

УДК 622.691.4:620.197.5

А.И. Яблучанский¹, e-mail: ayabluchansky@gsg.spb.ru¹ ООО «Газпром проектирование», Санкт-Петербургский филиал (Санкт-Петербург, Россия).

О ВЫБОРЕ УСТАНОВКИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ

Установка катодной защиты в системе противокоррозионной защиты подземного стального трубопровода обеспечивает подавление коррозионных процессов на оголенных участках стали трубы в дефектах защитного покрытия. Рассмотрены основные схемы установок катодной защиты, на различных принципах создающие на трубопроводе защитный ток необходимой плотности и направления. Распределение защитного потенциала по трубопроводу, создаваемого как традиционной для линейной части установкой катодной защиты с удаленным анодным заземлением, так и установкой катодной защиты для организации так называемой локальной катодной защиты с протяженным анодом, является основным показателем при выборе схемы установки катодной защиты. Обоснованный выбор в конкретных физико-геологических условиях соответствующей схемы установки катодной защиты и параметров ее основных элементов обеспечивает оптимальную катодную защиту подземного трубопровода с минимальными затратами.

Ключевые слова: схема установок катодной защиты, локальная катодная защита, зона катодной защиты трубопровода, защитный потенциал трубопровода, протяженный анод, оптимальные параметры установок катодной защиты.

Установка катодной защиты (УКЗ) – основной элемент системы катодной защиты магистрального трубопровода, обеспечивающий подавление коррозионных процессов в дефектах защитного покрытия путем создания защитного тока необходимой плотности и направления.

Защитный ток, смещающий электрический потенциал трубопровода в отрицательную сторону на требуемую величину, может быть создан при выполнении одного из следующих условий:

- электрический потенциал собственно трубопровода смещается в отрицательную сторону на величину напряжения коррозионного элемента;
- электрический потенциал земли в непосредственной близости от защищаемого сооружения смещается в положительную сторону на

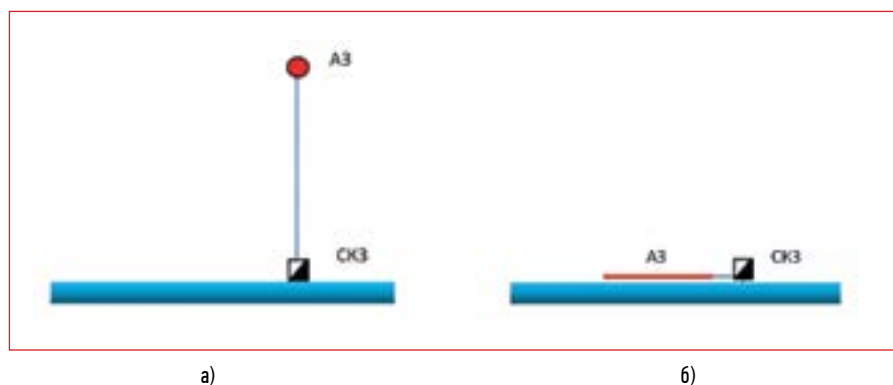


Рис. 1. Схемы установок катодной защиты:

а) традиционная схема УКЗ для линейной части трубопровода; б) схема УКЗ для «локальной катодной защиты»

величину напряжения коррозионного элемента.

Основной элемент, определяющий схему УКЗ, – анодное заземление и его размещение относительно защищаемого трубопровода.

При организации системы катодной защиты магистрального тру-

бопровода применяются в основном две классические схемы УКЗ (рис. 1).

Традиционная схема УКЗ, анодное заземление которой установлено на достаточном удалении от трубопровода (УКЗ-т) для исключения его существенного влияния на

потенциал земли в районе точки дренажа, обеспечивает требуемый защитный ток смещением электрического потенциала собственно трубопровода в отрицательную сторону и применяется в основном в системах катодной защиты линейной части трубопровода (рис. 1а).

При использовании схемы УКЗ с анодным заземлением, расположенным непосредственно у трубопровода, защитный ток на трубопроводе создается преимущественно за счет положительного потенциала земли, создаваемого анодным заземлением (рис. 1б). Такая схема УКЗ применяется для организации так называемой локальной катодной защиты (УКЗ-лкз) и создает область положительных потенциалов земли на некотором локальном участке трассы трубопровода, в пределах которого обеспечивается подавление электрохимического коррозионного элемента [1]. В зависимости от задачи такая локальная область может быть создана длиной от нескольких метров до *n* километров. Контроль защитного потенциала на подземном трубопроводе выполняется, как правило, через так называемый суммарный потенциал U_{tz} (потенциал с омической составляющей), который в первом приближении состоит из смещения поляризационного (электрохимического) потенциала dU_p оголенных участков стали трубы в дефектах изоляции, омического падения потенциала dU'_{tz} на защитном покрытии трубопровода и естественного потенциала стали трубы U_e .

