

## **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КАТОДНАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛА ОТ КОРРОЗИИ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Коррозионная защита оборудования компрессорных  
станций», для студентов I–II курсов, обучающихся по направлению  
13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

*Составители* **Н.В. Визгавлюст, К.В. Буваков**

УДК 620.197.5 (076.5)

ББК 34.661я7

**Электрохимическая катодная защита металла от коррозии** : методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Коррозионная защита оборудования компрессорных станций», для студентов I–II курсов, обучающихся по направлению 13.04.03 «Энергетическое машиностроение» / сост. : Н.В. Визгавлюст, К.В. Буваков. – Томск : Томский политехнический университет, 2024. – 24 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к использованию в учебном процессе  
«10» октября 2024 года, протокол № 9.

И.о. руководителя НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ,  
к.т.н., доцент

Т.С. Тайлашева

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
1 Основные положения теории коррозии.....	5
1.1 Общие понятия.....	5
1.2 Классификация коррозионных процессов .....	8
2 Основные способы защиты металла от коррозии .....	10
2.1 Конструкционные способы защиты .....	11
2.2 Пассивные способы защиты.....	12
2.3 Электрохимическая защита .....	13
3 Экспериментальная часть .....	15
3.1 Требования техники безопасности .....	15
3.2 Цель работы.....	16
3.3 Подготовка к экспериментам .....	16
3.4 Ход работы .....	17
3.5 Обработка экспериментальных данных .....	18
4 Содержание отчета о работе .....	21
5 Контрольные вопросы .....	21
Список литературы.....	23

## **Введение**

Коррозия представляет собой процесс, при котором материал подвергается разрушению под воздействием химических или электрохимических реакций с окружающей средой. Это явление имеет значительное влияние на промышленность, так как может привести к существенным финансовым потерям и снизить надежность и безопасность производственных процессов [1–5].

Борьба с коррозией эффективно увеличивает срок эксплуатации оборудования, уменьшает расходы на его техническое обслуживание и ремонт, а также помогает поддерживать репутацию компании путем гарантирования высокого качества продукции и услуг. Понимание проблемы коррозии и принятие мер для её предотвращения являются ключевыми аспектами успешного ведения бизнеса в современной индустриальной среде [2, 4, 5].

В данных методических указаниях рассмотрены классификация, условия возникновения и механизмы коррозии, способы защиты от коррозионного разрушения металлов, а также описывается методика определения скорости коррозии различных металлов гравиметрическим и объёмным методами.

# 1 Основные положения теории коррозии

## 1.1 Общие понятия

*Коррозией металлов* называют самопроизвольное разрушение металлов и сплавов вследствие их взаимодействия с окружающей средой. В основе этого взаимодействия лежат химические и электрохимические реакции, в которых металл окисляется, а иногда и механическое воздействие внешней среды [1–5]. Металл, подвергающийся коррозии, называется *корродирующим металлом*, а среда, в которой протекает коррозионный процесс, – *коррозионной средой*. Химические соединения, образующиеся в результате взаимодействия металла и коррозионной среды, называют *продуктами коррозии*. В общем виде процесс коррозии металла можно представить следующей схемой:

$\text{Me} + \text{окислитель} \rightarrow \text{продукты коррозии} (\text{Me}^{n+}, \text{Me}_x\text{O}_y, \text{Me}(\text{OH})_n, \text{соли}).$

Коррозия является физико-химическим процессом, и закономерности ее протекания определяются законами термодинамики и кинетики гетерогенных систем. Различают внутренние (связаны с металлом) и внешние (среда и условия протекания) *факторы коррозии*. Количественно скорость коррозии отражают *показатели коррозии*, среди которых различают *весовой, токовый и глубинный* показатели. *Весовой показатель* коррозии показывает изменение веса образца на единицу поверхности в единицу времени [5–7]:

$$\omega_{\text{корр}} = \frac{m - m_0}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

где  $m$  – конечная масса испытуемого образца, г;

$m_0$  – масса образца до коррозии, г;

$S$  – площадь корродирующей поверхности,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  – продолжительность коррозии, ч.

Если  $m > m_0$ , имеем положительный показатель коррозии, (продукты коррозии остаются на поверхности образца), если  $m < m_0$ , то показатель коррозии – отрицательный (металл растворяется).

Весовой показатель коррозии связан с *токовым* [5–7]:

$$i = \frac{\omega_{\text{корр}}}{q_{\text{Me}}} = \frac{\omega_{\text{корр}} \cdot n \cdot F}{M}, \quad (2)$$

где  $i$  – анодная плотность тока коррозии металла,  $\text{А}/\text{м}^2$ ;

$n$  – число моль электронов, моль  $e$ /моль;

$F$  – число Фарадея,  $F = 26,8 \text{ А} \cdot \text{ч/моль}$  (96485 Кл/моль);

$q_{\text{ме}}$  – электрохимический эквивалент металла, г/А·ч;

$M$  – молярная масса металла, г/моль.

