

## **Определение надежности и принципы организации системы локальной катодной защиты с применением протяженных гибких анодов**

**В.Р. Алексейчук (ООО «Газпром трансгаз С.-Петербург»),  
А.И. Яблучанский, В.М. Лейба (ОАО «Гипроспецгаз»)**

В связи с принятием в 1998 г. критерия контроля катодной защиты только по поляризационному потенциалу  $U$  система электрохимической защиты (ЭХЗ) от коррозии многих новых компрессорных станций (КС) ОАО «Газпром» выполнена по схеме «локальной катодной защиты» (ЛКЗ), с использованием протяженных гибких анодов [1]. В то же время некоторые вопросы, связанные с надежностью, оптимизацией и методикой измерения защитных потенциалов при эксплуатации таких систем, не нашли должного отражения в методической и нормативной документации. При этом, несмотря на то что применяемые системы локальной защиты с протяженными анодами обеспечивают катодную защиту подземных стальных коммуникаций с контролем по  $U$ , постоянно возникали вопросы, которые можно объединить в несколько основных: обоснованность применения протяженных анодов вместо сосредоточенных; расстояние между защищаемым трубопроводом и анодом; зависимость потенциала  $U$  от расстояния до анода; корректность измерения потенциала  $U$  в поле влияния анода; распределение  $U$  по образующей трубы; срок службы протяженного анода (надежность системы).

В 2009 г. сотрудниками ОАО «Гипроспецгаз» и ООО «Газпром трансгаз С.-Петербург» проводились работы с целью подготовки методических рекомендаций по определению надежности и оптимальных сроков эксплуатации систем защиты от коррозии с применением протяженных гибких анодов.

Для более глубокого обоснования систем ЛКЗ с протяженными анодами был проведен теоретический анализ распределения плотностей защитного тока установок ЛКЗ и выполнены экспериментальные измерения поляризационных потенциалов трубопровода как на моделях в лабораторных условиях, так и на реальных объектах. На основании теоретических расчетов и экспериментальных данных вырабатывались критерии надежности элементов установок ЛКЗ с протяженными анодами и критерии обеспеченности объекта противокоррозионной защитой на его прогнозируемый срок службы.

## Принципы построения локальной катодной защиты

Схема системы ЛКЗ строится путем установки анодов в непосредственной близости от защищаемых трубопроводов с целью предотвращения возникновения опасных коррозионных элементов, вероятность которых особенно велика в условиях неравномерного распределения потенциала земли промплощадок КС, вызванного неконтролируемым стеканием катодного тока с контуров защитных заземлений и фундаментов [2].

Теоретический анализ распределения защитных плотностей тока на трубопроводе в установках ЛКЗ выполнялся с использованием работы [3] в соответствии с моделями, представленными на рис. 1.

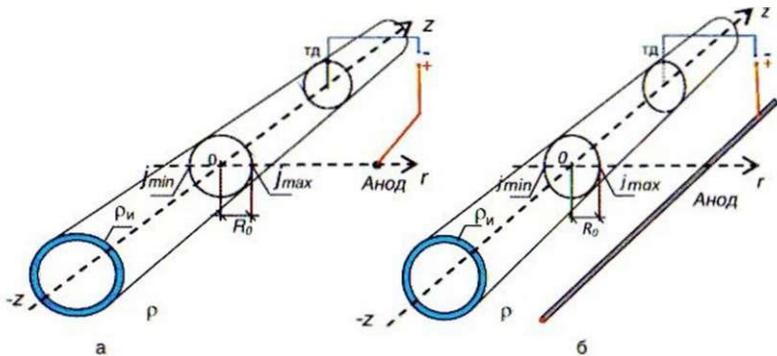


Рис. 1. Расчетные модели установок ЛКЗ с точечным (а) и протяженным (б) анодами:  $R_0$  – радиус трубопровода, м;  $r$  – расстояние от центра трубы до анода, м;  $z = z/R_0$ ;  $\rho_{и}$  – сопротивление изоляции, Ом · м<sup>2</sup>;  $\rho$  – сопротивление грунтов, Ом · м;  $j_{min}$  – плотность тока по окружности трубы в точке  $z = 0$ ,  $r = -R_0$ ;  $j_{max}$  – плотность тока по окружности трубы в точке  $z = 0$ ,  $r = R_0$

Распределение плотности тока по окружности под влиянием установки локальной катодной защиты. Критерий надежности равномерного распределения плотности тока  $S$  может быть представлен в виде параметра

$$S = j_{min}/j_{max}$$

где  $j_{\min}$  - плотность тока на окружности трубы в координате  $z = 0$ ,

$j_{\max}$  - плотность тока на окружности трубы в координате  $z = 0$ ,  $r = R_0$ .

