

На правах рукописи

**ПЕСИН АЛЕКСАНДР СЕМЕНОВИЧ**

**ВЛИЯНИЕ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МАГИСТРАЛЬНЫХ  
ГАЗОПРОВОДОВ НА ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ КОРРОЗИОННЫХ  
ТРЕЩИН ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ**

Специальность 25.00.19 - Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень 2005

Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете

Научный руководитель      доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки и техники РФ  
**Кушнир Семен Яковлевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Малюшин Николай Александрович**

кандидат технических наук, доцент  
**Бачериков Александр Сергеевич**

Ведущая организация: Государственное унитарное предприятие  
«Институт проблем транспорта  
энергоресурсов» (ГУП «ИПТЭР»), г.Уфа

Защита диссертации состоится    11 марта 2005г. в 16<sup>00</sup> час.  
на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при  
Тюменском государственном нефтегазовом университете  
по адресу: 625000, г.Тюмень, ул.Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТюмГНГУ  
по адресу 625039, г.Тюмень, ул.Мельникайте, 72.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Челомбитко С.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Анализ причин аварийности магистральных газопроводов показывает, что основной причиной их отказов являются коррозионные повреждения (до 40%). При этом, общая и язвенная коррозии наблюдаются практически на всех трубопроводах, имеющих дефекты изоляции. Для борьбы с этими видами коррозии в газопроводном транспорте используется дополнительная защита – электрохимическая. Подключение катодной защиты позволяет если не остановить, то значительно замедлить общую и язвенную коррозии металла труб в местах с дефектами изоляции. Поэтому все магистральные газопроводы имеют катодную (электрохимическую защиту).

При обслуживании трубопроводов уделяется внимание наличию катодного потенциала по всей длине трассы. Разработаны эффективные методы и достаточно совершенные приборы, позволяющие по утечке защитного тока обнаруживать повреждения изоляции.

Однако в последние десятилетия (в бывшем СССР коррозионное растрескивание под напряжением было обнаружено в 80-х годах) – появился новый вид коррозионного повреждения магистральных газопроводов – коррозионное растрескивание под напряжением. Стресс-коррозия на протяжении уже 30 лет представляет собой одну из наиболее актуальных проблем при транспортировке газа как в России, так и за рубежом. Так в ООО «Севергазпром» аварии по причине коррозионного растрескивания под напряжением составляют почти 70%, а в системе магистральных газопроводов ООО «Сургутгазпром» - до 40% от общего числа аварий.

Проблеме коррозионного растрескивания под напряжением посвящены работы многих российских и зарубежных исследователей, в том числе Абдуллина И.Г., Гареева А.Г., Мостового А.В., Отта К.Ф.,

Зайнуллина Р.С., Гумерова А.Г., Гутмана Э.М., Медведева В.Н., Хажинского Г.М., Кузнецова А.М., Димова Л.А., Асадуллина М.З., Baker T.M., Dikman P., Fessler R.R., Wilson T.J.

Таким образом, коррозионное растрескивание под напряжением является одной из основных причин отказов и аварий на магистральных газопроводах и, как правило, развивается на внешней катоднозащищенной поверхности, а их катодная защита – одним из факторов, существенно влияющих на процесс развития трещин.

Поэтому **целью настоящего исследования является:** на основе исследования механизма образования и развития коррозионных трещин оценить влияние катодной защиты на развитие коррозионных трещин под напряжением в стенках магистральных газопроводов.

Для выполнения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи:**

- изучить кинетику коррозионного процесса трещин в стенке магистрального газопровода в отсутствии катодной защиты;
- изучить динамику глубинного роста одиночной трещины в стенке газопровода при отсутствии катодной защиты;
- исследовать кинетику коррозионного процесса и динамику глубинного роста трещин в стенке газопровода при наложенной катодной защите;
- исследовать динамику развития коррозионной трещины под напряжением по её глубине;
- установить связь выявленных закономерностей динамики роста трещины с её предельной глубиной.

#### **Научная новизна выполненных исследований**

Выявлена динамика глубинного роста коррозионной трещины под напряжением в стенке магистрального газопровода в отсутствии катодной защиты. При этом получена аналитическая зависимость, позволяющая

прогнозировать кинетику коррозионного процесса ( $j_a$ ) для других трещин со своими значениями параметров ( $r_e$  и  $l$ ), а также определить защитный потенциал и плотность тока для уменьшения скорости коррозии.

Впервые выявлено влияние катодной защиты на динамику глубинного роста коррозионной трещины. Автором получено уравнение динамики, связывающее скорость и глубину образования трещины со временем.

### **Практическая ценность работы**

Полученные автором результаты расширяют научные познания о механизме и развитии коррозионных процессов. Это позволяет учесть влияние катодной защиты на процессы коррозионного растрескивания стенок магистральных газопроводов. Результаты исследования повышают требования к мониторингу и диагностике магистральных газопроводов.

**На защиту выносятся** кинетика и динамика глубинного роста одиночной стресс-коррозионной трещины при наличии и отсутствии катодной защиты.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены на: научно-практической конференции по проблемам состояния и перспектив развития нефтегазовых объектов Западной Сибири, г.Тюмень, ТГНГУ, 2002г; на международном научно-практическом семинаре «Геотехнические и эксплуатационные проблемы в нефтегазодобывающей отрасли» (г.Тюмень, 2002г.); на двенадцатой международной деловой встрече «Диагностика-2002», Турция, 2002г.; на юбилейной научно-практической конференции по перспективам развития нефтегазовых объектов Западной Сибири, г.Тюмень, ТГНГУ, 2003г.; на региональной научно-практической конференции ТГНГУ, 2004 г.