Для равномерной коррозии металла на основании данных весового метода или электрохимических исследований можно получить глубинный показатель коррозии. *Глубинный показатель коррозии* связан с объемом разрушившегося металла и характеризует глубину проникновения коррозионного разрушения в течение определенного времени. Глубинный показатель  $P$  (мм/год) рассчитывается по формуле [5–7]:

$$P = 8,76 \cdot \frac{\omega_{\text{корр}}}{\rho}, \quad (3)$$

где 8,76 – коэффициент, учитывающий перевод единиц измерения;

$\rho$  – плотность корродирующего металла, г/см<sup>3</sup>.

Одна и та же потеря массы на единицу площади легкого металла, например, алюминия, соответствует большей глубине проникновения коррозии, чем для тяжелых металлов, например, свинца.

По глубинному показателю коррозии оценивают коррозионную стойкость металла, пользуясь десятибалльной шкалой [7].

Связь весового, глубинного и токового показателей электрохимической коррозии следует из уравнений (2) и (3).

$$\omega_{\text{корр}} = \frac{P \cdot \rho}{8,76} = i \cdot q_{\text{ме}}. \quad (4)$$

Для некоторых металлов [5–7], плотность которых лежит в интервале  $\rho = 7\text{--}9 \text{ г/см}^3$ , а электрохимический эквивалент близок к 1 ( $q_{\text{ме}} \approx 1 \text{ г/А} \cdot \text{ч}$ ), следует:

$$\omega_{\text{корр}} [\text{г/м}^2 \cdot \text{ч}] \approx P [\text{мм/год}] \approx i [\text{А/м}^2].$$

По скоростям коррозии и областям применения металлы, корродирующие равномерно, могут быть разделены на три группы [5–7]:

1) скорость коррозии не превышает 0,15 мм/год: металлы обладают высокой коррозионной стойкостью, они пригодны для изготовления ответственных изделий (например, валы и поршни, пружины);

2) скорость коррозии от 0,15 до 1,5 мм/год: металлы при отсутствии повышенных требований к коррозионной стойкости могут применяться для изготовления емкостей, трубопроводов, корпусов вентилях, болтов;

3) скорость коррозии больше 1,5 мм/год: такие металлы в технике, как правило, не используются.

Первопричиной коррозии металлов является *термодинамическая неустойчивость металлов* в различных коррозионных средах при данных внешних условиях. Возможность осуществления коррозионного процесса при изменении внешних параметров можно оценить знаком изменения изобарно-изотермического потенциала реакции. Если свободная энергия Гиббса  $\Delta G < 0$ , то протекание коррозионного процесса термодинамически возможно [1, 4, 5].

В природных условиях большинство металлов находятся в связанном состоянии в виде оксидов или солей. Следовательно, для них это состояние является термодинамически наиболее устойчивым. Для того чтобы из природных соединений получить металлы или сплавы, которые используются как конструкционные материалы, нужно затратить энергию. Таким образом, в промышленных условиях большинство металлов и сплавов находятся в термодинамически неустойчивом состоянии. Стремление металлов перейти из металлического в ионное состояние характеризуется величиной уменьшения изобарно-изотермического потенциала реакции (или свободной энергии Гиббса).

Наименее коррозионно-устойчивыми металлами являются электроотрицательные металлы (K, Ca, Na, Mg). Реакция ионизации этих металлов сопровождается убылью свободной энергии и вероятность перехода их в окисленное состояние тем больше, чем значительнее уменьшение  $\Delta G$ . Эти металлы в природе встречаются в виде руд и солей. Наиболее коррозионно-устойчивые металлы – Pd, Ir, Pt, Au. Положительное значение изменения свободной энергии для их окисления указывает на невозможность самопроизвольного протекания реакций ионизации. В природных условиях золото, платина, иридий и палладий являются термодинамически устойчивыми. Они, как правило, встречаются в самородном состоянии. В зависимости от условий эксплуатации устойчивость металла

может в значительной степени меняться. Например, в растворах азотной кислоты алюминий и хром устойчивее меди, а в растворах щелочей магний более стоек, чем алюминий или цинк, что объясняется образованием поверхностных защитных пленок, то есть с кинетическим торможением процесса окисления.

Кинетические закономерности коррозии могут быть описаны основным постулатом химической кинетики, уравнением Аррениуса. В общем случае выделяют три основных стадии коррозионных процессов [4, 5]:

- 1) подвод компонентов коррозионной среды к поверхности металла (диффузионная);
- 2) химическая реакция на поверхности металла (кинетическая);
- 3) отвод продуктов коррозии от поверхности металла (диффузионная).

Коррозионные процессы, как и другие химические процессы, могут протекать с диффузионным или кинетическим контролем.

## **1.2 Классификация коррозионных процессов**

Общепринято выделять два вида коррозионных процессов: химическую и электрохимическую коррозию.

