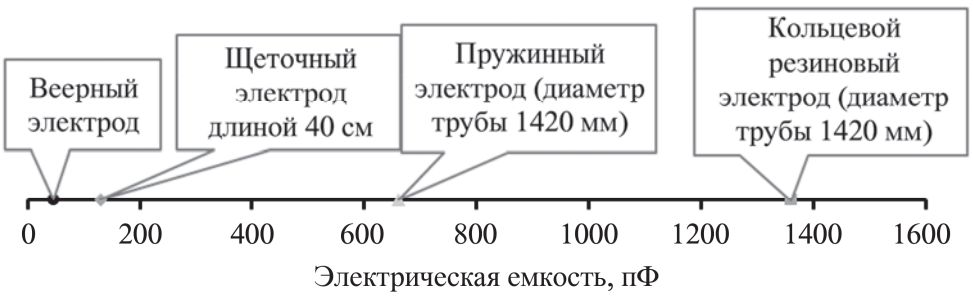


Рис. 5. Емкость системы «электрод–диэлектрическое покрытие–электропроводящее основание» $C_н$, создаваемая различными электродами в системе «электрод–диэлектрическое покрытие–электропроводящее основание» в процессе электроискрового контроля. Емкость определена для полиметилметакрилата толщиной 2 мм (ε = 3,1) для импульсов f = 20 кГц

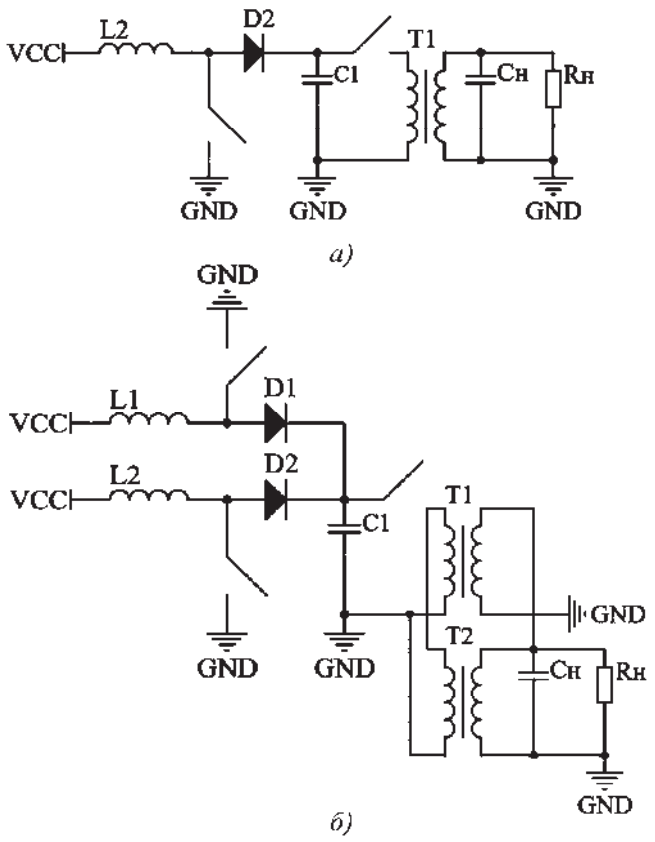


Рис. 6. Электрическая схема ГИН с одним каскадом накачки и одним трансформатором (*а*) и с двумя каскадами накачки и двумя трансформаторами (*б*)

В момент достижения напряжением $U_н$ максимума энергия $W_н$ в $C_н$

$$W_н = \frac{C_н U_н^2}{2}.$$

$U_н$ по стандарту ГОСТ 34395–2018 зависит от толщины d диэлектрического покрытия. Для $d \geq 1$ мм

$$U_н\,[кВ] = 7{,}843\left[\frac{кВ}{мм^{0{,}5}}\right]\sqrt{d\,[мм]}\,.$$

Для $d < 1$ мм

$$U_н\,[кВ] = 3{,}294\left[\frac{кВ}{мм^{0{,}5}}\right]\sqrt{d\,[мм]}\,.$$

Емкость рабочего электрода $C_э$ зависит от толщины диэлектрического покрытия:

$$C_э\,[пФ] = \frac{C_{0э}[пФ \cdot мм]}{d[мм]},$$

где $C_{0э}$ – удельная емкость рабочего электрода.