**Публикации.** По результатам выполненных исследований опубликовано 6 статей.

**Объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, общих выводов и списка литературы. Диссертация изложена на 117 стр., содержит 29 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 110 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

**В первой главе** приведен анализ технического состояния и причин отказов линейной части магистральных газопроводов Западной Сибири. Поскольку (до 40%) основной причиной отказов являются коррозионные повреждения, то автором рассмотрены их виды, включая коррозионное растрескивание под напряжением, как наиболее их опасный вид. Из выполненного анализа следует, что в настоящее время факторы, определяющие возникновение и развитие стресс-коррозионных повреждений газопроводов и степень их влияния на процесс коррозионного растрескивания изучены недостаточно. На основании этого определены основные направления исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** приводится описание видов коррозии (химическая, электрохимическая, биохимическая) и рассматриваются характерные особенности протекания коррозионного процесса.

Из локальной коррозии отдельно выделено коррозионное растрескивание под напряжением (КРН), связанное с образованием и развитием микротрещин.

Основное внимание уделено кинетике коррозионного процесса для случая узкой несквозной трещины прямоугольного сечения, находящейся на внешней поверхности трубопровода и заполненной природным электролитом (рис.1).

Указанное на рис.1(а) расположение модельной трещины, при котором ее берега параллельны образующим трубы, соответствует наиболее опасной ситуации возможного порыва трубопровода.

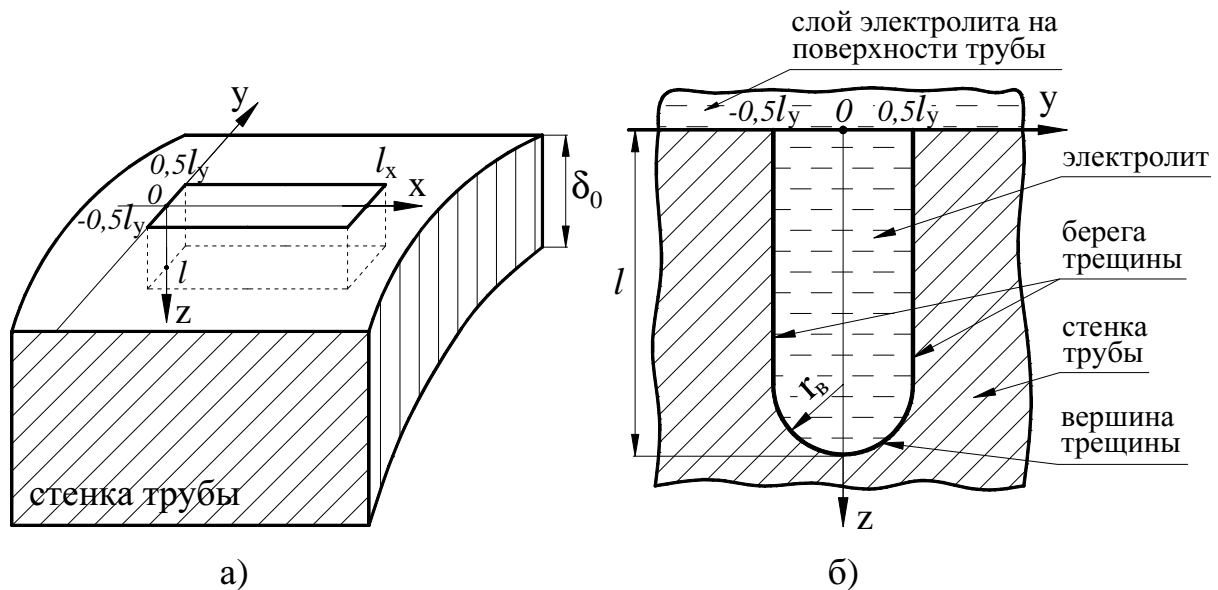


Рис.1. Расположение узкой щели на внешней поверхности трубы (а) и ее поперечное сечение в плоскости  $YOZ$  (б)

В любом сечении, параллельном плоскости  $XOY$ , модельная трещина представляет собой прямоугольник с размерами  $l_x$  и  $l_y$ , связанными между собой следующим соотношением:

$$l_x = l_y. \quad (1)$$

Вершина трещины считается полуцилиндрической поверхностью с длиной  $l_x$  и радиусом  $r_0 = 0,5l_y$ .

Глубина проникновения трещины в тело трубы характеризуется величиной  $l$ , при этом трещина считается достаточно развившейся, т.е.

выполняется неравенство:

$$r_{\epsilon} \ll l. \quad (2)$$

Трещина заполнена природным электролитом, основные характеристики которого (химический состав, водородный показатель pH, удельное электрическое сопротивление и т.д.) считаются известными.

В настоящее время исследованиями ряда автором доказано, что вершина трещины находится в анодном состоянии, что обусловлено, в первую очередь, наличием растягивающих механических напряжений в стенке трубы.

Берега трещины представляют собой пространственно распределенный катод, поляризацией которого (с учетом малого значения плотности катодного тока) можно пренебречь.

Кинетика коррозионного процесса в трещине определяется потенциалом и током электролита. Вывод основных соотношений между потенциалом и токами иллюстрируется на рис.2. и опирается на следующие допущения:

- анод вершины и распределенный по берегам трещины катод образуют короткозамкнутую (через массу металла) гальваническую пару (рис.2(а));

- в поперечном сечении  $z = \text{const}$  модельной трещины поверхность электролита (вне двойного электрического слоя) считается эквипотенциальной с величиной потенциала  $\varphi_{\epsilon}(z)$ ;

- ток в электролите раскладывается на две составляющие: ток по оси  $OZ$  с плотностью  $j_{\epsilon}(z)$  и катодный ток с плотностью  $j_{\kappa}(z)$ , направленный нормально к берегам трещины (ток поляризации).