Значения критерия  $S$  определялись в координате  $z = 0$  при различных расстояниях  $r$  от анода до трубы и координате точки дренажа  $\underline{z} = z/R_0 = 20$ . Протяженный анод располагался параллельно трубе в координатах  $\underline{z}$  от -10 до +10. Предельные значения критерия  $S$ , характеризующие распределение плотности тока по окружности трубы установками катодной защиты с точечным и протяженным анодами в зависимости от безразмерного расстояния  $\underline{R} = r/R_0$  от анода до трубы и параметра  $k = p_a/(p \cdot R_0)$ , показаны на рис. 2.

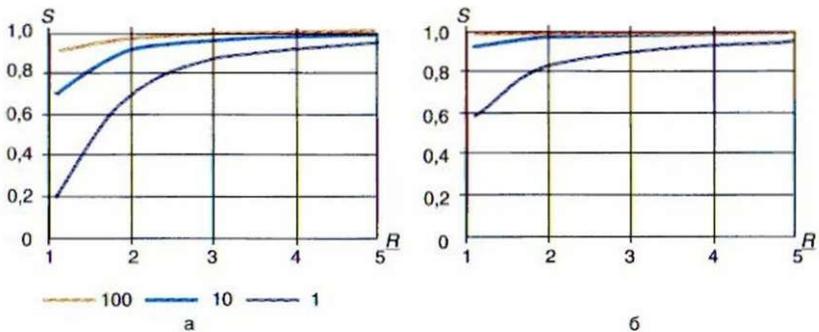


Рис. 2. Критерий надежности  $S$ , характеризующий равномерность распределения плотности тока по окружности трубы с координатой  $z = 0$  установками ЛКЗ с точечным (а) и протяженным (б) анодами в зависимости от расстояния  $\underline{R}$  и параметра  $k$  (индекс кривых)

Из приведенных графиков следует, что при удалении анода от оси трубопровода равномерность распределения тока по окружности трубы у установки с протяженным анодом значительно выше по сравнению с установкой с точечным анодом. В табл. 1 приведены значения критерия надежности  $S$  равномерного распределения плотности тока по окружности трубы под влиянием установки локальной катодной защиты с точечным и протяженным анодами для различных условий.

Таблица 1

Значения критерия  $S$  в координате  $z = 0$  для трубопровода  $D = 1000$  мм ( $R_0 = 0,5$  м) при расстоянии до анода  $0,5$  м ( $R = 2$ )

$\rho_{и},$ Ом · м <sup>2</sup>	$\rho,$ Ом · м	$K = \rho_{и}/(\rho \cdot R_0)$	ЛКЗ с точечным анодом		ЛКЗ с протяженным анодом	
			$S$	$\sigma, \%$	$S$	$\sigma, \%$
$1 \cdot 10^3$	20	100	0,960	4,0	0,998	0,2
	2000	1	0,700	30,0	0,830	17,0
$3 \cdot 10^5$	20	$1 \cdot 10^4$	$\approx 1$	$\approx 0$	$\approx 1$	$\approx 0$
	2000	100	0,960	4,0	0,998	0,2

Анализ данных табл. 1 показывает, что при укладке анода на расстоянии не менее  $0,5$  м от образующей трубы ( $R = 2$ ) неравномерность распределения плотности тока  $\sigma$  (%) по окружности трубы не превышает:

- 30 % для точечного и 17 % для протяженного анодов в грунтах с  $\rho = 2000$  Ом · м и соответственно 4 и 0,2 % для грунтов  $\rho = 20$  Ом · м при изоляции  $\rho_{и} = 1 \cdot 10^3$  Ом · м<sup>2</sup>;

- 4 % для точечного и 0,2 % для протяженного анодов в грунтах с  $\rho = 2000$  Ом · м и соответственно около 0% для грунтов  $\rho = 20$  Ом · м при изоляции  $\rho_{и} = 3 \cdot 10^5$  Ом · м<sup>2</sup>.