Энергия, накапливаемая в $C_н$, не зависит от толщины покрытия:

$$W_н[Дж] = \frac{7{,}843^2 \cdot 10^6\left[\frac{В^2}{мм}\right] \cdot d[мм]}{2d[мм]} C_{0э}[пФ \cdot мм] \approx$$

$$\approx 30{,}8 \cdot 10^{-6} C_{0э}[пФ \cdot мм].$$

Тогда максимальная энергия на пике импульса составит

$$W_н = 30{,}8 \cdot 10^{-6} \cdot 1250[пФ \cdot мм] \approx 38{,}5[мДж].$$

По стандартам с линейным изменением рабочего напряжения от толщины 5 [кВ/мм]

$$W_н[Дж] = \frac{5^2 \cdot 10^6\left[\frac{В^2}{мм}\right] \cdot d[мм]}{2} C_{0э}[пФ \cdot мм] =$$

$$= 12{,}5 \cdot 10^{-6} d[мм] C_{0э}[пФ \cdot мм].$$

Для того же электрода при максимальной толщине покрытия 6 мм

$$W_н = 12{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 6[мм] \cdot 1250[пФ \cdot мм] \approx 93{,}7[мДж].$$

Для того же электрода при максимальной толщине покрытия 3,5 мм

$$W_н = \left(12{,}5 \cdot 3{,}5 + 25 + \frac{12{,}5}{3{,}5}\right) \cdot 10^{-6} \cdot 875[пФ \cdot мм] \approx$$

$$\approx 102{,}3[мДж].$$

Прибор обеспечит возможность работы в соответствии с любым стандартом при энергии пика импульса $W_н$ = 105 мДж при максимальной $C_{0э}$ = = 1250 пФ·мм.

Таким образом, узлу генератора высокого импульсного напряжения за промежуток времени между импульсами $U_н$ необходимо накопить энергию, превышающую $W_н$ = 105 мДж (с учетом КПД трансформатора T = 0,98). Рассмотрим процесс накопления энергии в накопительном конденсаторе С1 (см. рис. 6) при длительности импульса $U_н \approx 20$ мкс и периоде следования импульсов $\tau = 20$ мс.

При открывании нормально закрытого ключа К1 через L1 начинает протекать электрический ток, при этом

$$X_L = 2\pi f L;$$

$$I_L = \frac{U_L}{X_L + R}.$$

Отсюда по стандартной формуле можно определить энергию, запасаемую в индуктивности L1 за один цикл открытия ключа К1 [18]:

$$W_L = \frac{LI^2}{2} = \frac{L\left(\frac{U}{2\pi fL + R}\right)^2}{2} =$$

$$= \frac{200 \cdot 10^{-6}\left(\frac{12}{2\pi\frac{1}{10^{-4}}200 \cdot 10^{-6} + 0{,}05}\right)^2}{2} =$$

$$= 90 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Конденсатор $C_к$ заряжается импульсным напряжением, накапливает электрический заряд на своих обкладках. Время заряда конденсатора зависит от емкости конденсатора и сопротивления зарядной цепи.

Процесс заряда и разряда протекает по экспоненте [23]:

– заряд конденсатора

$$U_C = U_0\left(1 - e^{-\frac{t}{RC_к}}\right);$$

– разряд конденсатора

$$U_C = U_0 e^{-\frac{t}{RC_к}}.$$

За полное время заряда/разряда конденсатора принимается $5RC_к$, за которое заряд конденсатора изменится на 99 %:

$$U_C = U\left(1 - e^{-\frac{t}{RC_к}}\right);$$

$$R = R_D + \frac{1}{2\pi f C_к};$$

$$W_C = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{C_к\left(U\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)\right)^2}{2} =$$

$$= \frac{6 \cdot 10^{-6}\left(350\left(1 - e^{-\frac{10^{-5}}{\left(\frac{0{,}6}{0{,}1} + \frac{1}{2\pi \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5}\right) \cdot 6 \cdot 10^{-6}}}\right)\right)^2}{2} =$$

$$= 84 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Таким образом, для накопления $W_н$ = 105 мДж на накопительном конденсаторе С1 (см. рис. 6) потребуется порядка 1200 накачивающих импульсов (актов коммутации ключа К1).