Значение разности потенциалов «труба – земля» U_{tz} в точке *x* относительно точки дренажа (*x* = 0) по длине подземного трубопровода длиной L_T , нагруженного на конце сопротивлением Z_n , может быть в первом приближении выражено как [2, 3]:

$$U_{tz} = dU'_{tz} + dU_p + U_e, \quad (1)$$

$$dU'_{tz}(x) = \frac{I_0 R_{ex} m \cdot sh[\alpha(L_T - x)] + ch[\alpha(L_T - x)]}{m \cdot sh(\alpha L_T) + ch(\alpha L_T) - U_z(x,y,z)}, \quad (2)$$

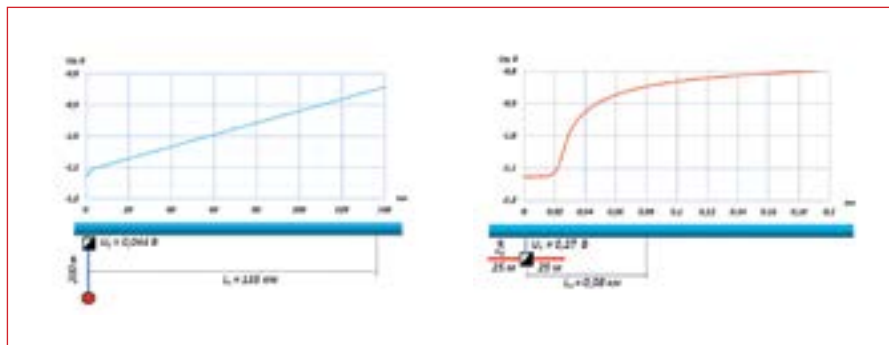


Рис. 2. Распределение защитного потенциала U_p на трубопроводе при различных схемах установки катодной защиты: а) УКЗ-т; б) УКЗ-лкз

Таблица 1. Значения параметров катодной защиты в районе точки дренажа для схем УКЗ, представленных на рис. 2.

Тип УКЗ	U_e , В	I_0 , А	dU_p , В	U_z , В	S_d , м ²	j , А/м ²	U_p , В	U_{tz} , В
УКЗ-т	-0,6	1,13	-0,298	0,044	0,0001	1,543	-1,126	-1,468
УКЗ-лкз	-0,6	0,30	-0,079	0,269	0,0001	1,574	-1,127	-1,475

где $m = R_i/\alpha_i \cdot Z_n$; $j_d = U'_{tz}/R_d \cdot S_d$; I_0 – ток станции катодной защиты, А; R_{ex} – входное сопротивление трубопровода в точке дренажа, Ом; α – постоянная распространения трубопровода, 1/м; R_l – продольное электрическое сопротивление трубопровода, Ом·м; Z_n – сопротивление нагрузки на конце трубопровода, Ом; U_z – потенциал земли по линии трубопровода, вызванный анодным заземлением, В; *y* – расстояние от трубопровода до анодного заземления, м; *z* – глубина укладки анодного заземления, м; j_d – плотность тока в дефектах защитного покрытия, А/м²; S_d – площадь дефекта в защитном покрытии трубопровода, м²; R_d – сопротивление растеканию тока на дефекте в защитном покрытии трубопровода, Ом; $R_d = \rho/[4(S_d/\pi)^{1/2}]$; ρ – удельное электрическое сопротивление грунтов, Ом·м.

Значение смещения поляризационного потенциала dU_p на заданных дефектах изоляции трубопровода может быть оценено с использованием поляризационных кривых стали для конкретного удельного электрического сопротивления грунтов по значениям вычислен-

ной плотности тока j_d в дефектах изоляции заданной площади S_d . Распределение потенциала U_p по длине трубопровода для указанных типовых схем УКЗ существенно различается (рис. 2).