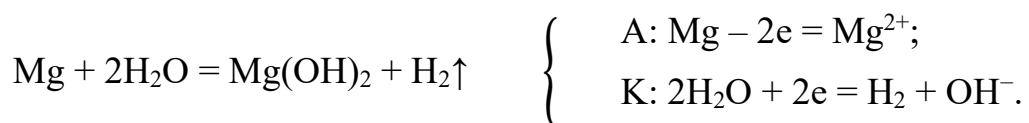
*Химическая коррозия* – процессы взаимодействия металла с окружающей средой, протекающие по механизму химической гетерогенной реакции, т. е. ионизация металла и восстановление окислительного компонента среды, происходит в одном акте. Примером химической коррозии является взаимодействие металла с жидкими неэлектропроводными средами или сухими газами. Например, окисление магния при нагревании на воздухе:



*Электрохимическая коррозия* является результатом протекания нескольких сопряженных электрохимических реакций, скорость которых зависит, помимо прочих факторов, от потенциала электрода. Коррозия электрохимического типа происходит при воздействии на металлы влажной атмосферы, разнообразных электролитов, почвенной влаги. При этом скорости процессов зависят от электродного потенциала металла. В этом случае собственно коррозия, то есть окисление металла, протекает на анодных (А) участках корродирующего металла, а восстановление



окислителя коррозионной среды – на катодных (К) участках. В примере с магнием суммарный процесс коррозии будет описываться таким же уравнением:



Таким образом, условием протекания коррозии по электрохимическому механизму является, во-первых, достаточная *электропроводность* коррозионной среды и, во-вторых, *неоднородность* поверхности металла, что приводит к возникновению анодных, более электроотрицательных, и катодных, более электроположительных, участков. Заметим, что неоднородность корродирующей поверхности может быть связана с самим металлом, с коррозионной средой, а также с условиями процесса (температура, давление, освещенность и др.). Если анодные и катодные участки закреплены во времени на определенных поверхностях, то выделяют *гетерогенно-электрохимическую коррозию*. Если они мигрируют по поверхности во времени, говорят о *гомогенно-электрохимической коррозии*. В природных условиях электрохимическая коррозия встречается повсеместно, поскольку реальные коррозионные среды содержат воду и ионы, то есть являются электролитами. Это, например, атмосферная, морская, подземная коррозия [1–5].

По условиям протекания процесса коррозии выделяют *газовую*, *жидкостную* (в жидких реактивных средах), *морскую* (по ватер-линии), *атмосферную*, *подземную* или *почвенную*, *контактную* (при контакте разнородных металлов), *радиационную* (при облучении), *целевую* (в дезаэрированных зонах) коррозию, а также *биокоррозию* (при воздействии продуктов жизнедеятельности живых организмов), коррозию внешним и блуждающим *током*, коррозию *под напряжением* (механическим), *кавитационную* коррозию (при воздействии кавитации), *фреттинг-коррозию* (при взаимном колебательном движении) и др. [1–5].

По характеру разрушений выделяют:

- *сплошная* – покрывает всю поверхность изделия равномерным слоем. Возникает при полном контакте с электролитом, например, при нахождении изделия в растворе кислоты;

- *неравномерная* – коррозионная пленка покрывает всю поверхность изделия, но внутренние повреждения распространяются неравномерно;
- *пятна* – возникают в разных местах и не проникают на большую глубину;
- *язвы* – повреждения с глубоким проникновением. Распространение хаотичное;
- *питтинг-коррозия* (точечная) – поражение на большую глубину. Наиболее опасный и сложный вид коррозии, так как на поверхности может выглядеть как обычное пятно, но при этом с очень глубоким проникновением;
- *сквозная* – следующая стадия точечной коррозии, когда металл уже поражен насквозь;
- *межкристаллитная и транскристаллитная* – тип коррозии, которая происходит на границах зерен без глубокой коррозии металлической матрицы. Поражает кристаллическую решетку и в некоторых случаях не имеет выхода на поверхность;
- *растрескивающая* – коррозия, возникающая при одновременном контакте с электролитом, и при механическом воздействии на металл. Один из признаков старения механизмов и подвижных деталей;
- *ножевая* – коррозия, образующая по сварным швам;
- *подповерхностная* – коррозия начинается на поверхности, но затем распространяется в глубине металла. Продукты коррозии оказываются сосредоточенными в полостях металла. Этот вид коррозии вызывает вспучивание и расслоение металлических изделий.

Схемы протекания некоторых видов коррозии металлов представлены на рисунке 1.

## **2 Основные способы защиты металла от коррозии**

Для защиты от коррозии, в частности, наносят защитные покрытия, используют нержавеющий крепеж, поддерживают оптимальный уровень влажности в помещении с металлическими конструкциями и изделиями, регулярно очищают изделия от грязи, которая также ускоряет процесс коррозии металла [2–5].