Обсуждение

Для подтверждения нагрузочной способности предложенных узлов ГИН было собрано несколько прототипов и проведены испытания режимов работы при проведении контроля измерения выходного напряжения при различных $C_н$ (рис. 7, *а*). Для реализации эксперимента был собран стенд, в состав которого входят:

1) три электроискровых дефектоскопа «Корона 2.2С», «Корона 2.2», KODIN 6DJ (ГИН на схеме);

2) имитация нагрузки: аналог электрода – лист токопроводящей резины, аналог защитного покрытия – лист оргстекла толщиной 2 мм, аналог токопроводящего основания – лист токопроводящей резины (емкостная нагрузка);

3) делитель напряжения PINTEK HVP-39pro;

4) цифровой осциллограф Tektronix TDS 1002;

5) измеритель электрической емкости LRC Meter APPA 707 Tweezer.

В ходе эксперимента величина емкостной нагрузки регулировалась путем изменения площади перекрытия листов токопровоящей резины. Высокое напряжение прикладывалось к имитатору электрода, значение высокого напряжения измерялось на цифровом осциллографе (рис. 7, *а*).

Как видно из полученных зависимостей, два из трех дефектоскопов могут применяться для контроля сплошности труб по ГОСТ 51164 только с использованием веерных щеточных и пружинных электродов до определенного диаметра ($D \approx 1000$ мм). ГИН стационарного дефектоскопа при этом может обеспечить требуемое испытательное напряжение, в том числе для рамочных электродов, используемых в поточных производственных линиях, для труб до $D \approx 1200$ мм. При контроле труб большего диаметра необходимо разбивать контролирующий рамочный электрод на секции и контролировать трубу в несколько проходов (что, как правило, нецелесообразно) либо использовать систему из двух и более ГИН в сборе с электродами, расположенными на некотором удалении друг от друга.

При этом все известные авторам методики аттестации и калибровки электроискровых дефектоскопов не предполагают обязательного подтверждения метрологических и технических характеристик приборов непосредственно на объекте эксплуатации и ограничиваются испытаниями прибора в лабораторных условиях с использованием измерительного оборудования, входной импеданс которого кратно превышает нагрузочный импеданс, создаваемый системой «электрод–диэлектрическое покрытие–токопроводящее основание», что в свою очередь может приводить к проведению недостоверного контроля сплошности покрытий электроискровым методом.