Расчетные значения потенциалов земли U_z в районе точки дренажа под влиянием анодных заземлений, поляризационного потенциала U_p , потенциала с омической составляющей U_{tz} , смещение потенциала собственно трубы dU_i при токах 1,13 А (УКЗ-т) и 0,3 А (УКЗ-лкз) на трубопроводе диаметром 1220 x 17 мм длиной 270 км с нагрузкой на концах трубопровода $Z_n = 0,533$ Ом и защитным покрытием $3 \cdot 10^5$ Ом·м² в грунтах с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 50$ Ом·м и точкой дренажа в 20 км от начала трубопровода для рассматриваемых схем УКЗ приведены в табл. 1.

При максимальном значении поляризационного потенциала $U_p = 1,13$ В в районе точки дренажа плечо зоны защиты L_z на трубопроводе составляет:

- 135 км для схемы УКЗ-т при удалении анодного заземления от трубопровода на 200 м и потенци-

але земли в районе точки дренажа $U_z = 0,044$ В;

- 0,08 км для схемы УКЗ-лкз при размещении протяженного анода в 2 м от трубопровода при максимальном потенциале земли в зоне прохождения анодной линии $U_z = 0,269$ В.

Наибольшее применение схема УКЗ-лкз нашла для защиты от коррозии внутриплощадочных коммуникаций компрессорных станций (КС) магистрального трубопровода после выхода [4], требующего контроля параметров катодной защиты на подземных трубопроводах осуществлять только по поляризационным потенциалам U_p , диапазон значений которых определен в довольно узком диапазоне $-0,85 \div -1,15$ В. На КС контуры защитных заземлений и фундаменты сооружений имеют прямой гальванический контакт с защищаемыми коммуникациями, что приводит к значительным утечкам защитного тока в землю и, как следствие, к неравномерному распределению электрического потенциала. Требуемый нормативный диапазон защитных потенциалов на подземных коммуникациях достигается путем компенсации отрицательного потенциала земли, вызванного стеканием катодного тока с контуров защитных заземлений и фундаментов, целенаправленным локальным повышением потенциала грунта в области размещения защищаемого объекта. Анодные заземления, размещаемые в непосредственной близости от защищаемых коммуникаций, препятствуют образованию опасных коррозионных элементов и создают требуемую разность потенциалов.

В настоящее время в ПАО «Газпром» проводится большая работа по повышению качества противокоррозионной защиты (ПКЗ) объектов добычи, транспортировки, подземного хранения, переработки и распределения газа. Одновременно целенаправленно ведется работа по повышению эффективности ПКЗ путем снижения как эксплуатаци-

онных затрат при ее обслуживании, так и затрат на ее организацию при строительстве, что требует разработки оптимальных проектных решений, направленных на повышение качества и эффективности противокоррозионной защиты объектов ПАО «Газпром».

При разработке проектной документации по противокоррозионной защите объектов, строительство которых предусматривается на обжитых стесненных для прокладки трубопровода территориях, часто возникают большие трудности при отводе земли под анодные заземления для традиционной схемы УКЗ-т линейной части магистрального трубопровода.



Для решения возникающих при разработке проектных решений трудностей, связанных с отводом земли, или проблемы достижения требуемых сопротивлений растеканию тока анодных заземлений в последнее время на линейной части магистрального трубопровода стали применяться системы катодной защиты с протяженными анодами со схемой УКЗ, внешне аналогичной рассмотренной схеме УКЗ-лкз.

Схема УКЗ-лкз по сравнению со схемой УКЗ-т не требует отвода земли вне полосы, предусмотримой под строительство трубопровода. При ее применении снижается зависимость от сопротивления растеканию анодного заземления в связи с использованием протя-

женных электродов, но при этом значительно возрастает влияние анодного заземления на защищаемый трубопровод, которое может выйти за допустимые пределы, с существенным снижением зоны защиты.

Возникающие трудности при применении схемы УКЗ с протяженным анодом, уложенным вблизи трубопровода, решаются выбором соответствующих параметров ее элементов, при которых схема УКЗ-лкз может функционировать как традиционная схема УКЗ-т с удаленным от трубопровода анодным заземлением с достижением сопоставимой зоны защиты. Требования к схеме УКЗ-лкз*, которая с достаточным для практики приближением становится идентичной схеме УКЗ-т, сводятся к двум основным положениям:

- 1) анодная линия, уложенная вдоль трубопровода на некотором расстоянии u от него, не должна оказывать значительного влияния на потенциал земли U_z по линии прохождения трубопровода в зоне прокладки анодного заземлителя;
- 2) анодная линия должна характеризоваться примерно однородным электрическим потенциалом U_a по всей выбранной длине L анода (эквипотенциальный анод), определяющим примерно равномерную плотность тока утечки с единицы длины анода.