Условие размещения протяженного анода на расстоянии  $1$  м от образующей трубопровода ( $R = 3$ ) при современном качестве изоляционного покрытия удовлетворяет практически всем возможным условиям на реальной КС и обеспечивает достаточную равномерность распределения плотности тока по окружности трубы.

*Распределение плотности тока по длине трубопровода под влиянием установки локальной катодной защиты.* Критерий надежности равномерного распределения плотности тока  $e$  по длине трубы представлялся в виде параметра

$$e = j_z / j_{z=0}$$

где  $j_z$  - значение плотности тока на поверхности трубы в координатах  $z = z/R_0$ ,  $r = R_0$ ;  $j_{z=0}$  - значение плотности тока на поверхности трубы в координатах  $z = 0$ ,  $r = R_0$ .

Значения критерия  $e$  определялись в зависимости от координаты  $z$  и безразмерного параметра  $k$  (индекс кривых) при координате точки дренажа  $z = z/R_0 = 20$  и размещении анодов в точке с координатами  $R = 3$ ,  $z = 0$ . При этом

протяженный анод располагался параллельно трубе в координатах  $z$  от -10 до +10. Предельные значения критерия  $e$  равномерного распределения плотности тока по длине трубы установками катодной защиты с точечным и протяженным анодами в зависимости от координаты  $z$  и параметра  $k$  (индекс кривых) показаны на рис. 3.

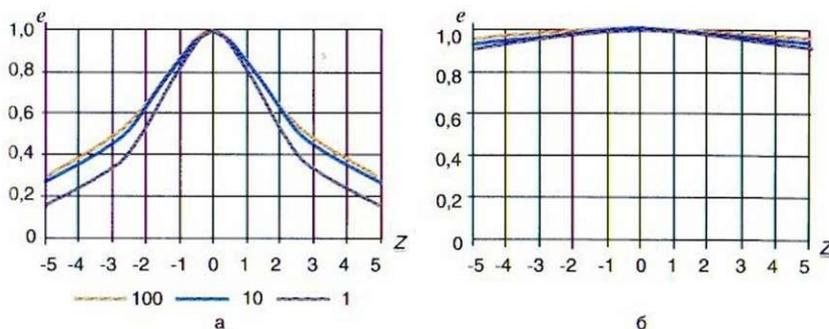


Рис. 3. Критерий надежности  $e$ , характеризующий равномерность распределения плотности тока по длине трубы для установок ЛКЗ с точечным (а) и протяженным (б) анодами

Анализ графиков свидетельствует о более равномерном распределении защитной плотности тока по длине трубы для установки с протяженным анодом, уложенным параллельно трубопроводу. Локальная защита точечным анодом имеет сравнительно небольшую область действия по сравнению с локальной защитой с линейным анодом, зона действия которой примерно равна длине анода.

В табл. 2 приведены значения критерия надежности  $e$  распределения плотности тока  $j$  по длине трубы максимального диаметра 1000 мм в координате  $|z| = z/R_0 = 10$  под влиянием установки ЛКЗ с точечным и протяженным анодами при расстоянии от центра трубы до анода 1 м ( $R = 3$ ) для различных условий.

Значения критерия  $e$  в координате  $|z| = z/R_0 = 5$  для трубопровода  $D = 1000$  мм ( $R_0 = 0,5$  м) и расстоянии до анода 1,0 м ( $R=3$ )

$\rho_{и},$ Ом · м <sup>2</sup>	$\rho,$ Ом · м	$K = \rho_{и}/(\rho \cdot R_0)$	ЛКЗ с точечным анодом		ЛКЗ с протяженным анодом	
			$e$	$\tau, \%$	$e$	$\tau, \%$
$1 \cdot 10^3$	20	100	0,260	74,0	0,950	5,0
	2000	1	0,160	84,0	0,910	9,0
$3 \cdot 10^5$	20	$1 \cdot 10^4$	$\geq 0,3$	$\leq 70$	$\geq 0,95$	$\leq 5,0$
	2000	100	0,260	74,0	0,950	5,0