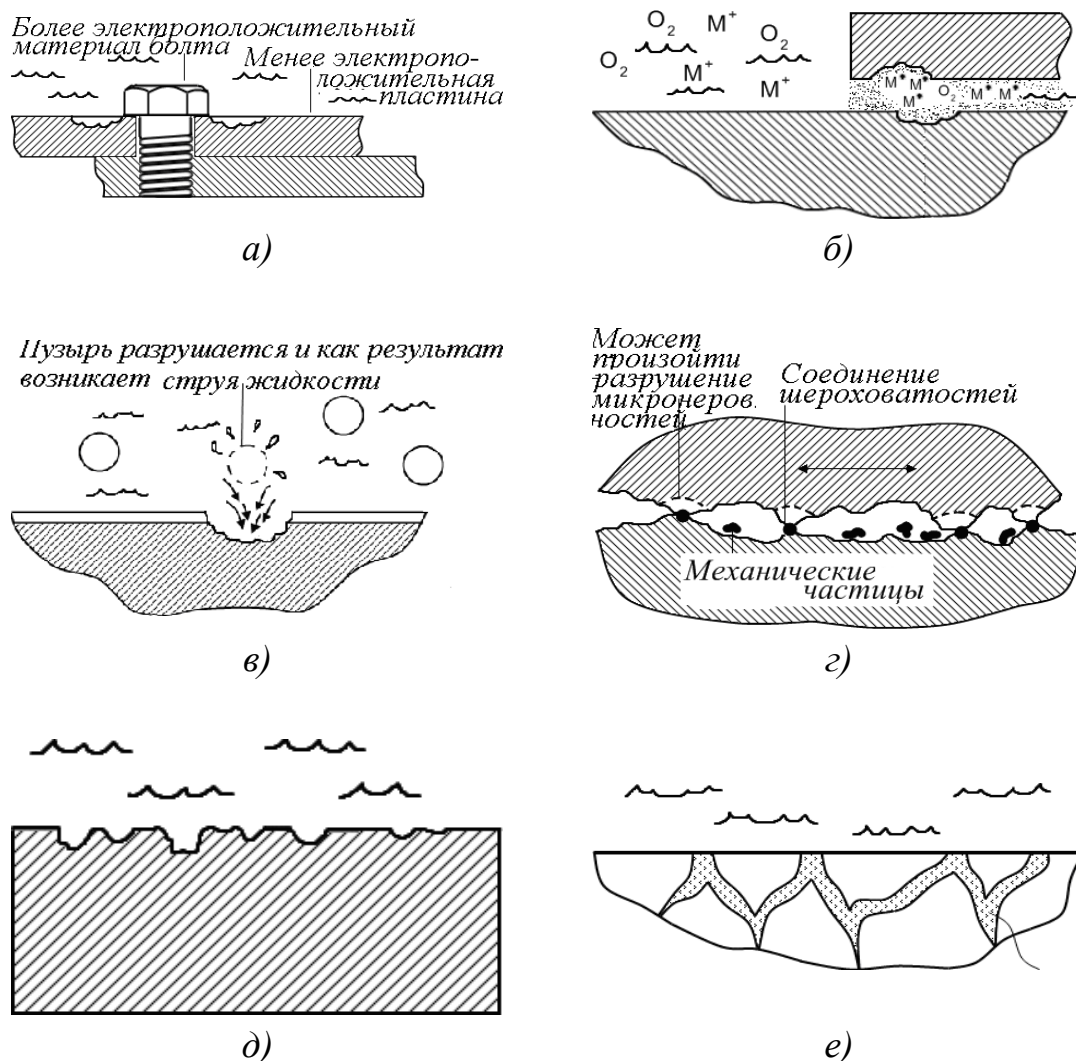


Рис. 1. Схемы протекания некоторых видов коррозии металлов [5]:

- а) – контактная; б) – щелевая; в) – кавитационная;  
 г) – фреттинг-коррозия; д) – пitting-коррозия;  
 е) – межкристаллитная коррозия

Защита металла от коррозии требует комплексного подхода, учитывая факторы окружающей среды, тип металла и условия эксплуатации.

В целом, все способы можно разделить на три вида: конструкционные, пассивные и активные (электрохимические).

## 2.1 Конструкционные способы защиты

Способ основан на правильном проектировании изготовления металлических изделий с учетом предотвращения воздействия агрессивных сред и влаги. Для этого, в частности, применяют метод изменения состава

металла с добавлением коррозионностойких материалов. Использование материалов, которые обладают хорошей устойчивостью к коррозии, таких как нержавеющая сталь или алюминий, может значительно снизить риск коррозии [4, 5].

Также к конструкционным способам относятся и другие решения:

- Изолирование друг от друга металлов с различными электрохимическими свойствами. Если в конструкции присутствуют различные металлы, важно разделить их с использованием изоляционных материалов или прокладываемых слоев. Это помогает предотвратить возникновение гальванической коррозии, которая возникает при контакте металлов с различными электрохимическими свойствами.

- Использование дренажных систем, которые могут использоваться для удаления скапливающейся влаги с поверхности металла или изнутри конструкции. Это особенно важно в случае наличия пустот или внутренних полостей, где может собираться влага.

- Избегание острых углов и скрытых полостей в металлических конструкциях, в которых может скапливаться влага и грязь, способствующие коррозии. При проектировании и изготовлении металлических конструкций рекомендуется избегать таких участков или предусмотреть возможность доступа для очистки и осушения.

- Обеспечение хорошей вентиляции вокруг металлических конструкций помогает предотвратить скапливание влаги и создает условия для быстрого высыхания, что способствует защите от коррозии.