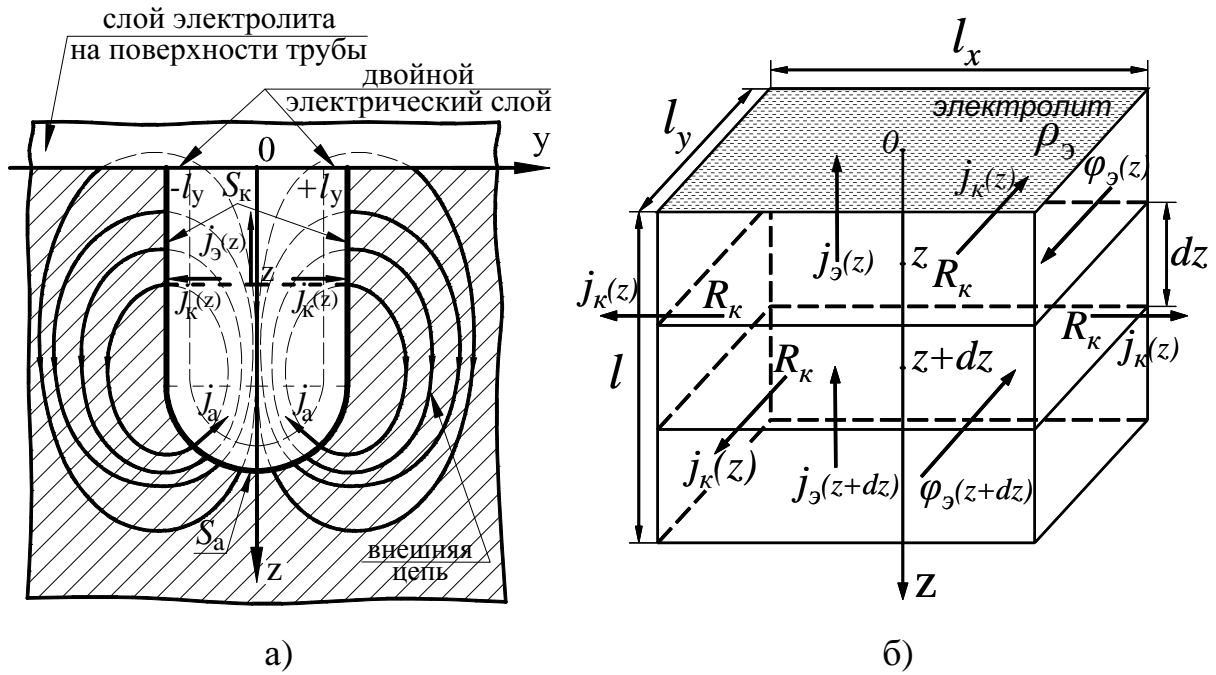


Рис. 2. К выводу соотношений между плотностями токов  $j_3(z)$ ,  $j_k(z)$  и потенциалом  $\varphi_3(z)$

Тогда для двух близких поперечных сечений трещины с координатами  $z$  и  $z+dz$  на основании закона сохранения электрического заряда и закона Ома для участка справедлива следующая система дифференциальных соотношений:

$$\begin{cases} \frac{dj_3(z)}{dz} = \frac{1}{l_y} \cdot j_k(z) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \rho_3 \cdot j_3(z) = \frac{d\varphi_3(z)}{dz} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} j_k(z) = \frac{\varphi_3(z) - \varphi_{эп}}{R_k}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $\rho_3$  - удельное электрическое сопротивление электролита;

$R_k$  - полное сопротивление на границе металл-электролит;

$\varphi_{эп}$  - равновесный потенциал электролита.

Из (3)-(5) следует уравнение второго порядка для потенциала  $\varphi_{\vartheta}(z)$ :

$$\frac{d^2 \varphi_{\vartheta}}{dz^2} - \kappa^2 \cdot \varphi_{\vartheta} = -\kappa^2 \cdot \varphi_{\vartheta p}, \quad (6)$$

$$(\kappa = \sqrt{\frac{\rho_{\vartheta}}{r_{\vartheta} \cdot R_{\kappa}}} - \text{постоянная в } l/m),$$

при следующих граничных условиях:

$$\begin{cases} \varphi_{\vartheta} = \varphi_{\vartheta p}, & \text{при } z = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \varphi_{\vartheta} = \varphi_{\vartheta l}, & \text{при } z = l. \end{cases} \quad (8)$$

Решением системы (7)-(8) является выражение для потенциала  $\varphi_{\vartheta}(z)$ :

$$\varphi_{\vartheta}(z) = (\varphi_{\vartheta l} - \varphi_{\vartheta p}) \cdot \frac{\text{sh } kz}{\text{sh } kl} + \varphi_{\vartheta p}. \quad (9)$$

Из решения (9) и уравнений (5), (4) находятся следующие зависимости для плотностей токов  $j_{\kappa}(z)$ ,  $j_{\vartheta}(z)$  и плотности анодного тока  $j_a$ :

$$\begin{cases} j_{\kappa}(z) = \frac{(\varphi_{\vartheta l} - \varphi_{\vartheta p})}{R_{\kappa}} \cdot \frac{\text{sh } kz}{\text{sh } kl} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} j_{\vartheta}(z) = \frac{(\varphi_{\vartheta l} - \varphi_{\vartheta p})}{\sqrt{\rho_{\vartheta} R_{\kappa} r_{\vartheta}}} \cdot \frac{\text{ch } kz}{\text{sh } kl} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} j_a = \frac{2r_{\vartheta} l_x}{\pi r_{\vartheta} l_x} \cdot j_{\vartheta}(l) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(\varphi_{\vartheta l} - \varphi_{\vartheta p})}{\sqrt{\rho_{\vartheta} R_{\kappa} r_{\vartheta}}} \cdot \frac{\text{ch } kl}{\text{sh } kl}. \end{cases} \quad (12)$$

Как следует из (10) и (12), кинетика коррозионного процесса в трещине (иначе говоря, токи  $j_{\kappa}(z)$  и  $j_a$  определяется разностью потенциалов  $(\varphi_{\vartheta l} - \varphi_{\vartheta p})$ . В свою очередь, потенциал  $\varphi_{\vartheta l}$  находится через перенапряжение  $\eta_a$  анода или через его равновесный потенциал  $\varphi_{pa}$ .