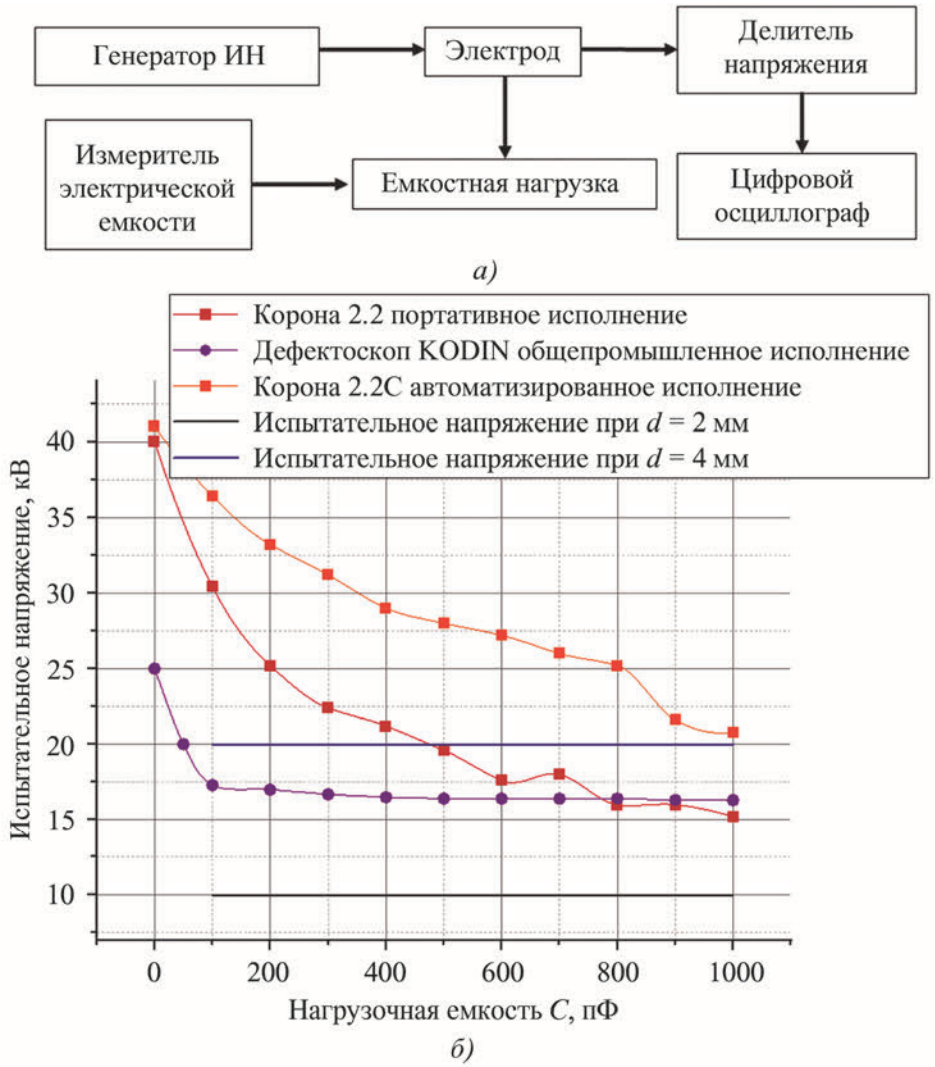


Рис. 7. Структурная схема экспериментальной установки (*а*) и зависимость испытательного напряжения дефектоскопов «Корона 2.2», «Корона 2.2С», KODIN 6DJ от нагрузочной емкости (*б*)

Заключение

Рассмотренный процесс электроискрового контроля труб в полевых условиях и в условиях поточного производства показал значительную зависимость испытательного напряжения метода от нагрузочного импеданса системы «электрод–диэлектрическое покрытие–токопроводящее основание». При этом предложенное техническое решение по увеличению скорости накопления заряда в электрической емкости каскада накачки и повышению мощности трансформаторного узла позволяют обеспечивать требуемое нормативной документацией испытательное напряжение в процессе контроля.

Указана необходимость аттестации электроискровых дефектоскопов на тех объектах, на которых они применяются в комплекте с используемыми электродами, что особенно актуально для систем автоматизированного контроля сплошности покрытий труб.

Для случаев использования электродов повышенной емкости (с увеличенной длиной перекрытия l или диаметром контролируемых труб D от 1420 мм) предлагается применять несколько генераторов высокого напряжения, работающих на некотором удалении друг от друга.

Библиографический список

1. **ГОСТ 31488–2012.** Трубы стальные с защитными наружными покрытиями для магистральных газонефтепроводов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2012. 11 с.

2. **ГОСТ 9.402–2004.** Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию. М.: Стандартинформ, 2006. 40 с.

3. **Яковлев А. Д.** Химия и технология лакокрасочных покрытий: учеб. для вузов. 4-е изд., испр. СПб.: Химиздат, 2010. 448 с.

4. **ГОСТ Р51164–98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Изд-во стандартов, 1998. 46 с.