- Изоляция и защита от химических веществ. Если металлическая конструкция будет подвергаться воздействию агрессивных химических веществ, необходимо предусмотреть соответствующую изоляцию и защиту, чтобы предотвратить их контакт с металлом.

## **2.2 Пассивные способы защиты**

Подразумевает использование различных методов и материалов, которые создают защитную пленку на поверхности металла и предотвращают контакт с агрессивными средами. Перед тем, как нанести покрытие, поверхность металла обрабатывают абразивными элементами, лазером или химическими растворами. После это непосредственно наносится

покрытие, которое будет защищать металл от коррозии. В быту это, как правило, лакокрасочное покрытие, а в производстве часто наносят тонкий слой металлосплава, который устойчив к коррозии: хром, никель, цинк и др. [2–5].

Пассивные способы защиты от коррозии варьируются в зависимости от типа металла, условий эксплуатации и окружающей среды. Часто эффективность пассивных методов усиливается совместным использованием нескольких способов.

### **2.3 Электрохимическая защита**

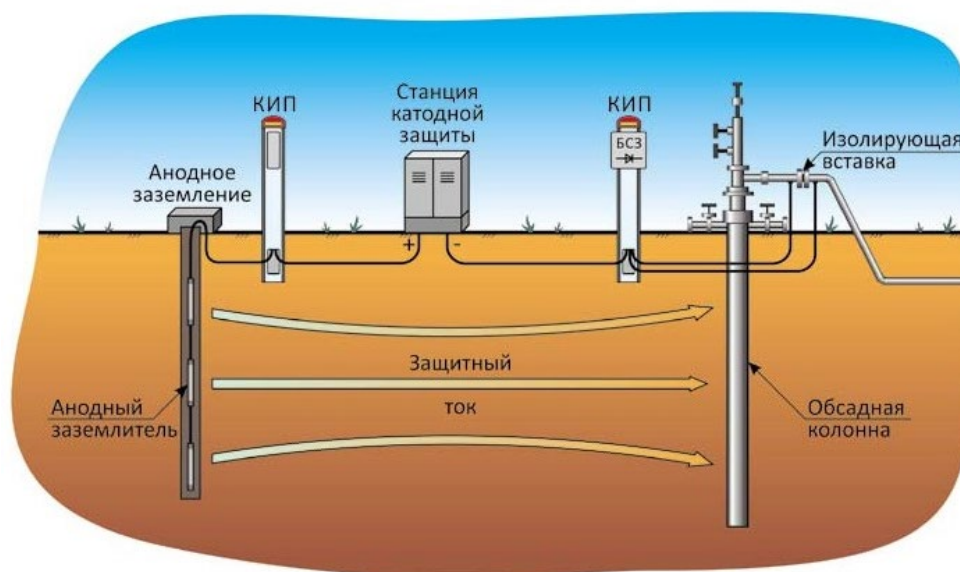
Электрохимическая защита, независимо от способа её осуществления, применима для защиты металлов только от действия коррозионных сред, обладающих хорошей электропроводностью. Наиболее распространена катодная защита, которая находит широкое применение для предохранения от коррозии теплосилового оборудования и заводской аппаратуры [2–5]. Применяется также при борьбе с грунтовой и морской коррозией металлов (так, например, защищают борта кораблей).

*Электрохимическая защита* осуществляется присоединением защищаемой металлической конструкции или к отрицательному полюсу внешнего источника постоянного тока (т. е. в качестве катода), или к металлу, имеющему более отрицательный потенциал. Первый способ защиты металлов, осуществляемый подачей постоянного тока от внешнего источника, получил название *катодной защиты*, а второй, осуществляемый путем присоединения защищаемой конструкции к электроду, обладающему потенциалом, более отрицательным, чем защищаемая поверхность, – *протекторной защиты*.

Примером являются системы электрохимической (катодной) защиты стальных трубопроводов и подземных сооружений от коррозии [2].

Другими словами, катодная защита – это защита металлических частей объектов путем формирования отрицательных (по отношению к земле) потенциалов при помощи катодной станции защиты (КСЗ) – построенного источника энергии (рис. 2).

При этом защищаемый объект соединяют с отрицательным выводом КСЗ.



*Рис. 2. Схема системы катодной защиты стальных трубопроводов и подземных сооружений от коррозии*

Заземление – это важная часть электрохимической защиты. Здесь в качестве протекторов выступают анодные электроды, погружаемые в электролит – грунт и соединяемые с металлическим защищаемым объектом – катодом.

Расходными материалами при изготовлении протекторов служат алюминий, магний (хотя он и дает чрезмерно высокий электродный потенциал на защищаемом сооружении, цинк и их сплавы.

Под катодную защиту производится бурение скважины. Затем в скважину постепенно опускают электрод заземления, стальные круглые отрезки диаметром от 16 до 20 мм, которые по мере погружения сваривают между собой.

Катодная защита обсадных колонн буровых скважин предусматривает схему совместной защиты нескольких скважин одной установкой катодной защиты.

Применяется и персональная защита обсадных колонн.

Для достижения большего эффекта в комплексе используют и другие методы защиты: нанесение защитного покрытия на внешние поверхности колонн, и цементирование всего затрубного пространства скважины.