Из данных, приведенных в табл. 2, следует, что при укладке анода на расстоянии не менее 1,0 м от образующей трубы ( $R = 3$ ) неравномерность распределения плотности тока  $\tau$  (%) по длине трубы в координате  $z = \pm 5$  не превышает:

- 84 % для точечного и 9 % для протяженного анодов в грунтах с  $\rho = 2000$  Ом · м и соответственно 74 и 5 % для грунтов  $\rho = 20$  Ом · м при изоляции  $\rho_{и} = 1 \cdot 10^5$  Ом · м<sup>2</sup>;

- 74 % для точечного и 5 % для протяженного анодов в грунтах с  $\rho = 2000$  Ом · м и соответственно 70 и 5 % для грунтов  $\rho = 20$  Ом · м при изоляции  $\rho_{и} = 3 \cdot 10^5$  Ом · м<sup>2</sup>.

Результаты математического моделирования электрических полей катодной защиты трубопроводов с установками ЛКЗ с точечным анодным заземлением и протяженным анодом свидетельствуют, что для реализации принципов локальной защиты линейных объектов более предпочтительно применение протяженных анодов.

*Экспериментальные исследования на моделях в лабораторных условиях* проводились с целью анализа данных измерений поляризационных потенциалов  $U_{z,l}$  методом Габбера - Лугина (метод ГЛ) и  $U_n$  методом вспомогательного электрода (метод ВЭ) для обоснования методики измерения потенциалов реальных объектов методом ВЭ. Для примера на рис. 4 представлены зависимости поляризационного потенциала трубопровода от расстояния  $R$  между анодом и трубопроводом.

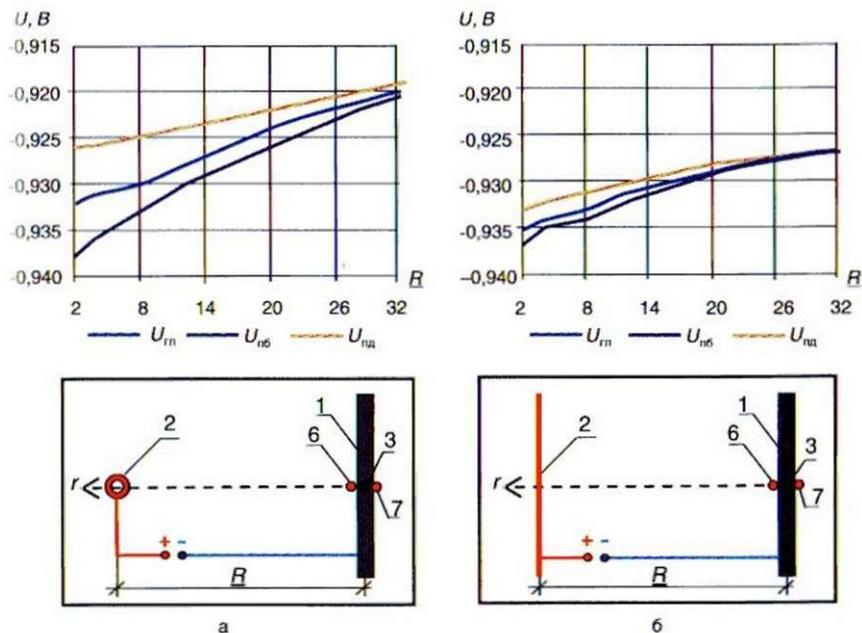


Рис. 4. Результаты измерений потенциалов трубопровода на моделях установок ЛКЗ с точечным (а) и протяженным (б) анодами: 1 – труба; 2 – анод; 3 – точка измерения  $U_{rn}$  методом Габбера – Лугина; 6, 7 – точки измерения  $U_n$  методом вспомогательного электрода

Сравнение результатов измерения поляризационных потенциалов, выполненных различными методами на моделях, представленных на рис. 4, приведены в табл. 3.

Максимальное расхождение  $\zeta$  (%) между значениями поляризационных потенциалов трубопровода не превышает 1,3 %. Расхождение значений поляризационных потенциалов установки ЛКЗ с протяженным анодом меньше по сравнению с потенциалами установки с точечным анодом.