Существующие в настоящее время попытки связать этот потенциал с характеристиками напряженно-деформированного состояния стенки трубопровода носят, по мнению автора, не всегда последовательный характер.

В связи с этим обстоятельством в диссертации решалась обратная задача: по известному (на основе натурных наблюдений) значению плотности анодного тока  $j_a$  установить закономерности кинетического процесса коррозии в трещине и исследовать динамику ее глубинного роста.

Как следует из формулы (12), при постоянстве напряжения в электролите  $U_l = \varphi_{эл} - \varphi_{эп}$  плотность анодного тока  $j_a$  также может считаться практически постоянной со значением  $\bar{j}_a$  при выполнении следующего неравенства для глубины трещины  $l$ :

$$l \geq l_1 = \frac{1}{k}. \quad (13)$$

В свою очередь, плотность тока  $\bar{j}_a$  связана со средней скоростью коррозии  $V_{кор}$  соотношением:

$$\bar{j}_a = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\rho_{Fe} \cdot V_{кор}}{k_э}, \quad (14)$$

где  $\rho_{Fe}$  – плотность трубной стали;

$k_э$  – электрохимический эквивалент железа.

По результатам натурных наблюдений ряда авторов значение  $V_{кор}$  находится в диапазоне 0,25 - 1,2 мм/год, приведенные в работы расчеты кинетики модельной трещины соответствуют значению  $V_{кор} = 1,1$  мм/год.

Вводя понятие мгновенной скорости глубинного роста трещины

$$V(\tau) = \frac{dl(\tau)}{d\tau} \quad (15)$$

и учитывая, что между мгновенными значениями  $j_a(\tau)$  и  $V(\tau)$  также существует соотношение (14), получаем из (12) уравнение роста трещины в глубину:

$$\frac{dl}{d\tau} = V_{кор} \cdot \frac{\operatorname{ch} kl}{\operatorname{sh} kl}. \quad (16)$$

Разделяя переменные в дифференциальном уравнении (16) и выполняя интегрирование, находим зависимость глубинного роста трещины  $l(\tau)$  в неявном виде:

$$\operatorname{ch} kl(\tau) = \operatorname{ch} kl_0 \cdot \exp(kV_{кор}\tau), \quad (17)$$

где  $l_0$  - начальная глубина трещины.

Графический вид зависимостей  $V(\tau)$  и  $l(\tau)$  показан на рис.3.

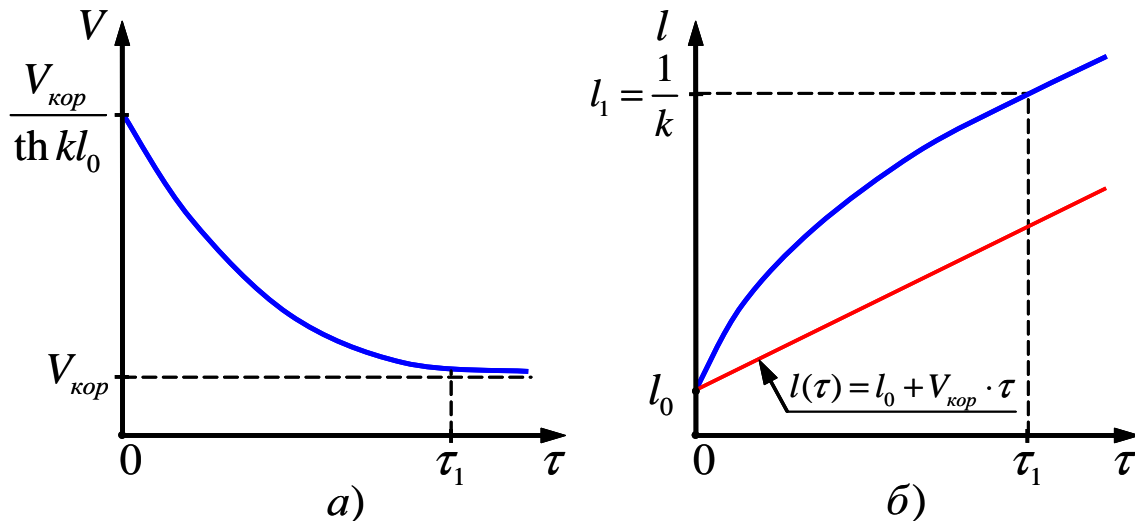


Рис.3. Зависимость скорости роста трещины (а) и ее глубины (б) от текущего времени  $\tau$

Как следует из зависимости (17), наиболее резкое изменение величин  $V(\tau)$  и  $l(\tau)$  приходится на начальный этап развития трещины с продолжительностью

$$\tau_1 = \frac{0,43}{kV_{кор}}. \quad (18)$$

Ценность соотношения (16) заключается в том, что, определив (по значению  $V_{кор}$ ) плотность анодного тока для одной трещины, можно предсказать кинетику коррозионного процесса (т.е. значение  $j_a$ ) для другой трещины со своими значениями параметров  $r_e$  и  $l$ .

По известному значению  $V_{кор}$  может быть найдена не только величина  $\bar{j}_a$ , но и э.д.с.  $E$  гальванопары.

Поскольку для короткозамкнутой гальванопары ее э.д.с.  $E$  равняется сумме перенапряжений  $\eta_a$  анода и  $\eta_k$  катода, а для слабополяризуемого катода  $\eta_k \rightarrow 0$ , то

$$E = \eta_a. \quad (19)$$

Найденное значение  $E$  позволяет определить защитный потенциал, необходимый для уменьшения скорости коррозии.

**В третьей главе** приводится классификация способов защиты от коррозии и практические способы их реализации.

Среди вариантов электрохимической защиты (ЭХЗ) рассматривается катодная защита, как наиболее часто применяющийся метод замедления коррозии подземных трубопроводов (рис.4).