*Анодная защита* металлов пока применяется реже, так как область ее использования более ограничена; только в последние годы она находит некоторое распространение в химической промышленности. Электрохимическая защита путем анодной поляризации состоит в том, что защищаемый металл присоединяют к положительному полюсу внешнего источника постоянного тока или контактируют с металлом, имеющим более положительный потенциал. Защищаемая металлическая конструкция при анодной защите и в первом, и во втором случае становится анодом, но уменьшение скорости ее коррозии имеет место только при условии перевода конструкции в пассивное состояние. По этой причине анодная защита применима только для защиты тех конструкций, которые изготовлены из легкопассивирующихся металлов или сплавов и подвергающихся воздействию, главным образом, окислительных сред при отсутствии депассиваторов [4, 5].

Активные способы защиты металла от коррозии требуют специального проектирования и установки катодно-анодных систем, а также регулярного контроля и обслуживания [2–5].

### **3 Экспериментальная часть**

#### **3.1 Требования техники безопасности**

При выполнении данной лабораторной работы приходится иметь дело с агрессивными и токсичными веществами. Надо помнить, что агрессивные вещества (кислоты), попадая на кожу, вызывают ее поражение, а, попадая на одежду, разрушают ее. Токсичные вещества могут вызвать отравление.

Значительная часть несчастных случаев происходит из-за неправильного или неосторожного обращения с предметами, сделанными из стекла, а также в результате того, что эти предметы имеют какие-то дефекты. Наиболее часто наблюдаются порезы лица, рук и попадание осколков в глаза, поэтому необходимо соблюдать осторожность и выполнять общие правила техники безопасности, действующие в учебной химической лаборатории.

### 3.2 Цель работы

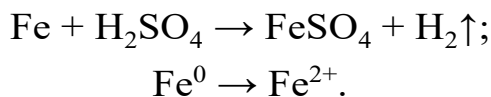
Определение скорости коррозии различных металлов гравиметрическим и объёмным методами с последующей оценкой коррозионной устойчивости испытуемых образцов с помощью глубинного показателя.

### 3.3 Подготовка к экспериментам

#### 3.3.1 Образцы для испытаний:

- серый чугун ( $\rho = 7220 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ );
- низкоуглеродистая сталь ( $\rho = 7980 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ).

Поскольку основным компонентом этих материалов является железо, то коррозия будет протекать по реакции:



Таким образом, по количеству выделившегося водорода можно судить о скорости растворения железа, что в рамках работы будет имитировать скорость коррозии.

Определение объёма водорода можно проводить различными способами. Один из наиболее применимых заключается в том, что испытуемых образец помещают в коррозионную среду и выделяющийся газ вытесняет из герметично закрытой ёмкости кислоту, которая при этом вытекает в бюретку.

#### 3.3.2 Химические реактивы, приборы, посуда:

- склянки с тубусом на 1 л, помещённые на подставке (2 шт.);
- бюретки (2 шт.);
- стаканы (2 шт.);
- штангенциркуль;
- 5 % раствор серной кислоты;
- ацетон;
- наждачная и фильтровальная бумага.

#### 3.3.3 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка изображена на рисунке 3 и представляет собой стеклянную ёмкость 1 объёмом 1–2 литра, на 2/3 заполненную 5 % раствором серной кислоты. Внизу ёмкость имеет кран 2, через который в ходе эксперимента вытесненная кислота сливается в мерную бюретку 3.



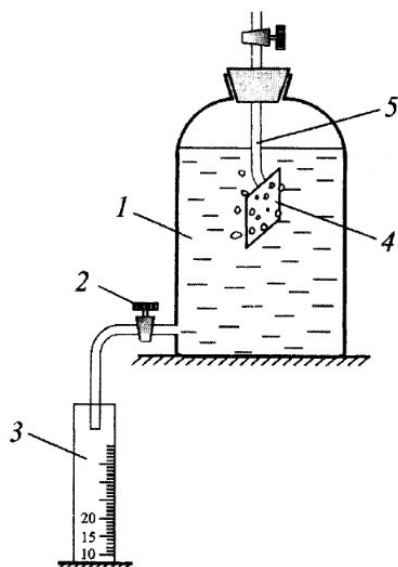


Рис. 3. Схема лабораторной установки:  
1 – ёмкость; 2 – кран; 3 – мерная бюретка;  
4 – испытуемый образец;  
5 – стеклянная подвеска

Испытуемый образец металла 4 помещается в ёмкость 1 при помощи стеклянной подвески 5.

*Примечание:* Резиновая пробка над подвеской должна герметично закрывать ёмкость. Все работы проводятся под вытяжкой.

### 3.4 Ход работы

Вначале образцы нужно подготовить к эксперименту, для чего с помощью мелкой наждачной бумаги их поверхность тщательно зачищают. Затем штангенциркулем определяют их геометрические размеры: высоту, ширину и толщину, по которым определяют площадь образца (в  $\text{см}^2$ ) и записывают её в таблицу 1.