5. **Райзер Ю. П.** Физика газового разряда: учеб. руководство. 2-е изд. М.: Наука, 1992. 536 с.

6. **Тренькин А. А., Алмазова К. И., Белоногов А. Н. и др.** Исследования начальной фазы искрового разряда в воздухе в промежутке острие (катод) − плоскость методом лазерного зондирования // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, № 12. С. 2039 – 2046.

7. **Базелян Э. М., Райзер Ю. П.** Искровой разряд: учеб. пособие. М.: Изд-во МФТИ, 1997. 320 с.

8. **Воробьев Г. А., Похолков Ю. П., Королев Ю. Д. и др.** Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 244 с.

9. **Антонов Д. И., Степанова М. С., Мусихин А. С. и др.** Обеспечение достоверности автоматизированного импульсного электроискрового контроля покрытий труб в поточном производстве // Дефектоскопия. 2024. № 8. С. 71 – 75.

10. **ГОСТ 34395–2018.** Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. М.: Стандартинформ, 2018. 11 с.

11. **ASTMD 5162-01:2015.** Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates, 2015.

12. **G62–14.** Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings, 2014.

13. **NACE SP0188–2006.** Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates, 2006.

14. **ASTM D6747–15.** Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes, 2015.

15. **Гаджиев Я. М., Ибрагимова Э. Н.** Экспериментальное исследование измерения размеров трещин силикатно-эмалевого покрытия трубы // Дефектоскопия. 2020. № 1. С. 61 – 65.

16. **Ибрагимов Н. Ю., Ибрагимова Э.Н.** Дефектоскопическая установка трещиномер силикатных покрытий труб // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 55 – 57.

17. **Подмастерьев К. В., Соснин Ф. Р., Корндорф С. Ф. и др.** Электрический контроль // Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 5: в 2 кн. Кн. 2. 2-е изд., дораб. М.: Машиностроение, 2006. 679 с.

18. **Савельев И. В.** Курс общей физики: учеб. пособие для вузов: в 5 т. Т. 2. Электричество и магнетизм. 7-е изд., стер. СПб.: Лань, 2024. 344 с.

19. **Holiday Detector**: [Electronic resource] / Elcometer. URL: https://www.elcometer.com/en/holiday-detector (Access date: 07.10.2024)

20. **Корона 2.2** [Электронный ресурс] / «Константа». URL: https://constanta.ru/catalog/korona-2-2 (Дата обращения: 07.10.2024)

21. **Важов В. Ф., Лавринович В. А., Лопаткин С. А.** Техника высоких напряжений: курс лекций. Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 119 с.

22. **Встовский А. Л.** Электрические машины: учеб. пособие. Красноярск: СФУ, 2013. 464 с.

23. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники: пер. с англ. 2-е изд. М.: Бином, 2014. 704 с.

24. **Ерехинский Б. А.** Современные технологии диагностики объектов добычи газа и газового конденсата. Применяемая техника и оборудование. Воронеж: Воронежская областная типография, 2017. 374 с.

References

1. Steel pipes with protective outer coatings for main gas and oil pipelines. Technical conditions. (2012). *Standard No. GOST 31488–2012.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

2. Unified system of protection against corrosion and aging. Paint and varnish coatings. Preparing metal surfaces for painting. (2006). *Standard No. GOST 9.402–2004.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

3. Yakovlev A. D. (2010). *Chemistry and technology of paint and varnish coatings: a textbook for universities. 4th ed.* Saint Petersburg: Himizdat. [in Russian language]

4. Main steel pipelines. General requirements for corrosion protection. (1998). *Ru Standard No. GOST R 51164–98.* Moscow: Izdatel'stvo standartov. [in Russian language]

5. Rayzer Yu. P. (1992). *Physics of gas discharge: textbook. 2nd ed.* Moscow: Nauka. [in Russian language]

6. Tren'kin A. A., Almazova K. I., Belonogov A. N. et al. (2020). Research of the initial phase of a spark discharge in air in the gap between the tip (cathode) and the plane using laser probing. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 90*(12), 2039 – 2046. [in Russian language]