Для выполнения этих требований выбор элементов оптимальной схемы УКЗ-лкз* определяется минимальным потенциалом земли U_z по линии трубопровода в зоне размещения анодного заземления, расстоянием u от анодного заземления до трубопровода, длиной L анодной линии и электрическими параметрами протяженного анода с учетом удельного электрического сопротивления грунтов ρ . Для оценки влияния анодного заземления на параметры катодной защиты трубопровода в конкретных условиях размещения УКЗ-лкз необходимо установить функциональную зависимость линейных размеров

электрода от его электрических характеристик и характер изменения этого влияния по мере удаления анодного заземлителя от трубопровода.

В общем виде для условий взаимного расположения трубопровода и анодного заземления потенциал U_z любой точки земли, вызванный влиянием анода длиной L , уложенного на глубине h параллельно трубопроводу и на расстоянии y от него при одностороннем питании током I_0 (рис. 3), может быть представлен выражением:

$$U_z(x,y,z) = \frac{\rho \cdot R_{ex}}{4\pi \cdot R_n} \int_0^L I_0 \frac{ch[\alpha(L-\eta)]}{ch(\alpha L)} \times \left[\frac{1}{\sqrt{(x-\eta)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-\eta)^2 + y^2 + (2h-z)^2}} \right] d\eta, \quad (3)$$

где R_{ex} – входное сопротивление анода в точке питания $x = 0$, Ом; R_n – переходное сопротивление анода, Ом·м; α – постоянная распространения анода в конкретных условиях его размещения, 1/м.

Потенциал земли U_z , вызванный влиянием анода традиционной схемы УКЗ-т, размещаемого на расстоянии y от трубопровода, может быть в первом приближении представлен выражением:

$$U_z(x,y) = I_0 \cdot \rho / [2\pi(x^2 + y^2)^{1/2}].$$

Для выполнения условия сопоставимости работы УКЗ-т и УКЗ-лкз* величина U_z по линии трубопровода в зоне размещения протяженного анода ориентировочно выбирается в диапазоне $U_z \approx 0,15 \div 0,05$ В.

На основе выражения (3) можно получить зависимости $L = f(\rho, I_0, y, U_z)$, на основе которых определить длину L протяженного анода для выбранного уровня U_z и тока I_0 и, рассчитав зону защиты с использованием выражения (1), оценить ее соответствие условиям поставленной задачи.

Далее для примера приведены зависимости $L = f(\rho, I_0, y, U_z)$ от I_0 для удельного электрического сопротивления грунтов $\rho = 50$ Ом·м, удаления протяженного анодного заземления на 6 м от трубопровода

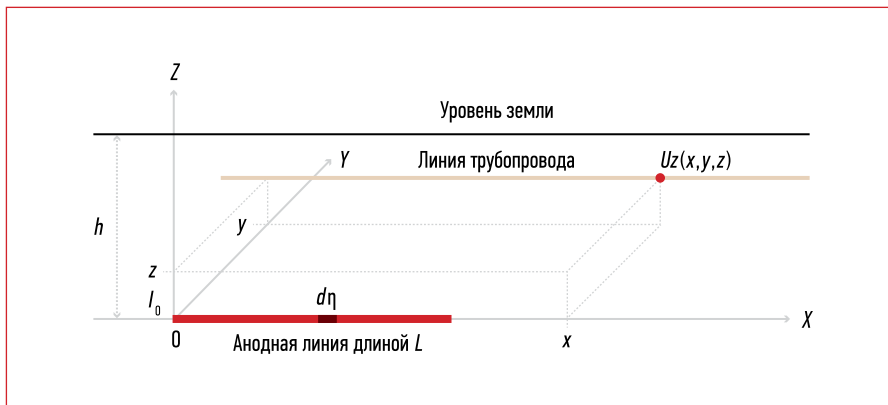


Рис. 3. Схема взаимного расположения трубопровода и анода, уложенного на глубине h параллельно трубопроводу и на расстоянии y от него при одностороннем питании током I_0