Таблица 1

Результаты экспериментов

Образец	Площадь, $S, \text{см}^2$	Масса образца, г		$\Delta m_v = m_{\text{нач}} - m_{\text{кон}},$ г	Объём вытесненной кислоты, $V$ , мл			
		$m_{\text{нач}}$	$m_{\text{кон}}$		20 мин	40 мин	60 мин	80 мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Сталь								
Чугун								

*Примечание:* Объём вытесненной кислоты в столбцах 6–9 (табл. 1) соответствует показаниям бюретки.

Поверхность образца тщательно обезжиривают ацетоном или раствором соды, образец взвешивают на аналитических весах, надевают на

стеклянный крючок подвески 5 и помещают в емкость 1 (рис. 3), плотно закрыв резиновую пробку, после чего открывают кран 2. Фиксируют уровень вылившейся из ёмкости кислоты и отмечают время начала эксперимента. Кран 2 остаётся открытым до конца эксперимента, который длится 60–80 мин. Через каждые 20 мин определяют количество вытесненной кислоты, записывая данные в таблицу 1.

По окончании эксперимента кран 2 (рис. 3) необходимо закрыть, извлечь из ёмкости испытуемый образец, тщательно промыть его водой, просушить и взвесить, записав данные в таблицу 1.

### 3.5 Обработка экспериментальных данных

Для определения убыли металла в промежуточных точках исходят из того, что при растворении одного грамм-моля железа (55,85 г.), при нормальных условиях (760 мм рт. ст. и 273 К) выделяется 22,4 л водорода. Следовательно, масса растворенного металла находится по выражению:

$$\Delta M_i = \frac{55,85 \cdot \Delta V_i}{22,4} \cdot 10^{-3}, \text{ г}, \quad (5)$$

где  $\Delta V_i$  – объём выделившегося водорода за соответствующий промежуток времени.

Данные расчёта заносят в таблицу 2.

Таблица 2

*Результаты расчетов*

Время эксперимента, $\Delta t$ , мин	Объём выделившегося водорода, $\Delta V_i$ , мл		Масса раство- рённого ме- талла, $\Delta M_i$ , г		Скорость коррозии, $\omega_{\text{корр}}$ , г/см <sup>2</sup> · ч		Глубинный показатель коррозии, $P_i$ , мм/год	
	Сталь	Чугун	Сталь	Чугун	Сталь	Чугун	Сталь	Чугун
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20								
40–20								
60–40								
80–60								

*Примечание:*

- объём выделившегося водорода соответствует объёму вытесненной кислоты;
- данные второго и третьего столбцов таблицы 2 соответствуют объёму выделившегося водорода за промежуток времени, равный 20 мин.

Скорость коррозии образца определяют по уравнению:

$$\omega_{\text{корр}} = \frac{\Delta M_i}{S \cdot \Delta \tau} \cdot \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}}, \quad (6)$$

где  $\Delta \tau$  – время эксперимента, ч;

$S$  – площадь образца,  $\text{см}^2$  (см. табл. 1).

*Примечание:* по этой методике скорость коррозии определяют за промежуток времени равный 20 мин, т. е. 0,333 часа.

Глубинный показатель коррозии, характеризующий уменьшение толщины металла в единицу времени, определяется по формуле:

$$П = 8,76 \cdot \frac{\omega_{\text{корр}}}{\rho} \cdot 10^5, \frac{\text{мм}}{\text{год}}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность материала образца,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\omega_{\text{корр}}$  – скорость коррозии,  $\text{г/см}^2 \cdot \text{ч}$  (см. табл. 2).

Для определения погрешности объёмного метода нужно заполнить таблицу 3.

Таблица 3

*Сведенные расчеты*

Образец	Масса растворённого металла, $\Delta m_{\text{в}}, \text{г}$		Средняя скорость коррозии, $(\omega_{\text{корр}})_{\text{ср}}, \text{г/см}^2 \cdot \text{ч}$		Глубинный показатель коррозии, $П, \text{мм/год}$	
	Весовой	Объёмный	Весовой	Объёмный	Весовой	Объёмный
1	2	3	4	5	6	7
Сталь						
Чугун						

Средняя скорость коррозии, определенная весовым методом, рассчитывается по формуле:

$$(\omega_{\text{корр}})_{\text{ср}}^{\text{в}} = \frac{\Delta m_{\text{в}}}{\tau \cdot S}, \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}}, \quad (8)$$

где  $\Delta m_{\text{в}}$  – убыль материала образца по весовому методу, г (см. табл. 1);  
 $\tau$  – полное время эксперимента, ч.

Средняя скорость коррозии, определенная объёмным методом:

$$(\omega_{\text{корр}})_{\text{ср}}^{\text{о}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_{\text{корр}})_i}{n}, \frac{\text{г}}{\text{см}^2 \cdot \text{ч}}, \quad (9)$$

где  $n$  – количество слагаемых  $(\omega_{\text{корр}})_i$  (см. табл. 2).

Масса растворённого металла, рассчитанная объёмным методом:

$$\Delta M_{\text{o}} = \sum_{i=1}^n \Delta M_i, \text{ г}, \quad (10)$$

где  $\Delta M_i$  и количество слагаемых  $n$  – данные из таблицы 2.