7. Bazelyan E. M., Rayzer Yu. P. (1997). *Spark discharge: textbook.* Moscow: Izdatel'stvo MFTI. [in Russian language]

8. Vorob'ev G. A., Poholkov Yu. P., Korolev Yu. D. et al. (2003). *Physics of dielectrics (region of strong fields): textbook.* Tomsk: Izdatel'stvo TPU. [in Russian language]

9. Antonov D. I., Stepanova M. S., Musihin A. S. et al. (2024). Ensuring the reliability of automated pulse electric spark testing of pipe coatings in continuous production. *Defektoskopiya,* (8), 71 – 75. [in Russian language]

10. Paint and varnish materials. Electric spark method for monitoring the continuity of dielectric coatings on conductive substrates. (2018). *Standard No. GOST 34395–2018.* Moscow: Standartinform. [in Russian language]

11. Standard Practice for Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates. (2015). *Standard No. ASTM D 5162-01:2015.*

12. Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings. (2014). *Standard No. ASTM G 62–14.*

13. Discontinuity (Holiday) Testing of New Protective Coatings on Conductive Substrates. (2006). *Standard No. NACE SP 0188–2006.*

14. Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes. (2015). *Standard No. ASTM D 6747–15.*

15. Gadzhiev Ya. M., Ibragimova E. N. (2020). Experimental study of measuring the size of cracks in a silicate-enamel pipe coating. *Defektoskopiya,* (1), 61 – 65. [in Russian language]

16. Ibragimov N. Yu., Ibragimova E.N. (2017). Flaw detection installation crack gauge for silicate pipe coatings. *Defektoskopiya,* (11), 55 – 57. [in Russian language]

17. Klyuev V. V. (Ed.), Podmaster'ev K. V., Sosnin F. R., Korndorf S. F. et al. (2006). *Electrical control. Non-destructive testing: handbook: in 8 volumes. Vol. 5: in 2 books. Book 2. 2nd ed.* Moscow: Mashinostroenie. [in Russian language]

18. Savel'ev I. V. (2024). *General physics course: textbook for universities: 5 volumes. Vol. 2. Electricity and magnetism. 7th ed*. Saint Petersburg: Lan'. [in Russian language]

19. Holiday Detector. *Elcometer.* Retrieved from https://www.elcometer.com/en/holiday-detector (Accessed: 07.10.2024).

20. Crown 2.2. *"Constant".* Retrieved from https://constanta.ru/catalog/korona-2-2 (Accessed: 07.10.2024). [in Russian language]

21. Vazhov V. F., Lavrinovich V. A., Lopatkin S. A. (2006). *High voltage technology: a course of lectures.* Tomsk: Izdatel'stvo TPU. [in Russian language]

22. Vstovskiy A. L. (2013). *Electrical machines: textbook.* Krasnoyarsk: SFU. [in Russian language]

23. Horovits P., Hill U. (2014). *The art of circuit design. 2nd ed.* Moscow: Binom. [in Russian language]

24. Erekhinskiy B. A. (2017). *Modern technologies for diagnosing gas and gas condensate production facilities. Applied technology and equipment.* Voronezh: Voronezhskaya oblastnaya tipografiya. [in Russian language]

Для цитирования статьи:

Сясько В. А., Мусихин А. С., Гнивуш И. С., Степанова М. С., Антонов Д. И. Автоматизация импульсного электроискрового контроля диэлектрических покрытий металлических труб диаметром до 1420 мм // Контроль. Диагностика. 2025. Т. 28, № 2. С. 4 – 13. DOI: 10.14489/td.2025.02.pp.004-013

Syasko V. A., Musikhin A. S., Gnivush I. S., Stepanova M. S., Antonov D. I. (2025). Automation of Pulse Electrospark Testing of Dielectric Coatings of Metal Pipes up to 1420 mm in Diameter. *Kontrol'. Diagnostika, 28*(2), 4 – 13. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2025.02.pp.004-013