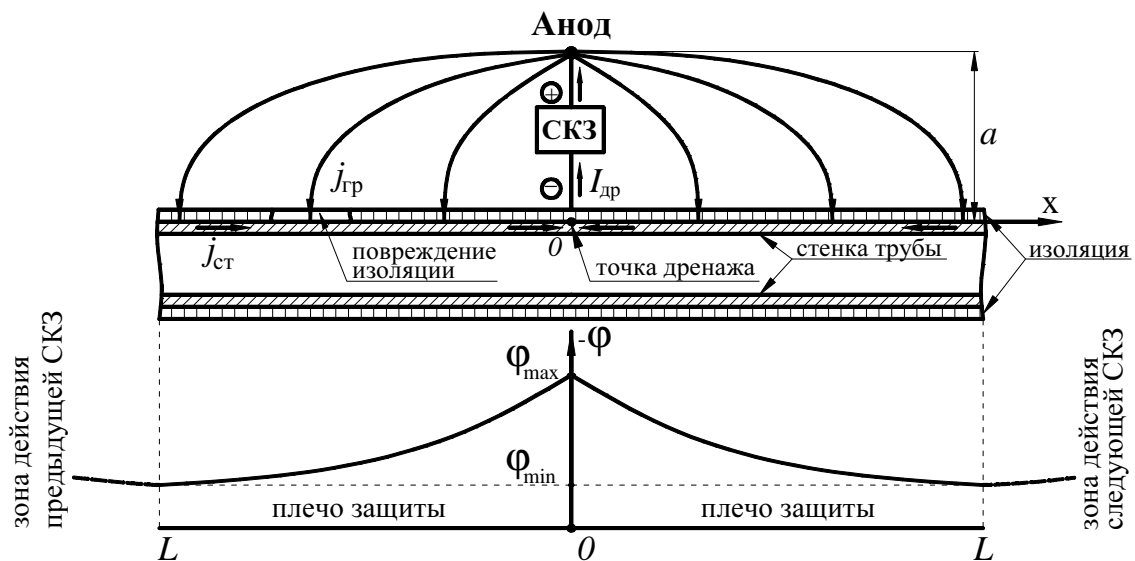


Рис.4. Схема катодной защиты

При локальном повреждении изоляции имеет место прямой контакт грунта с внешней поверхностью трубопровода, вследствие чего наблюдается резкое увеличение плотности тока  $j_{гр}$ , приводящее к уменьшению тока коррозии. Эффективность катодной защиты характеризуется степенью защиты  $K_{защ}$ , определяемым следующим способом:

$$K_{защ} = \frac{j_a - j'_a}{j_a}, \quad (20)$$

где  $j_a$  и  $j'_a$  - плотности анодного тока до и после катодной защиты.

Иллюстрация воздействия катодной защиты проводится с помощью коррозионных диаграмм, где показано, что при наложенной защите происходит смещение потенциала коррозии  $\varphi_{кор}$  в область более отрицательных значений, что приводит к уменьшению анодного тока.

Рассмотрено влияние наложенной катодной защиты на кинетику коррозионного процесса в модельной трещине (рис.5 (а)).

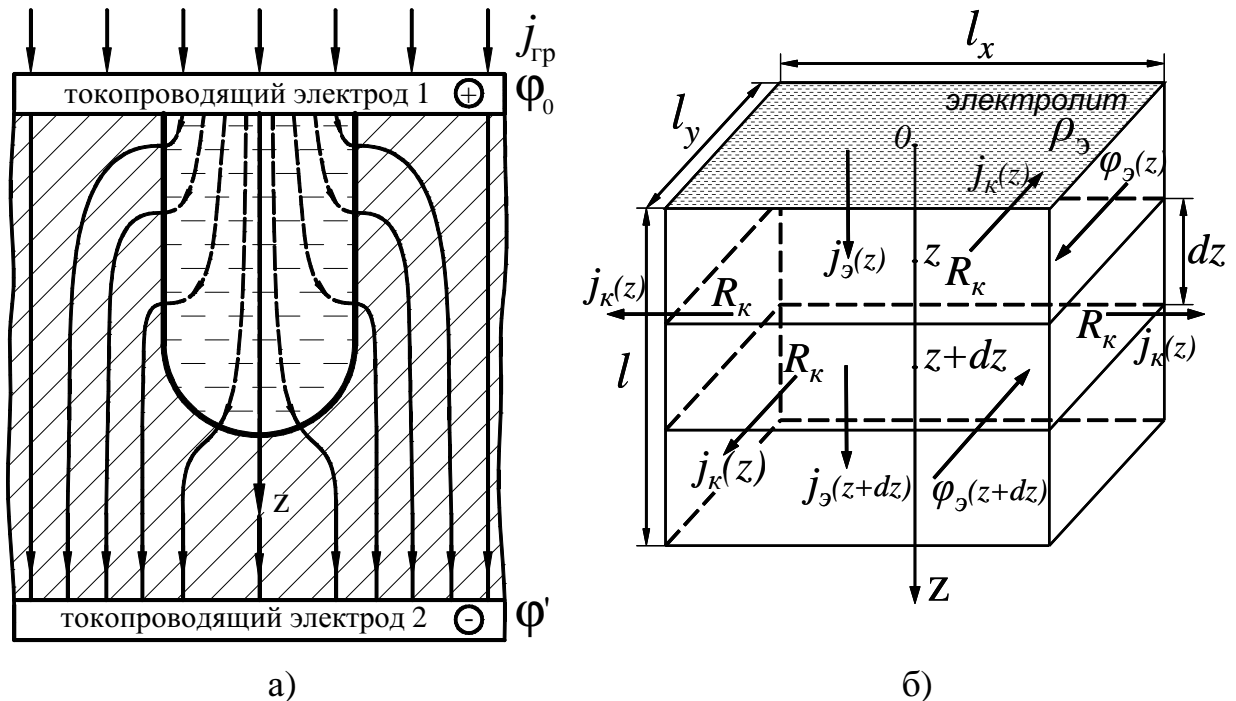


Рис.5. Картина растекания токов в электролите и металле при наложении управляемого внешнего потенциала  $\varphi_o$  (а) и расчетная схема для определения токов и потенциала электролита (б)

Воздействие анодного заземлителя катодной защиты в зоне локального повреждения имитируется электрическим полем двух электродов, при этом на время «забывается» анодное состояние вершины трещины, т.е. вся поверхность контакта щели с электролитом считается катодом.