Таблица 3

Результаты измерений потенциалов установки ЛКЗ в среде  $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  на модели трубопровода  $D = 57 \text{ мм}$  длиной  $350 \text{ мм}$ , параметр  $k = 70$

Точки измерения	Потенциалы, измеренные методами ГЛ и ВЭ				Относительные расхождения измерений, $\zeta$ , %	
	точечный анод		протяженный анод			
	$U_{гг}, \text{В}$	$U_{п}, \text{В}$	$U_{гг}, \text{В}$	$U_{п}, \text{В}$	точечный анод	протяженный анод
3	-9,932	–	-0,935	–	–	–
6	–	-0,926	–	-0,933	–	–
7	–	-0,893	–	-0,904	–	–
3–6	–	–	–	–	0,64	0,21
3–7	–	–	–	–	0,64	0,21
6–7	–	–	–	–	1,28	0,43

Выполнено сопоставление величин потенциалов трубопровода, измеренных методами Габбера - Лугина и вспомогательным электродом в поле влияния анода и защитного заземления, подключенного к трубопроводу. Для примера на рис. 5 приведены результаты измерений потенциалов на трубопроводе от установок ЛКЗ с точечным и протяженным анодами при  $R=44$  и фиксированном токе установок при перемещении защитного заземления вдоль трубы от ПК1 до ПК9. По данным измерений видно, что точечный анод не обеспечивает необходимого поляризационного потенциала трубопровода на дефекте при размещении защитного заземления в непосредственной близости от дефекта. Среднее расхождение результатов измерений  $U_{п}$  методом вспомогательного электрода относительно  $U_{гг}$  методом Габбера - Лугина для точечного анода составило 5,22 %.

Протяженный анод позволяет при постоянной плотности тока поддерживать необходимый поляризационный потенциал трубопровода на дефекте при размещении защитного заземления в непосредственной близости от дефекта. Среднее расхождение результатов измерений методом вспомогательного электрода относительно капилляра Габбера - Лугина для протяженного анода составило 1,93 %. Данные измерений свидетельствуют о преимуществе использования протяженных анодов в системах локальной защиты.

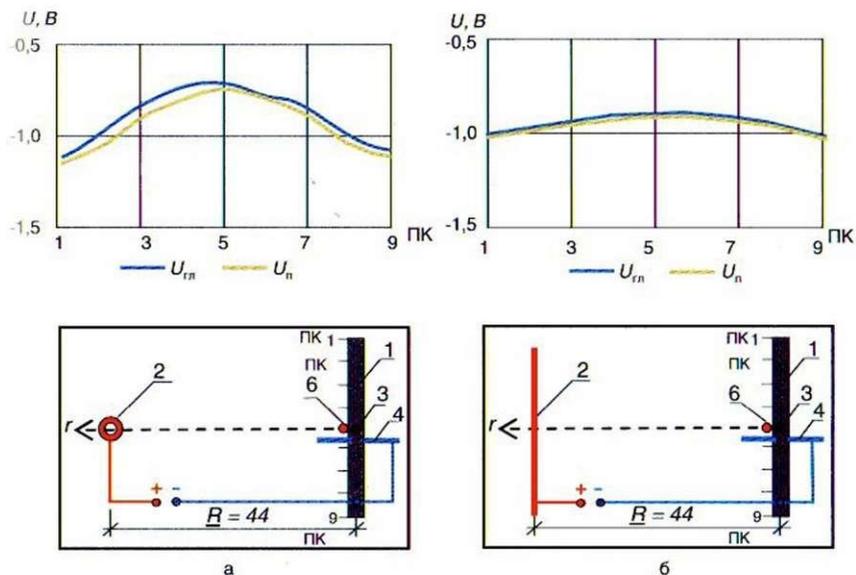


Рис. 5. Результаты измерений потенциалов трубопровода и модели установок ЛКЗ с точечным (а) и протяженным (б) анодами при наличии защитных заземлений: 1 – труба; 2 – анод; 3 – точка измерения  $U_{гр}$  методом ГЛ; 6, 7 – точки измерения  $U_{п}$  методом ВЭ

Измерения на реальных объектах для обоснования традиционной методики измерений поляризационного потенциала методом вспомогательного электрода и подтверждения результатов измерений на моделях в лабораторных условиях выполнялись на трубопроводах в зоне ответственности ООО «Газпром трансгаз С.-Петербург». Для примера на рис. 6 приведены результаты измерений поляризационных потенциалов на трубопроводе  $D = 230$  мм в поле сосредоточенного анода. Сравнение поляризационных потенциалов показывает, что данные измерений, выполненных методами вспомогательного электрода и Габбера - Лугина, хорошо совпадают друг с другом. Максимальное расхождение между ними не

превышает 4,7 %. Расхождение измерений соизмеримо с данными, полученными в лабораторных условиях и рассчитанными аналитически.