Глубинный показатель коррозии по весовому методу:

$$П_{\text{в}} = 8,76 \cdot \frac{(\omega_{\text{корр}})_{\text{ср}}^{\text{в}}}{\rho} \cdot 10^5, \frac{\text{мм}}{\text{год}}. \quad (11)$$

Средняя величина глубинного показателя по объёмному методу:

$$П_{\text{o}} = \frac{\sum_{i=1}^n П_i}{n}, \frac{\text{мм}}{\text{год}}. \quad (12)$$

где  $П_i$  – величина глубинного показателя по объёмному методу (см. табл. 2);

$n$  – количество слагаемых (см. табл. 2).

Погрешность объёмного метода рассчитывается по формуле:

$$\Delta = \frac{|\Delta M_{\text{в}} - \Delta M_{\text{o}}|}{\Delta M_{\text{в}}} \cdot 100, \%, \quad (13)$$

либо:

$$\Delta = \frac{|(\omega_{\text{корр}})_{\text{ср}}^{\text{в}} - (\omega_{\text{корр}})_{\text{ср}}^{\text{o}}|}{(\omega_{\text{корр}})_{\text{ср}}^{\text{в}}} \cdot 100, \%. \quad (14)$$

## 4 Содержание отчета о работе

В отчете необходимо отразить: цель работы; описание исследуемых образцов, схему установки для испытаний с кратким описанием; все экспериментальные результаты и визуальные наблюдения; объяснения наблюдаемых явлений; выводы.

В выводах по работе необходимо:

- оценить коррозионную стойкость испытанных образцов по десятибалльной шкале, представленной в таблице 4;
- провести анализ характера коррозионного процесса и его развития во времени.

Таблица 4

*Десятибалльная шкала коррозионной стойкости металлов [7]*

Металлы	Глубинный показатель, П, мм/год	Балл
Совершенно стойкие	менее 0,001	0
Весьма стойкие	0,001–0,005	1
	0,005–0,01	2
Стойкие	0,01–0,05	3
	0,05–0,1	4
Пониженностойкие	0,1–0,5	5
	0,5–1,0	6
Малостойкие	1,0–5,0	7
	5,0–10,0	8
Нестойкие	свыше 10,0	9

## 5 Контрольные вопросы

1. Что такое коррозия?
2. Перечислите виды коррозии.
3. Чем отличается химическая коррозия от электрохимической?
4. Какие существуют механизмы коррозии?
5. Какие способы или методы защиты металлов от коррозии вы знаете?
6. В чем суть электрохимической катодной защиты металла от коррозии?
7. Что называется гальваническим элементом? Какие процессы протекают на его электродах?

8. Будут ли работать гальванические элементы, если оба электрода имеют отрицательные потенциалы? Оба положительные?
9. Будет ли работать гальванический элемент, имеющий электроды из одного металла?
10. В чём суть гравиметрического метода определения скорости коррозии?
11. На чём основан объёмный метод определения скорости коррозии?
12. Дайте понятие коррозионной устойчивости металлов. Как рассчитывается глубинный показатель коррозии?
13. Как можно определить скорость коррозии? В каких единицах измеряется скорость коррозии?

## Список литературы

1. Березина С.Л. Коррозионные процессы в природных и технологических средах : учебное пособие / С.Л. Березина, Н.Н. Двудичанская, Ю.А. Пучков. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 88 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа : <https://e.lanbook.com/book/>.
2. Коррозия и защита нефтепромышленного оборудования : учебное пособие / А.Н. Маркин, В.Э. Ткачева, А.Ф. Дресвянников, А.Н. Ахметова. – Казань : КНИТУ, 2022. – 187 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа : <https://e.lanbook.com/book/412352>.
3. Алибекова Е.В. Коррозия и защита металлов : учебное пособие / Е.В. Алибекова, С.Я. Алибеков, Н.Г. Крашенинникова. – Йошкар-Ола : ПГТУ, 2022. – 468 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа : <https://e.lanbook.com/book/321812>.
4. Пахомов В.С. Коррозия и защита теплообменного оборудования химических производств : учебное пособие / В.С. Пахомов. – Пенза : ПензГТУ, 2013. – 364 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – Режим доступа : <https://e.lanbook.com/book/62491>.
5. Богомазова Н.В. Защита металлов и основы материаловедения : электронный конспект лекций по одноименной дисциплине для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 01 13 «Химическая технология квантовой и твердотельной электроники» / Н.В. Богомазова, Н.П. Иванова. – Минск : БГТУ, 2014. – 105 с.
6. ГОСТ 9.908-85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 17 с.
7. ГОСТ 13819-68. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Металлы и сплавы. Десятибалльная шкала коррозионной стойкости. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 4 с.

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

## **ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КАТОДНАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛА ОТ КОРРОЗИИ**

Методические указания к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Коррозионная защита оборудования компрессорных  
станций», для студентов I–II курсов, обучающихся по направлению  
13.04.03 «Энергетическое машиностроение»

Составители

ВИЗГАВЛЮСТ Наталья Викторовна  
БУВАКОВ Константин Владимирович