Для получения основных соотношений используется расчетная схема (рис.5(б)), в которой по сравнению с рис.2(б) изменено направление тока  $j_{\varphi}(z)$  на противоположное. Тогда система уравнений для описания кинетики электрохимического процесса в трещине выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dj_{\varphi}(z)}{dz} = -\frac{1}{r_e} \cdot j_k(z) \\ \rho_{\varphi} \cdot j_{\varphi}(z) = -\frac{d\varphi_{\varphi}(z)}{dz} \\ j_k(z) = j_{ok} \cdot \exp\left(\frac{\varphi_{\varphi} - \varphi_{\varphi p}}{\vartheta_k}\right), \end{array} \right. \quad (21)$$

где  $j_{ok}$  - плотность тока обмена катода;

$\vartheta_k$  - тафелевская константа для катода.

Изменение выражения для плотности  $j_k$  по сравнению с (5) связано со значительной поляризацией катода в рассматриваемом случае.

Из системы (21) выводится следующее нелинейное уравнение для потенциала  $\varphi_{\varphi}(z)$ :

$$\frac{d^2\varphi_{\varphi}}{dz^2} = A \cdot \exp\left(\frac{\varphi_{\varphi}}{\vartheta_k}\right), \quad (22)$$

где  $A = \frac{\rho_{\varphi}}{r_e} \cdot j_{ok} \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_{\varphi p}}{\vartheta_k}\right)$  - постоянная с размерностью  $B/M^2$ .

Что касается граничных условий, то в главе рассматриваются граничные условия 1-ого рода:

$$\begin{cases} \varphi_{\varepsilon} = \varphi_o, & \text{при } z = 0 \\ \varphi_{\varepsilon} = \varphi_{\varepsilon l}, & \text{при } z = l. \end{cases} \quad (23)$$

Величина  $\varphi_0$  определяется естественным потенциалом  $\varphi_{ест}$  подземного трубопровода и защитным потенциалом  $\varphi_{защ}$  станции катодной защиты (СКЗ)

$$\varphi_0 = \varphi_{ест} - \varphi_{защ} + \varphi_{\varepsilon p} \quad (24)$$

и для реальных условий эксплуатации подземных магистральных газопроводов лежит в диапазоне

$$\varphi_0 = 0,1 \div 2,5 \text{ В}. \quad (25)$$

Нахождение значения  $\varphi_{\varepsilon l}$  производится следующим образом. Плотность катодного тока  $j_{\varepsilon}$  в вершине трещины определяется уравнением Тафеля для катода, переписанном в следующем виде:

$$j_{\varepsilon} = j_{ok} \exp\left(\frac{\varphi_{\varepsilon l} - \varphi_{\varepsilon p}}{\varepsilon_k}\right). \quad (26)$$

Эта же плотность тока  $j_{\varepsilon}$  может быть связана с плотностью тока  $j_a$ , рассмотренной во второй главе, через степень защиты  $K_{защ}$ :

$$j_{\varepsilon} = K_{защ} \cdot j_a \quad (0 \leq K_{защ} \leq 1). \quad (27)$$

Таким образом, по заданному значению степени защиты  $K_{защ}$  из (27) и (26) может быть найдено значение  $\varphi_{\varepsilon l}$ :

$$\varphi_{\varepsilon l}(K_{защ}) = \varphi_{\varepsilon p} + \varepsilon_k \ln\left(\frac{j_{\varepsilon}}{j_a}\right). \quad (28)$$



Решением системы (22)-(23), названным 1-ым решением, является следующее неявное выражение для  $\varphi_{\varepsilon}(z)$ :

$$\sqrt{\frac{A}{2\epsilon_k}} \cdot z = \exp\left(-\frac{\varphi_{\varepsilon l}}{2\epsilon_k}\right) \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \sqrt{\exp\left(\frac{\varphi_0 - \varphi_{\varepsilon l}}{\epsilon_k}\right) - 1} - \operatorname{arctg} \sqrt{\exp\left[\left(\frac{\varphi_{\varepsilon}(z) - \varphi_{\varepsilon l}}{\epsilon_k}\right) - 1\right]} \right\}. \quad (29)$$

Поскольку справочное значение тафелевской константы  $\epsilon_k$  равно 0,052 В, то уже для значения  $\varphi_0 = 0,3$  В (с учетом того, что  $\varphi_{\varepsilon l} < 0$ ) практически реализована физическая бесконечность, что позволяет получить из (29) следующее соотношение между глубиной щели и потенциалом  $\varphi_{\varepsilon l}$ :

$$l_{np}(K_{защ}) = l_{хар} \cdot \exp\left[\frac{\varphi_{\varepsilon p} - \varphi_{\varepsilon l}(K_{защ})}{2\epsilon_k}\right], \quad (30)$$

где  $l_{хар} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2r_{\varepsilon}\epsilon_k}{\rho_{\varepsilon}j_{ок}}}$  - характерная длина, смысл которой поясняется ниже.

Условие (30) имеет простое объяснение: если глубина трещины  $l$  удовлетворяет неравенству

$$l \leq l_{np}(K_{защ}), \quad (31)$$

то на такой длине возможно удержание потенциала  $\varphi_{\varepsilon l}(K_{защ})$  на заданном уровне.

Если же выполняется обратное соотношение

$$l > l_{np}(K_{защ}), \quad (32)$$

то значение потенциала в вершине трещины будет меньше  $\varphi_{\varepsilon l}(K_{защ})$ .