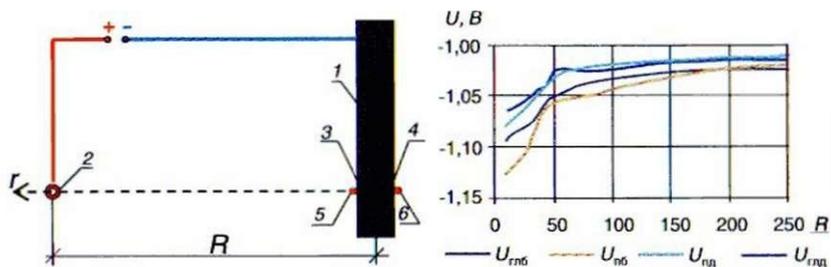


Рис. 6. Схема (а) и результаты измерений поляризационных потенциалов (б) на трубопроводе  $D = 230$  мм при двух методах измерения: 1 – труба; 2 – анод; 3, 4 – точки измерения потенциала  $U_{г\text{л}}$  капилляром Габбера – Лугина; 5, 6 – точки измерения потенциала  $U_{г\text{л}}$  вспомогательным электродом в составе электрода сравнения;  $U_{г\text{лб}}$ ,  $U_{г\text{л}}$  – поляризационный потенциал на дефектах, ближних к аноду (точки 3, 5);  $U_{г\text{лд}}$ ,  $U_{г\text{лд}}$  – поляризационный потенциал на дефектах, дальних от анода (точки 4, 6)

*Плотность тока, обеспечивающая надежность катодной защиты объекта, определялась путем измерения поляризационных кривых стального трубопровода в различных условиях. Поляризационная кривая одной из моделей (диаметр трубопровода 25 мм, длина 350 мм) и схема измерения приведены на рис. 7.*

При значениях тока поляризации трубопровода  $I \leq -0,6$  А (плотность тока  $j = I/(pDLT) = 21,84$  А/м<sup>2</sup>) величина поляризационного потенциала стали ограничивается значениями минус 1,20 ÷ минус 1,15 В. Для данных условий измерений увеличение тока  $I$  в отрицательную сторону, начиная с  $I = -0,13$  А ( $j = 4,73$  А/м<sup>2</sup>), соответствующей величине поляризационного потенциала  $U_{г\text{л}} = -1,0$  В, сопровождается выделением водорода с поверхности металла.

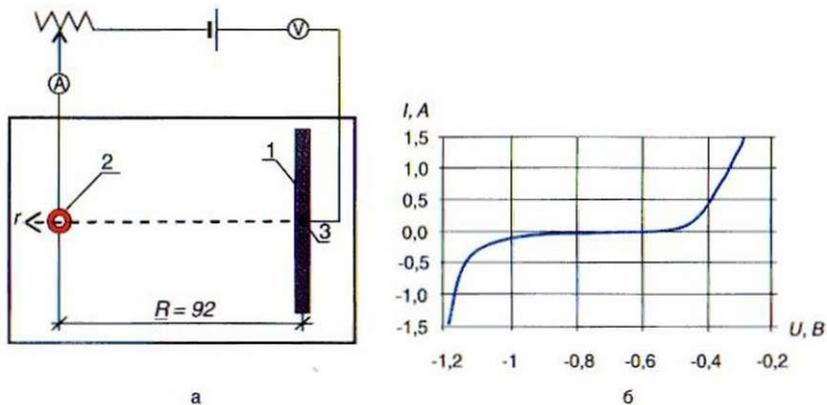


Рис. 7. Схема измерения поляризационной кривой (а) и собственно поляризационная кривая (б): 1 – труба; 2 – электрод; 3 – капилляр Габбера – Лугина; А – амперметр; V – вольтметр

В грунтовых условиях скорость коррозии подземных трубопроводов контролируется катодной реакцией кислородной депольаризации. Анализ поляризационных кривых на различных моделях показал, что ограничивающим критерием величины защитного потенциала является предельная плотность тока катодной защиты  $j_{кр}$  на трубопроводе, которая не должна превышать предельную плотность тока по кислороду  $j_{пр}$  для данных грунтов более чем в 5 раз  $j_{кр} \leq 5 \cdot j_{пр} \text{ A/m}^2$ , что подтверждается и исследованиями в работе [4].