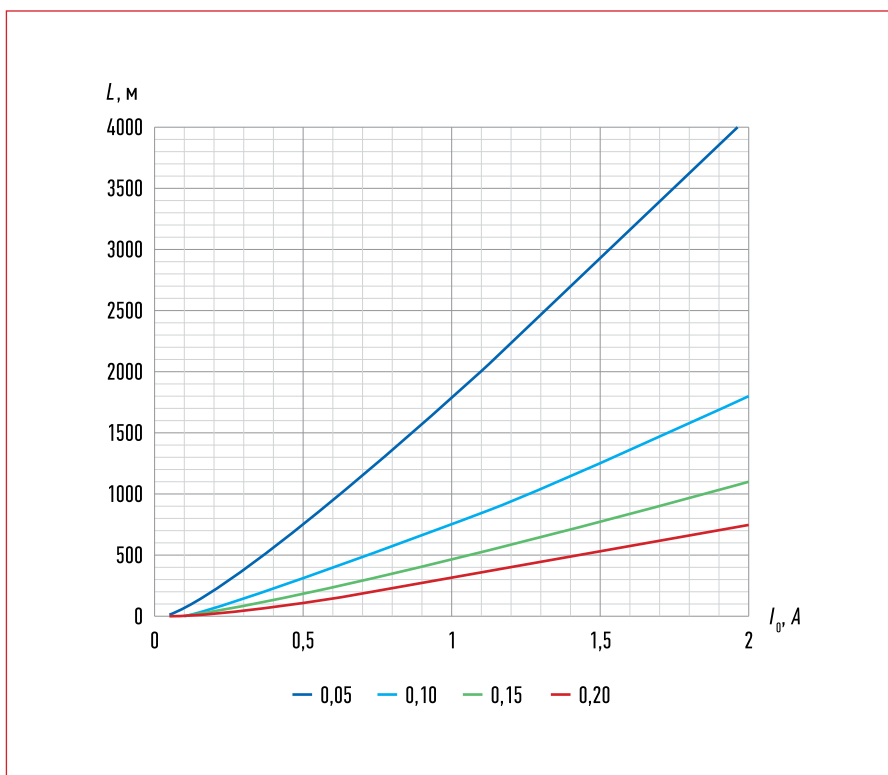


Рис. 4. Зависимости $L = f(\rho, I_0, y, U_z)$ от тока УКЗ-лкз при различных значениях U_z (индекс кривых) в районе точки дренажа для $\rho = 50$ Ом·м и $y = 6$ м

и различных фиксированных значений потенциалов земли U_z по линии трубопровода в районе точки дренажа (рис. 4).

С использованием приведенных зависимостей можно определить характеристики элементов УКЗ-лкз*, при которых ее параметры катодной защиты сопоставимы с представленными в табл. 1 и на рис. 2 параметрами катодной защиты трубопровода с использованием схемы УКЗ-т.

Для тока защиты $I_0 = 1,13$ А, требуемого для УКЗ-т с обеспечением плеча зоны защиты 135 км и уровня потенциала земли по линии трубопровода $U_z \approx 0,10$ В в зоне укладки протяженного анода УКЗ-лкз, его длина L должна составлять примерно 800 м.

Требуемое распределение электрического потенциала по длине анода можно определить через критерий эквипотенциальности K_L , выраженный через отношение электриче-

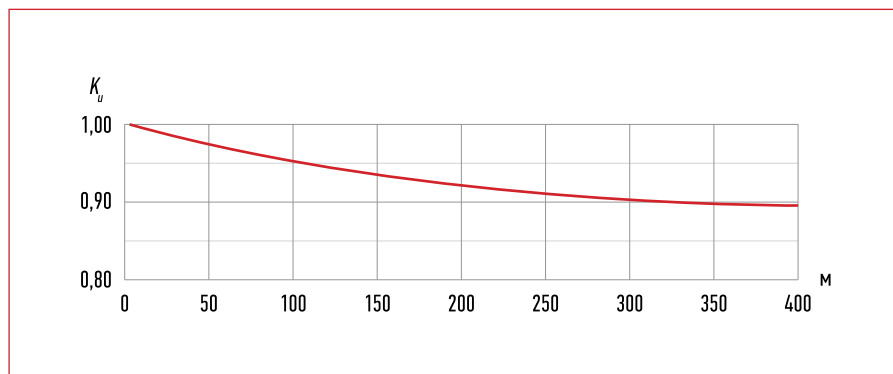


Рис. 5. Распределение отношения потенциалов анода $U_{ax}/U_{ax=0}$ по длине анода $L = 400$ м, уложенного на глубине 2 м в земле при $\rho = 50$ Ом·м, с постоянной распространения собственно анода $\alpha = 1,68 \cdot 10^{-3}$ 1/м

ского потенциала U_{al} анода в конце к потенциалу U_{a0} анода в точке питания. В зависимости от поставленной задачи K_V может находиться в диапазоне $K_V = U_{al}/U_{a0} = 1,0 \div 0,8$. Критерий K_V анода определяется выражением:

$$K_V = \frac{1}{ch(\alpha L)}$$

Постоянная распространения α анода должна быть определена

с учетом удельного электрического сопротивления грунтов в месте его размещения.