При выполнении более сильного неравенства

$$l \geq l_{хар} = l_{np}(0) \quad (33)$$

ток  $j_\epsilon$  практически равен нулю, т.е. потенциал  $\varphi_0$  (при сколь угодно большом значении) не влияет на характер электрохимических процессов в вершине трещины, что эквивалентно выполнению равенства  $\varphi_{\epsilon l} = \varphi_{\epsilon p}$ .

В работе выполнено построение зависимостей  $\varphi_\epsilon(z)$ ,  $j_\epsilon(z)$ ,  $j_k(z)$  для конкретных значений параметров модельной трещины.

Далее проводится «включение» анода вершины, что приводит к следующим результатам. При значении  $K_{защ} = 1$  ток  $j_\epsilon = j_a$ , т.е. при начальной глубине трещины  $l(0) \leq l_{np}(1)$  процесс коррозии будет подавлен полностью.

Если же начальная глубина трещины будет больше  $l_{np}(1)$ , то коррозия в вершине будет продолжаться с увеличивающейся скоростью (1-ая стадия глубинного роста трещин). При достижении глубины  $l = l_{хар}$  коррозионный процесс идет с постоянной скоростью  $V_{кор}$ , соответствующей плотности тока  $\bar{j}_a$  (2-ая стадия роста).

Закон роста трещины в глубину в этом случае определяется следующей цепочкой равенств, опирающихся на соотношения (14), (26) и (30):

$$\begin{aligned} \frac{dl(\tau)}{d\tau} &= V(\tau) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\kappa_\epsilon}{\rho_{Fe}} \cdot [j_a - j_\epsilon(\tau)] = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\kappa_\epsilon}{\rho_{Fe}} \cdot \left\{ j_a - j_{ok} \exp \left[ \frac{\varphi_{\epsilon l}(\tau) - \varphi_{\epsilon p}}{\epsilon_k} \right] \right\} = \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\kappa_\epsilon}{\rho_{Fe}} \cdot \left( j_a - j_{ok} \frac{l_{хар}^2}{l^2} \right) = \bar{V} \cdot \left( 1 - \frac{j_{ok}}{j_a} \cdot \frac{l_{хар}^2}{l^2} \right) = V_{кор} \cdot \left( 1 - \frac{l_{np}^2(1)}{l^2} \right). \end{aligned} \quad (34)$$

Таким образом, уравнения глубинного роста трещины выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dl}{d\tau} = V_{кор} \cdot \left(1 - \frac{l_{np}^2(1)}{l^2}\right); l(0) > l_{np}(1); l(0) \leq l(\tau) < l_{хар} \quad (1-ая стадия) \\ \frac{dl}{d\tau} = V_{кор}; l(0) = l_{хар}; l_{хар} \leq l(\tau) \quad (2-ая стадия). \end{cases} \quad (35)$$

Графический вид мгновенных зависимостей  $V(\tau)$  и  $l(\tau)$  приведен на рис.6.

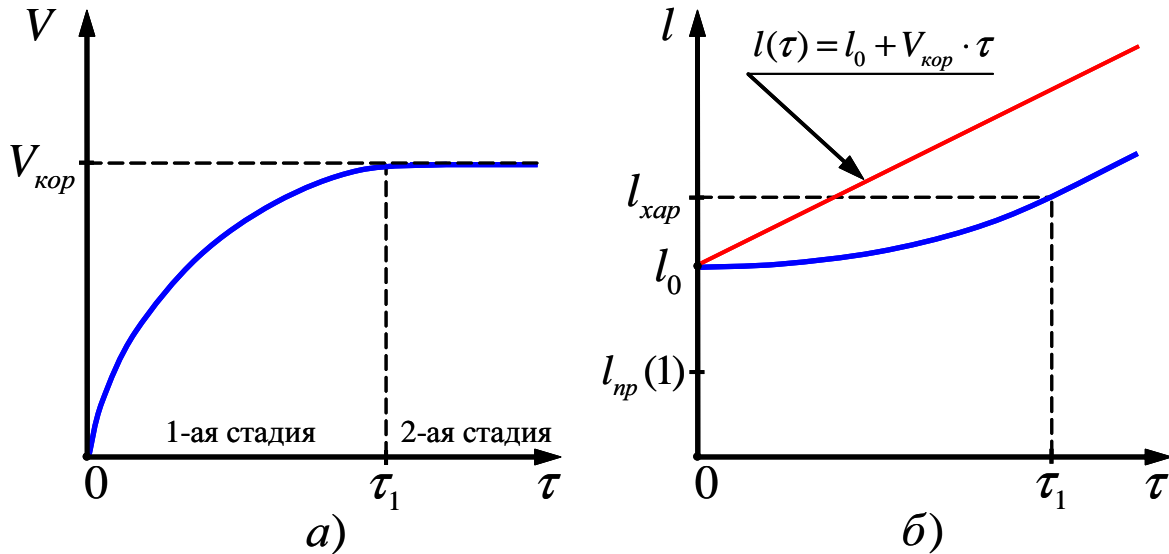


Рис.6. Зависимость мгновенной скорости (а) и мгновенной глубины трещины (б) от времени  $\tau$  :

$\tau_1$  - продолжительность первой стадии

**В четвертой главе** автором предлагается приближенный расчет следующих параметров катодной защиты:

- напряжение  $U$  между грунтом и трубопроводом;
- потенциал  $V$  стенки трубопровода;
- плотность тока  $j_{ер}$  из грунта на трубопровод для неповрежденных и поврежденных участков изоляции;
- ток  $I$  в стенке трубопровода или его плотность  $j_{см}$ .

Приводятся расчеты предельной глубины защиты  $l_{np}(K_{защ})$  при изменении параметров трещины и соответствующие графики.