Предельная плотность тока по кислороду для реальных объектов может быть определена путем погружения гальванической пары Fe-Zn на глубину укладки трубопровода и измерения величины установившегося между ними тока [5].

#### Параметры протяженного анода, обеспечивающие его надежность в установках ЛКЗ

Наибольшее применение в установках ЛКЗ на объектах ОАО «Газпром» получили отечественные многослойные протяженные аноды типа ЭЛЭР

производства ЗАО «Электрохимзащита» с переменными электрическими характеристиками, определяемыми условиями их применения на конкретном объекте.

Одно из важных требований, обеспечивающих надежность применения протяженного анода в установках локальной защиты, - равномерность распределения тока утечки по длине анода [1]. Равномерность распределения токовой нагрузки по длине анода в конкретных условиях прокладки определяется выбором постоянной распространения  $\alpha$  анода, гарантирующей постоянство электрического потенциала по длине анода с некоторой,

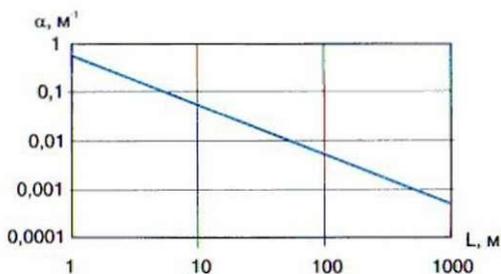


Рис. 8. Зависимость постоянной распространения  $\alpha$  анода от его длины  $L$ , обеспечивающей равномерность распределения плотности тока утечки по длине анода с коэффициентом надежности 0,95

приемлемой для практики, погрешностью. Определены критерий надежности протяженного анода, обеспечивающий равномерность распределения тока утечки на аноде длиной  $L$  и, как следствие, равномерность его износа в течение требуемого срока службы, алгоритм расчета которого разработан в рассматриваемой работе. График для выбора постоянной распространения  $\alpha$  анода в зависимости от его длины приведен на рис. 8.

Методика измерения параметров локальной катодной защиты с протяженным анодом для контроля надежности противокоррозионной защиты на участках МГ и КС разработана на основании выполненных исследований, основные положения которой состоят в следующем:

- измерения поляризационных потенциалов трубопровода осуществляются по традиционной методике с использованием вспомогательного электрода;
- контроль величины плотности тока катодной защиты на возможных дефектах в изоляции трубопровода выполняется на вспомогательном электроде, имеющем размеры принятого стандартного дефекта;

- значения защитных потенциалов трубопровода, соответствующие требованиям нормативных документов, устанавливаются регулировкой тока в анодных ветвях;

- контроль равномерности утечки плотности тока с анода по его длине выполняется путем измерения потенциала анод-земля на концах анода относительно одной фиксированной точки земли;

- контроль значений установленных плотностей тока на аноде и сравнение их с предельными значениями, обеспечивающими установленный срок службы анода.

### Список литературы

1. Яблчанский А.И. Применение протяженных гибких анодов в системах ЭХЗ КС: Материалы отраслевого совещания по проблемам защиты от коррозии (г. Барнаул, 21-26 апреля 2008 г.). - М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2008. - С. 88-99.

2. Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии: Справ, изд.; Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1984. - 496 с.

3. Иоссель Ю.А., Кленов Г.Э. Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов.-М.: Металлургия,1984.-272 с.

4. Хижняков В.И. Предупреждение выделения водорода при выборе потенциалов катодной защиты подземных стальных трубопроводов // Коррозия: материалы, защита. - 2009. - № 9. - С. 7-10.

5. Красноярский В В., Цикерман Л.Я. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. - 1968. - 296 с.