Требуемые параметры протяженно-го анода при питании его в середине длины определяются подбором постоянной распространения α для длины 400 м в грунтах $\rho = 50$ Ом·м на основе критерия $K_V = 1,0 \div 0,8$ (рис. 5).

Контрольные расчеты параметров катодной защиты УКЗ-лкз* с выб-

ранными параметрами и сравнение их с параметрами катодной защиты, достигаемыми схемой УКЗ-т, позволяют сделать вывод об их достаточной для практики сходимости (рис. 6, табл. 2).

Максимальное отличие поляризационных потенциалов U_p в зоне прохождения анода не превышает 1%. Плечо зоны защиты L_z при этом для обеих установок составляет 135 км.

В отечественных компаниях, обеспечивающих материалами и оборудованием системы противокоррозионной защиты подземных трубопроводов, налажен выпуск различных протяженных анодов как с фиксированными параметрами, так и анодов, параметры которых могут быть заданы при разработке конкретных проектных решений, что позволяет обеспечить оптимальные параметры различных схем катодной защиты с минимальными затратами и с высокой эффективностью работы.

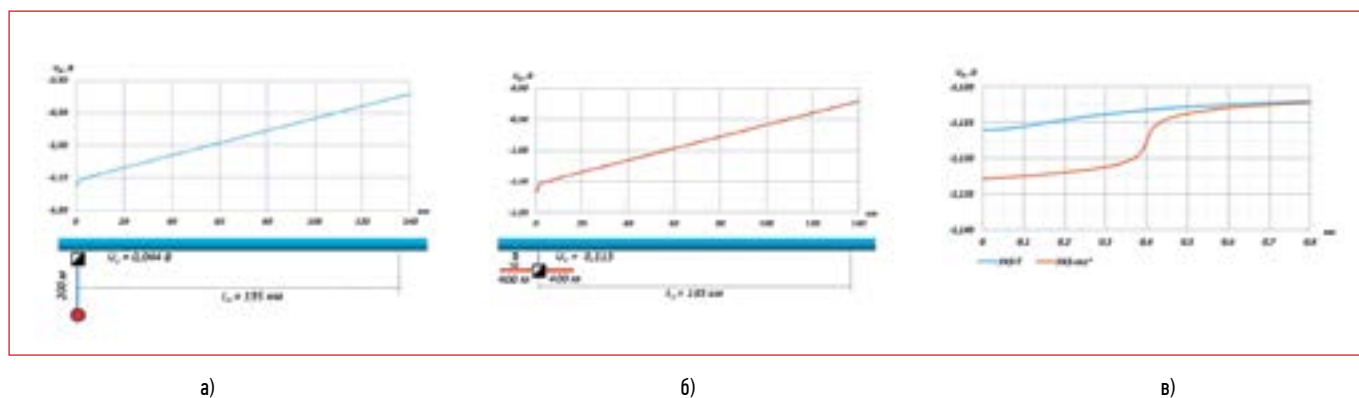


Рис. 6. Распределение защитного потенциала U_p на трубопроводе при различных схемах установок катодной защиты:

а) УКЗ-т; б) оптимальной схеме УКЗ-лкз*; в) сравнение потенциалов U_p схемы УКЗ-т и схемы УКЗ-лкз* в районе точки дренажа в области прохождения протяженного анода

Таблица 2. Значения параметров катодной защиты для УКЗ-т и оптимальной схемы УКЗ-лкз* в точке дренажа

Тип УКЗ	U_c , В	I_{op} , А	dU_p , В	U_p , В	S_p , м ²	j , А/м ²	U_{p1} , В	U_{p2} , В
УКЗ-т	-0,6	1,13	-0,298	0,044	0,0001	1,543	-1,126	-1,468
УКЗ-лкз	-0,6	1,13	-0,298	0,113	0,0001	1,854	-1,133	-1,544

Литература:

- Бэжман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии: Справочник / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 496 с.
- Красноярский В.В., Цикерман Л.Я. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. М.: Высшая школа, 1968. 296 с.
- Остапенко В.Н. Математические вопросы катодной защиты трубопровода от коррозии. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 62 с.
- ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Электронный источник]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-51164-98> (дата обращения: 26.03.2018).