Основное внимание уделено влиянию катодной защиты с учетом того обстоятельства, что ток  $j_{zp}$  ограничен по своему максимальному значению.

По результатам исследований ряда авторов диапазон изменения  $j_{zp}$  составляет

$$j_{zp} = 0,02 \div 0,45 \text{ A/м}^2, \quad (36)$$

где нижнее значение соответствует влажной среде, а верхнее – почве с высокой биологической активностью сульфатовосстанавливающих бактерий.

При рассмотрении коррозии на предыдущих этапах потенциал  $\varphi_0$  считался фиксированным, что позволяло иметь очень высокую плотность тока  $j_\varphi(0)$  на устье вершины.

Поскольку  $j_\varphi(0) = j_{zp}$ , то находилось решение уравнения (22) при измененном первом граничном условии (23):

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_\varphi}{dz} = -\rho_\varphi j_{zp}, & \text{при } z = 0 \\ \varphi_\varphi = \varphi_{\varphi l}, & \text{при } z = l. \end{cases} \quad (37)$$

Соответствующее решение (2-е решение) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{A}{2\epsilon_k}} \cdot z &= \exp\left(-\frac{\varphi_{\varphi l}}{2\epsilon_k}\right) \cdot \\ &\cdot \left\{ \operatorname{arctg}\left(\frac{\rho_\varphi \cdot j_{zp}}{\sqrt{2A\epsilon_k}}\right) - \operatorname{arctg}\sqrt{\exp\left[\frac{\varphi_\varphi(z) - \varphi_{\varphi l}}{\epsilon_k}\right] - 1} \right\}. \end{aligned} \quad (38)$$

Анализ решения (38) показывает следующее. Если выполняется необходимое условие подавления коррозии

$$j_{zp} > j_a, \quad (39)$$

то коррозионный процесс в вершине трещины будет остановлен, при ее длине, удовлетворяющей следующему неравенству:

$$l \leq l_{np}(1) = r_{\varepsilon} \frac{j_{\varepsilon p}}{j_a}. \quad (40)$$

С учетом реальных диапазонов изменения основных параметров, величина  $l_{np}(1)$ , определяемая формулой (40), намного меньше, чем величина  $l_{np}(1)$ , вычисляемая по формуле (30). Таким образом, вероятность продолжения коррозионного процесса в этом случае будет намного больше.

Вывод уравнения глубинного роста трещины, соответствующего решению 2, проводится по схеме (34), конечное уравнение имеет следующий вид:

$$V(\tau) = \frac{dl}{d\tau} = V_{кор} \left( 1 - \frac{j_{\varepsilon p}}{j_a} \cdot \frac{r_{\varepsilon}}{l} \right); \quad l(0) > l_{np}(1). \quad (41)$$

Зависимости  $V(\tau)$  и  $l(\tau)$  уравнения (41) схожи с зависимостями рис.6, однако время выхода  $\tau_1$  скорости  $V(\tau)$  на стационарное значение  $V_{кор}$  существенно меньше.

Следует отметить, что рассмотренные в работе случаи  $\varphi_0 = const$  и  $j_{\varepsilon p} = const$  соответствуют предельным закономерностям коррозионного развития трещины при наличии катодной защиты. В реальном случае происходит изменение во времени как величины  $\varphi_0$ , так и величины  $j_{\varepsilon p}$ .

Корректное рассмотрение такого процесса выходит за рамки диссертационной работы.

### **Основные выводы по работе**

На основе кинетики электрохимических процессов получены распределения потенциала и токов электролита в коррозионной трещине стенок магистральных газопроводов.

1. Получено и решено уравнение динамики глубинного роста трещин в стали газопровода в отсутствии катодной защиты.

2. Выявлено влияние катодной защиты на кинетику электрохимического процесса в природном электролите трещины.

3. Выявлены условия роста коррозионной трещины, получено и решено уравнение динамики глубинного роста коррозионных трещин в стенке газопровода.

4. Получено соотношение между наложенным потенциалом катодной защиты и током в грунте по трассе трубопровода и глубиной защиты трещины.

**Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

1. Кушнир С.Я К вопросу оптимального планирования ремонта магистральных газопроводов по данным внутритрубной диагностики / Кушнир С.Я, Горковенко А.И., Песин А.С. // Материалы международного семинара: «Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли» под общей редакцией профессора, д.т.н. С.Я.Кушнера. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002г.-С.162-163.

2. Песин А.С. Влияние электрохимической защиты трубопровода на развитие усталостных трещин / Песин А.С., Кушнир С.Я, Горковенко А.И. // Сборник научных трудов «Вопросы состояния и перспективы развития нефтегазовых объектов Западной Сибири».- Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. – С.67-69.

3. Песин А.С. Моделирование процессов, проходящих в газопроводе, с использованием методов вибродиагностики и теории случайных функций / Песин А.С., Пульников С.А., Гостев В.В, Хамидов Р.С. // Материалы региональной научно-практической конференции «Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта».- Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – С.40-43.

4. Песин А.С. Влияние изменения внутреннего давления в газопроводе на стресс-коррозионное растрескивание стенок трубы / Песин А.С., Гостев В.В, Пульников С.А., Хамидов Р.С. // Материалы региональной научно-практической конференции «Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта».- Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. – С.58-61.

5. Песин А.С. Кинетика глубинного роста одиночной модельной стресс-коррозионной трещины / Песин А.С., Горковенко А.И., Пульников С.А. // Сборник научных трудов: «Вопросы состояния и перспективы развития нефтегазовых объектов Западной Сибири.– Тюмень: ТюмГНГУ, 2005г.-С.22-27.

6. Песин А.С. Кинетика глубинного роста одиночной стресс-коррозионной трещины при наличии катодной защиты / Песин А.С., Горковенко А.И., Гостев В.В. // Сборник научных трудов: «Вопросы состояния и перспективы развития нефтегазовых объектов Западной Сибири.– Тюмень: ТюмГНГУ, 2005г.-С.28-31.